

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela Académico Profesional de Ingeniería Geológica



TESIS PROFESIONAL

**CARACTERIZACIÓN PETROLÓGICA DE LA SECUENCIA VOLCÁNICA
TANTACHUAL (GRUPO CALIPUY) EN LAS ZONAS DE PABELLÓN CHICO Y
ESPINA AMARILLA**

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO GEÓLOGO

Presentado Por:

Bach. JOSVEL ABRAHAM MOSTACERO HERNÁNDEZ

Asesor:

M.Cs. Ing. VÍCTOR AUSBERTO ARAPA VÍLCA

CAJAMARCA - PERÚ

2022

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por haberme dado la vida, por haberme acompañado a lo largo de mi carrera, por ser la luz en mi camino, por darme salud, sabiduría y fortaleza para lograr mis objetivos.

A mi alma mater, la Universidad Nacional de Cajamarca, y en particular a la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Geológica que en conjunto con la plana docente me han proveído los conocimientos necesarios para enfrentar los retos profesionales del día a día, en especial a mi asesor MCs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vílca quien me brindó el soporte para esta investigación.

Al Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET), por brindarme el apoyo técnico mediante análisis de Laboratorio petromineralógico y geoquímico, dando así soporte científico a la investigación.

A mi Familia quien estuvo siempre a mi lado, apoyándome en todo momento y fomentando en mí el deseo de superación y éxito en la vida.

DEDICATORIA

Dedico la presente tesis de forma especial a mi señora madre Vilma por impulsarme a cumplir las metas que me propuse, por no dejarme caer ante las adversidades y por estar allí para darme la fuerza para seguir adelante, y por brindarme su amor y confianza infinita; a mis padrinos Armando y Nori por apoyarme en mis decisiones y estar presente cuando los necesitaba; a mis hermanos Banesa, Ruben, Yampier, Alfonso y Smith por brindarme su apoyo moral y ser la mano amiga que me fortalecía; y a toda mi familia y amistades que colaboraron desinteresadamente en la elaboración de la tesis.

CONTENIDO

	Pág.
AGRADECIMIENTO -----	i
DEDICATORIA -----	ii
LISTA DE ABREVIATURAS -----	xvi
RESUMEN -----	xvii
ABSTRACT -----	xviii
CAPÍTULO I -----	1
INTRODUCCIÓN -----	1
CAPÍTULO II -----	3
MARCO TEÓRICO -----	3
2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN -----	3
2.1.1. Antecedentes Internacionales -----	3
2.1.2. Antecedentes Nacionales-----	3
2.1.3. Antecedentes Locales-----	4
2.2. BASES TEÓRICAS -----	5
2.2.1. Petrología de las Rocas Volcánicas -----	5
2.2.2. Definición de Rocas Volcánicas -----	6
2.2.3. Clasificación de las Rocas Volcánicas -----	6
2.2.3.1. Diagrama de Streckeisen-----	6
2.2.3.2. Diagrama TAS (Total Alkali Silica) -----	9
2.2.3.3. Clasificación de Rocas Volcánicas Piroclásticas -----	10
2.2.4. Formación de las Rocas Volcánicas-----	13
2.2.4.1. Proceso Magmático para la Generación de Rocas Volcánicas -----	13
2.2.4.2. Actividad Eruptiva -----	15
2.2.5. Productos Volcánicos-----	17

2.2.5.1.	Materiales Masivos -----	17
2.2.5.2.	Materiales Fragmentarios -----	20
2.2.6.	Depósitos Piroclásticos-----	21
2.2.6.1.	Depósitos Piroclásticos de Caída -----	21
2.2.6.2.	Depósitos de Oleada Piroclástica -----	23
2.2.6.3.	Depósitos de Colada Piroclástica -----	24
2.2.6.4.	Lahares -----	24
2.2.7.	Propiedades de las Rocas Volcánicas -----	25
2.2.7.1.	Tipo de Matriz -----	25
2.2.7.2.	Grado de Cristalinidad -----	27
2.2.7.3.	Tamaño de los Cristales -----	28
2.2.7.4.	Relación de Tamaños -----	28
2.2.7.5.	Forma de los Cristales -----	29
2.2.7.6.	Color -----	29
2.3.	DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS -----	32
 CAPÍTULO III -----		34
MATERIALES Y MÉTODOS -----		34
3.1.	UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN -----	34
3.1.1.	Ubicación Geográfica -----	34
3.1.2.	Ubicación Política-----	34
3.1.3.	Accesibilidad -----	34
3.2.	PROCEDIMIENTOS-----	35
3.2.1.	Etapa Preliminar de Gabinete -----	35
3.2.2.	Etapa de Campo -----	35
3.2.3.	Etapa de Gabinete-----	36
3.3.	METODOLOGÍA-----	37

3.3.1.	Tipo, Nivel, Diseño y Método de la Investigación -----	37
3.3.2.	Población de Estudio -----	37
3.3.3.	Muestra -----	37
3.3.4.	Unidad de Análisis -----	37
3.4.	IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES -----	37
3.5.	TÉCNICAS -----	38
3.6.	EQUIPOS E INSTRUMENTOS -----	38
3.6.1.	Equipos -----	38
3.6.2.	Instrumentos -----	39
3.7.	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE DATOS -----	40
3.8.	CONTEXTO GEOLÓGICO -----	40
3.8.1.	Geología Local -----	40
3.8.1.1.	Secuencia Volcánica Tantachual (Po-tch) -----	41
3.8.1.1.1.	Secuencia Volcánica Tantachual Evento 02 (Po-tch/2) -----	41
3.8.1.1.2.	Secuencia Volcánica Tantachual Evento 03 (Po-tch/3) -----	42
3.8.1.1.3.	Secuencia Volcánica Tantachual Evento 04 (Po-tch/4) -----	43
3.8.1.1.4.	Secuencia Volcánica Tantachual Evento 05 (Po-tch/5) -----	44
3.8.1.1.5.	Secuencia Volcánica Tantachual Evento 06 (Po-tch/6) -----	45
3.8.1.1.6.	Secuencia Volcánica Tantachual Evento 08 (Po-tch/8) -----	46
3.8.1.2.	Subvolcánicos Andesíticos del Oligoceno (Po-and) -----	47
3.8.1.3.	Centro Volcánico Chicche-Hueco Grande (Nm-chg) -----	48
3.8.1.3.1.	Centro Volcánico Chicche-Hueco Grande Evento 5 (Nm-chg/5) -----	48
3.8.1.4.	Subvolcánicos y Domos Andesíticos del Mioceno (Nm-and) -----	49
3.8.1.5.	Depósitos Cuaternarios -----	50
3.8.2.	Geomorfología -----	51
3.8.2.1.	Drenaje -----	51
3.8.2.2.	Unidades Morfogenéticas -----	53
3.8.2.3.	Unidades Morfológicas Menores -----	54

3.8.3.	Geología Estructural -----	55
CAPÍTULO IV -----		57
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS -----		57
4.1.	CARACTERIZACIÓN PETROGRÁFICA MACROSCÓPICA -----	57
4.2.	CARACTERIZACIÓN PETROGRÁFICA MICROSCÓPICA -----	67
4.3.	CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA -----	80
4.3.1.	Clasificación Geoquímica TAS (Total Alkali Silica) - Le Maitre, 2002-----	82
4.3.2.	Clasificación Geoquímica para la Saturación de Alúmina en la Roca – Shand, 1943 -----	84
4.3.3.	Clasificación Geoquímica para la diferenciación de la Series Magmáticas – Kuno, 1968 y Irvine & Baragar, 1971-----	85
4.3.4.	Clasificación Geoquímica para determinar el Ambiente Tectónico – Pearce, 1980-----	87
4.3.5.	Clasificación Geoquímica para caracterizar la Madurez del Arco Volcánico – Brown, 1982 -----	89
4.3.6.	Clasificación Geoquímica para discriminar el Ambiente Formacional – Pearce et al., 1975-----	90
4.4.	CONSIDERACIONES PETROGENÉTICAS-----	92
4.5.	CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS -----	95
CAPÍTULO V -----		96
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES -----		96
5.1.	CONCLUSIONES -----	96
5.2.	RECOMENDACIONES -----	98
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS -----		99
ANEXOS -----		102

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Clasificación de rocas piroclásticas y rocas mixtas con más del 25% de piroclastos.	12
Tabla 2. Tipo de cristalinidad según los componentes que albergan las rocas ígneas.	28
Tabla 3. Tamaños de granos según su diámetro mayor para rocas ígneas.	28
Tabla 4. Forma y relación de los cristales que componen una roca ígnea.	29
Tabla 5. Clasificación por el color de los cristales en las rocas ígneas.	30
Tabla 6. Vértices en coordenadas UTM - WGS 84 que delimitan la Zona de Investigación. .	34
Tabla 7. Rutas de Accesibilidad a la Zona de Investigación.	35
Tabla 8. Tipo, Nivel, Diseño y Método de la Investigación.	37
Tabla 9. Identificación de variables Independientes y Dependientes de la Investigación.	38
Tabla 10. Clasificación de las Unidades Morfogenéticas y los resultados obtenidos mediante el Software ArcGIS 10.7.	53
Tabla 11. Datos de ubicación y descripción de la unidad geológica de las 45 muestras de mano.	59
Tabla 12. Clasificación genética, y clasificación modal por: Streckeisen (1979), Schmid (1981) y Fisher (1966) de las 45 muestras de mano.	60
Tabla 13. Métodos de ensayo empleado en el Análisis Geoquímico de Roca Total (18 Elementos Mayores, Menores, LOI).	80
Tabla 14. Valores en porcentaje para Elementos Mayores + LOI (Loss On Ignition) de las 06 muestras para el análisis geoquímico.	81
Tabla 15. Valores en porcentaje para Elementos Mayores Corregidos Sin LOI (Loss On Ignition) de las 06 muestras para el análisis geoquímico.	81
Tabla 16. Valores en partes por millón (ppm) para Elementos Menores de las 06 muestras para el análisis geoquímico.	82
Tabla 17. Valores en porcentaje de SiO ₂ , Na ₂ O y K ₂ O para la clasificación TAS de las 06 muestras analizadas.	83
Tabla 18. Valores en porcentaje de Al ₂ O ₃ , Ca ₂ O, Na ₂ O y K ₂ O para la clasificación por Saturación de Alúmina de las 06 muestras analizadas.	84

	Pág.
Tabla 19. Valores en porcentaje de K_2O , Na_2O , $FeO_{(t)}$ y MgO para la clasificación discriminando la Serie Magmática de la que se originan las 06 muestras analizadas.	86
Tabla 20. Valores en porcentaje para TiO_2 y en ppm para Zr en la clasificación geoquímica para determinar el Ambiente Tectónico	88
Tabla 21. Valores en porcentaje para CaO , Na_2O , K_2O y SiO_2 en la caracterización de la Madurez del Arco Volcánico.	90
Tabla 22. Valores en porcentaje para TiO_2 , K_2O y P_2O_5 para discriminar el ambiente formacional de las rocas ígneas.....	91

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Clasificación modal de rocas volcánicas en el doble triángulo (Streckeisen, 1979). .	8
Figura 2. Clasificación TAS (Total Alkali Silica) para la clasificación de rocas volcánicas (Le Maitre, 2002).....	10
Figura 3. Clasificación triangular de las rocas piroclásticas según el material del cual está compuesto (Schmid, 1981).....	12
Figura 4. Clasificación triangular de las rocas piroclásticas según la granulometría de sus componentes, modificado de (Fisher, 1966).	13
Figura 5. Procesos para la generación de eventos volcánicos y estructuras ígneas (Wiley & Sons, 2017).....	14
Figura 6. Modelo esquemático de la actividad volcánica explosiva y efusiva (Macías, 2017).	16
Figura 7. Coladas de lava lisa y rugosa. A. Colada de lava lisa tipo pahoehoe avanzando a través de una carretera en la zona Este del Volcán Kilauea (Recuperado de Griggs, 1990). B. Colada de lava rugosa (superficie irregular) de tipo Malpais en Lanzarote (Recuperado de Universidad Complutense de Madrid, 2010).....	18

Figura 8. Tipos más comunes de disyunción en coladas de lava. A. Disyunción lenticular en roca de composición andesítica en Zaragoza (Franco, 2012). B. Disyunción columnar a partir de lavas basálticas en Islandia (Flickr, 2020). C. Disyunción esferoidal a partir de coladas de lava en Andalucía (Flickr, 2020).....	19
Figura 10. Proyección balística de piroclastos y emplazamiento de un depósito de caída (Martínez, 2012).....	22
Figura 11. Emisión y emplazamiento de una oleada piroclástica (Martínez, 2012).	23
Figura 12. Colapso de la columna eruptiva y posterior depositación de una colada piroclástica (Martínez, 2012).....	24
Figura 13. Productos volcánicos posterior a una erupción, en la que se destaca la formación de Flujos piroclásticos, domos de lava y los lahares (Lilly, 2010).	25
Figura 14. Matrices más comunes de las rocas volcánicas: a. Matriz vítrea englobando cristales de plagioclasa en un basalto. b. Microfenocristal de piroxeno en una matriz microlítica. c. Cristales de cuarzo y feldespatos englobados en una matriz félsica en una roca dacítica. d. Basalto rico en olivinos con nicoles cruzados presentando una típica matriz máfica (Gonzáles, 2015).....	27
Figura 15. A. Textura Felsítica formada por una matriz criptocristalina en la que se aprecia fenocristales de biotita y cuarzo. B. Textura Esferulítica mostrando pequeños cuerpos esféricos, formada por la desvitrificación del vidrio volcánico. C. Cristales de olivino englobados dentro de un cristal de plagioclasa (Universidad Complutense de Madrid, 2010).....	30
Figura 16. A. Textura traquítica en una traquiandesita de un domo sub-volcánico. Los fenocristales y la pasta traquítica están orientados por el flujo magmático (Llambias, 2008). B. Textura intergranular en la que se muestra cristales paralelos y cruzados de plagioclasa que dejado cavidades en donde ha cristalizado el olivino y piroxenos (UCM, 2010). C. Textura intersertal en la que se ve una red de feldespatos alargados con intersticios rellenos de vidrio (Universidad de Granada, 2006). D. Textura vítrea presente en roca basáltica con magnetita en forma dendrítica y tabular (Renzi, 214). E. Textura de Flujo en una dacita en la que destaca la presencia de abundante vidrio en la matriz (negro con nicoles cruzados), así como cristales de cordierita (Universidad Complutense de Madrid, 2010).....	32

Figura 17. Esquema de la Metodología de Trabajo de la Investigación.	36
Figura 18. Clasificación modal por Streckeisen (1979). Todas las muestras han sido clasificadas con esta metodología ya sea para la determinación de su nombre (volcánicas efusivas) o para determinar el nombre de su composición (volcánicas explosivas). En la imagen de acercamiento se nota que 44 muestras recaen en la zona de las Andesitas Calcoalcalinas y 1 muestra en las Zona de las Dacitas.	61
Figura 19. Clasificación modal por Schmid (1981). Las muestras que han sido clasificadas por esta metodología han sido 33 y corresponden a las rocas volcánicas explosivas de las cuales 07 son tobas cristalinas, 14 tobas cristalovítreas y 10 tobas vitrocristalinas; basándose en el tipo de componente que forma la roca (cristales, vidrio y fragmentos de roca). En la imagen de acercamiento se nota la distribución de las tobas acorde a su composición.	62
Figura 20. Clasificación modal por Fisher (1966). Las muestras que han sido clasificadas por esta metodología han sido 33 y corresponden a las rocas volcánicas explosivas de las cuales 07 son tobas cristalinas, 14 tobas cristalovítreas y 10 tobas vitrocristalinas; basándose en el tamaño granulométrico de los materiales que componen la roca. En la imagen de acercamiento se nota que todas las muestras recaen en el triángulo gris el cual está considerado para las denominadas “Tobas Cineríticas” ya que más del 75% de sus componentes son menores a 2 mm.	63
Figura 21. Distribución de las muestras clasificadas en el gráfico de barras mostrando acorde a su clasificación la cantidad que le corresponde: Dacita (01 Und.), Andesita Calcoalcalina (13 Und.), Toba Cristalina (07 Und.), Toba Cristalovítrea (14 Und.), Toba Vitrocrystalina (10 Und.).	64
Figura 22. MGC-07: Roca ígnea compacta de naturaleza volcánica, de color gris parduzco, con textura porfirítica. Está compuesta por fenocristales de plagioclasas y minerales ferromagnesianos, dispuestos sobre una matriz afanítica vítrea. La roca posee densidad media a baja y dureza media, ausente de magnetismo. Fuente: INGEMMET, 2021.	64

Figura 23. MGC-11: Roca ígnea (volcánica-efusiva), compacta de naturaleza volcánica, de color gris medio con tonalidad parduzca, con textura porfirítica. Está compuesta por fenocristales de cuarzo, plagioclasas y escasos minerales ferromagnesianos, dispuestos sobre una matriz afanítica vítrea, se aprecian estructuras vítreas alargadas. La roca posee densidad media a baja y dureza media. Ausente de magnetismo. Fuente: INGEMMET, 2021. 65

Figura 24. MGC-13: Roca ígnea (volcánica-piroclástica), compacta de naturaleza volcánica, de color blanco grisáceo, con textura porfirítica. Está compuesta por fenocristales de cuarzo, plagioclasas y escasos minerales ferromagnesianos, dispuestos sobre una matriz afanítica vítrea. La roca posee densidad media a baja y dureza media, ausente de magnetismo. Fuente: INGEMMET, 2021. 65

Figura 25. MGC-14: Roca ígnea (volcánica-efusiva), compacta, de color gris pardo con tonalidad rosácea, de textura porfirítica. Está conformada por fenocristales de feldespatos y ferromagnesianos, distribuidos en matriz afanítica impregnadas por óxidos de hierro. La muestra presenta densidad y dureza media, con magnetismo muy débil. Fuente: INGEMMET, 2021. 66

Figura 26. MGC-17: Roca ígnea (volcánica-efusiva), compacta, de color gris oscuro, de textura porfirítica. Está conformada por fenocristales de feldespatos y moldes de cristales reemplazados por carbonatos, en una matriz afanítica. La roca presenta dureza y densidad media, con magnetismo débil; además con débil efervescencia en moldes de ferromagnesianos. Fuente: INGEMMET, 2021. 66

Figura 27. MGC-20: Roca ígnea (volcánica-piroclástica), compacta, de color pardo con tonalidad amarillenta, de textura fragmental. Están conformada por cristales y fragmento de cristales de feldespatos y ferromagnesianos, en una matriz afanítica. La muestra presenta densidad baja, dureza media y con magnetismo puntual. Fuente: INGEMMET, 2021. 67

Figura 28. Clasificación TAS (Total Alkali Silica) para la clasificación de rocas volcánicas para las 06 muestras del Análisis Geoquímico (Le Maitre, 2002). 83

Figura 29. Clasificación Geoquímica para la Saturación de Alúmina $A/NK = Al_2O_3 / (Na_2O+K_2O)$ versus $A/CNK = Al_2O_3 / (Ca_2O+Na_2O+K_2O)$, para las 06 muestras del Análisis Geoquímico (Shand, 1943). 85

	Pág.
Figura 30. Clasificación Geoquímica para la diferenciación de la Series Magmáticas AFM: $K_2O+Na_2O = (A)$, $FeO_{(total)} = (F)$ y $MgO = (M)$, para las 06 muestras del Análisis Geoquímico (Kuno, 1968 y Irvine & Baragar, 1971).	87
Figura 31. Clasificación Geoquímica para la determinación del Ambiente Tectónico formacional utilizando $TiO_2 \%$ vs $Zr \text{ ppm}$ (Pearce, 1980).....	89
Figura 32. Clasificación Geoquímica para caracterizar la Madurez del Arco Volcánico (Brown, 1982).....	90
Figura 33. Clasificación geoquímica para discriminar el ambiente formacional de las rocas ígneas (Pearce et al., 1975).....	92

ÍNDICE DE FOTOS

	Pág.
Foto 1. Panorama de las secuencias volcánicas principales identificadas en el área de investigación: Evento Po-tch/3, Evento Po-tch/4 y Po-tch/5. Coordenadas Fotográficas (UTM): N: 9238591; E: 750792; C: 3211.	41
Foto 2. Depósito de flujos piroclásticos de bloques, lapilli y cenizas bien consolidadas, estos depósitos contienen fragmentos porfiríticos y tobáceos tal como muestra las fotos de enfoque indicando una Toba Cristalovítrea. Coordenadas Fotográficas (UTM): N: 9237874; E: 751819; C: 3364. Ver Anexos: Formato Descriptivo MGC-43.	42
Foto 3. Depósitos piroclásticos de bloques y cenizas en intercalación con depósitos de lapilli y cenizas. La foto de enfoque presenta una muestra tomada de la secuencia fina de lapilli y ceniza clasificándola según Schmid en una Toba Cristalovítrea. Coordenadas Fotográficas (UTM): N: 9238524; E: 751278; C: 3224. Ver Anexos: Formato Descriptivo MGC-19.	43
Foto 4. Depósito de pómez y ceniza sobreyaciendo a piroclastos de bloques y ceniza gris verdosas. Las fotos de enfoque muestran material piroclásticos de ceniza y lapilli con cristales no muy bien consolidados. Coordenadas Fotográficas (UTM): N: 9238273; E: 749691; C: 3153. Ver Anexos: Formato Descriptivo MGC-36.	44

- Foto 5. Depósito de pómez y ceniza con fragmentos líticos (5 cm – 30 cm) de tobas y volcánicos porfiríticos. Las fotos de enfoque muestran los fragmentos polilíticos, de cuales se muestreó un fragmento volcánico de textura porfirítica (muestra más representativa de los fragmentos) para determinar su clasificación según Streckeisen, dando como resultado una Dacita. Coordenadas Fotográficas (UTM): N: 9237815; E: 749241; C: 3203. Ver Anexos: Formato Descriptivo MGC-11. 45
- Foto 6. Depósito de flujos piroclásticos de bloques y ceniza en contacto con flujos de lava andesítica con una microestructura fluidal tal y como se muestra en la foto de enfoque superior. La foto de enfoque inferior presenta la muestra de mano obtenida del material piroclástico subyacente al flujo de lava andesítico, y según la clasificación de Schmid se ha determinó como una Toba Cristalovítrea. Coordenadas Fotográficas (UTM): N: 9240533; E: 749523; C: 3429. Ver Anexos: Formato Descriptivo MGC-04. 46
- Foto 7. Toma de muestra para el análisis macroscópico de los depósitos piroclásticos de pómez y ceniza ricos en cristales de plagioclasas y máficos en los bancos pseudo-estratificados de espesores mayores a 2 m de la Secuencia Volcánica Po-tch/8, tal como se muestra en las tomas de enfoque (lupa 30x) a la izquierda de la foto. Coordenadas Fotográficas (UTM): N: 9240028; E: 750072; C: 3276. Ver Anexos: Formato Descriptivo MGC-27. 47
- Foto 8. Pseudo-estratificación de las intrusiones subvolcánicos andesíticas que cortan la Secuencia Volcánica Tantachual y representa los últimos eventos de época del Oligoceno. Las fotos de enfoque muestran un bloque de roca en las cuales son notorios los fenocristales de plagioclasa en una matriz fina. Coordenadas Fotográficas (UTM): N: 9240786; E: 749875; C: 3409. Ver Anexos: Formato Descriptivo MGC-02. 48
- Foto 9. Depósito piroclástico de pómez y ceniza con fragmentos tobáceos y porfiríticos dispersos en toda su extensión. Las fotos de enfoque presenta la muestra para la cual se determinó una Toba Cristalovítrea con una matriz bien soldada. Coordenadas Fotográficas (UTM): N: 9240320; E: 748304; C: 3432. Ver Anexos: Formato Descriptivo MGC-01. 49

Foto 10. Vista de domo andesítico intruyendo el Centro Volcánico Chicche-Hueco Grande-Evento 5 (Nm-chg/5). La foto de enfoque muestra una andesita con presencia de óxidos en los intersticios. Coordenadas Fotográficas (UTM): N: 9239813; E: 748903; C: 3393. Ver Anexos: Formato Descriptivo MGC-09.	50
Foto 11. Principales depósitos cuaternarios, las imágenes de enfoque muestran: A. Depósito fluvial con material redondeado y sub-redondeado. B. Depósito eluvial con material sub-anguloso expuesto en el corte de carretera. Coordenadas Fotográficas (UTM): N: 9239169; E: 750470; C: 3166.	51
Foto 12. Vista panorámica aguas abajo del Río Yanahuanga, principal afluente del Río San Miguel. Coordenadas Fotográficas (UTM): N: 9238727; E: 750073; C: 3127.	52
Foto 13. Vista panorámica aguas arriba de la Quebrada Ferruyoc, principal afluente del Río Yanahuanga. Coordenadas Fotográficas (UTM): N: 9240351; E: 751076; C: 3326.	52
Foto 14. Principales unidades morfogénicas de la zona de estudio. Ladera: 7°; Lomada: 16° y Ladera: 31°. Coordenadas Fotográficas (UTM): N: 9239980; E: 750555; C: 3295.	54
Foto 15. Disyunción esferoidal en los bloques de rocas piroclásticas de la Secuencia Volcánica Tantachual-Evento 04 (Po-tch/4). Coordenadas Fotográficas (UTM): N: 9237514; E: 749376; C: 3091.	55
Foto 16. Estratificación de flujos de lava de composición andesítica suprayaciendo a la Secuencia Volcánica Tantachual-Evento 3 (Po-tch/3). Coordenadas Fotográficas (UTM): N: 9236802; E: 749136; C: 3056. Ver Anexos: Formato Descriptivo MGC-14.	55
Foto 17. Falla de dirección NO - SE (Azimut: N 330° – N 345°, Inclinación: 15°NE.) con cinemática principal de Rumbo Sinistral que desplaza a la secuencia Po-tch/3 con respecto a la Po-tch/2, tal como muestra la foto réplica editada. Coordenadas Fotográficas (UTM): N: 9239587; E: 750807; C: 3198.	56
Foto 18. Falla de dirección SO – NE (Azimut: N 187°, Inclinación: 41° NO) con cinemática principal Inversa afectando los flujos andesíticos estratificados de la Secuencia Volcánica Po-tch/4, tal y como muestra la foto réplica editada. Coordenadas Fotográficas (UTM): N: 9239325; E: 750641; C: 3181.	56

ÍNDICE DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Descripción Microscópica y Mineralógica para la muestra MGC-07.....	68
Cuadro 2. Características Texturales y de Alteración - Descripción de Fotomicrografías para la muestra MGC-07.....	69
Cuadro 3. Descripción Microscópica y Mineralógica para la muestra MGC-11.....	70
Cuadro 4. Características Texturales y de Alteración - Descripción de Fotomicrografías para la muestra MGC-11.....	71
Cuadro 5. Descripción Microscópica y Mineralógica para la muestra MGC-13.....	72
Cuadro 6. Características Texturales y de Alteración - Descripción de Fotomicrografías para la muestra MGC-13.....	73
Cuadro 7. Descripción Microscópica y Mineralógica para la muestra MGC-14.....	74
Cuadro 8. Características Texturales y de Alteración - Descripción de Fotomicrografías para la muestra MGC-14.....	75
Cuadro 9. Descripción Microscópica y Mineralógica para la muestra MGC-17.....	76
Cuadro 10. Características Texturales y de Alteración - Descripción de Fotomicrografías para la muestra MGC-17.....	77
Cuadro 11. Descripción Microscópica y Mineralógica para la muestra MGC-20.....	78
Cuadro 12. Características Texturales y de Alteración - Descripción de Fotomicrografías para la muestra MGC-20.....	79

LISTA DE ABREVIATURAS

ANFs: Anfiboles

ARCs: Arcillas

bt: Biotita

CBs: Carbonatos

cz: Cuarzo

GEOCATMIN: Sistema de Información Geológico y Catastral Minero

goe: Goethita

hm: Hematita

ilm: Ilmenita

INGEMMET: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico

LIMs: Limonitas

LOI: Loss on Ignition (Pérdida por Ignición)

mt: Magnetita

N.I: No Identificado

NPx: Nícoles Paralelos

NXs: Nícoles Cruzados

op: Opacita

PGLs: Plagioclasas

PX: Piroxenos

SPTNs: Serpentinatas

vd: Vidrio

RESUMEN

La Secuencia Volcánica Tantachual (Po-tch) es una unidad que pertenece a la Formación Porculla-Grupo Calipuy, y que carece de una descripción detallada, es por ello que el fin de la presente investigación ha sido caracterizarla petrológicamente, determinándose que alberga depósitos piroclásticos conformados por cenizas, pómez, lapilli y bloques con clastos andesíticos y dacíticos que combinados, permiten diferenciar distintos eventos, identificándose 06 (Po-tch/2, Po-tch/3, Po-tch/4, Po-tch/5, Po-tch/6 y Po-tch/8) de los 09 propuestos por el INGEMMET. La base para la caracterización petrológica fue el muestreo en campo, recolectándose 45 muestras e identificándose macroscopicamente 31 muestras piroclásticas (07 tobas cristalinas, 14 tobas cristalovítreas, 10 tobas vitrocristalinas) y 14 efusivas (13 andesitas calcoalcalinas, 01 dacita). Asimismo, se seleccionaron 06 muestras representativas para los análisis de laboratorio determinándose en el análisis petromineralógico que las muestras contienen minerales esenciales de plagioclasas, cuarzo y anfíboles, minerales accesorios de ferromagnesianos, biotita y óxidos de hierro, y como minerales secundarios limonitas, arcillas, serpentinas, saponitas; englobados en una matriz de vidrio volcánico, ceniza y microcristales de ferromagnesianos y plagioclasas; en el análisis geoquímico se determinó que las muestras recaen en la Serie Calcoalcalina de composición andesítica-riolítica. Adicionalmente, el cartografiado geológico a escala 1:20000, permitió la identificación de 06 eventos; el soporte de dataciones geocronológicas de estudios previos determinó que la Secuencia empezó su actividad volcánica a principios del Oligoceno y las características de depositación y de composición hacen suponer que estuvo ligada a erupciones de tipo Pliniano con un probable Centro Eruptivo a 6 km al Sur-Este.

Palabras Claves: Petrología, Petromineralogía, Geoquímica, Secuencia Volcánica, Depósito Piroclástico, Centro Eruptivo.

ABSTRACT

The Tantachual Volcanic Sequence (Po-tch) is a unit that belongs to the Porculla Formation-Calipuy Group, and that lacks a detailed description, which is why the purpose of this investigation has been to characterize it petrologically, determining that it houses pyroclastic deposits. made up of ashes, pumice, lapilli and blocks with andesitic and dacitic clasts that, combined, allow different events to be differentiated, identifying 06 (Po-tch/2, Po-tch/3, Po-tch/4, Po-tch/5, Po -tch/6 and Po-tch/8) of the 09 proposed by INGEMMET. The basis for petrological characterization was field sampling, collecting 45 samples and macroscopically identifying 31 pyroclastic samples (07 crystalline tuffs, 14 crystallovitreous tuffs, 10 vitrocristalline tuffs) and 14 effusives (13 calcoalkaline andesites, 01 dacite). Likewise, 06 representative samples were selected for laboratory analysis, determining in the petromineralogical analysis that the samples contain essential minerals of plagioclase, quartz and amphiboles, accessory minerals of ferromagnesian, biotite and iron oxides, and as secondary minerals limonites, clays, serpentines. , saponites; embedded in a matrix of volcanic glass, ash and ferromagnesian and plagioclase microcrystals; in the geochemical analysis it was determined that the samples fall into the Calcoalkaline Series of andesitic-rhyolitic composition. Additionally, the geological mapping at a scale of 1:20,000, allowed the identification of 06 events; the support of geochronological dating from previous studies determined that the Sequence began its volcanic activity at the beginning of the Oligocene and the characteristics of deposition and composition suggest that it was linked to Plinian-type eruptions with a probable Eruptive Center 6 km to the South-East.

Keywords: Petrology, Petromineralogy, Geochemistry, Volcanic Sequence, Pyroclastic Deposit, Eruptive Center.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El estudio de las rocas ígneas va cada vez evolucionando con los nuevos métodos y técnicas que ayudan a identificar, discriminar y datar sus componentes; es allí que la rama de la petrología ígnea cobra importancia teniendo en cuenta que más de los dos tercios de la corteza está constituida por rocas ígneas y que en esta investigación se estudiará básicamente las rocas ígneas volcánicas, describiendo sus propiedades físicas, químicas, mineralógicas apoyándose de otras disciplinas como la petrografía y la geoquímica y que sumado a otras ramas geológicas como la estratigrafía, vulcanología y geocronología hacen del presente estudio petrológico un recurso versátil para la investigación científica.

La Secuencia Volcánica Tantachual perteneciente al Grupo Calipuy (3 M.a – 55 M.a), está caracterizada por alojar depósitos de flujos piroclásticos y volcanoclásticos producto del vulcanismo Cenozoico (Chávez et al., 2010). El Grupo Calipuy ha sido dividido en la Formación Llama y Porculla para el Cuadrángulo de Chota y en la Formación Tembladera, Chilete, San Pablo y Huambos para el Cuadrángulo de Cajamarca; esta división no toma en cuenta la vulcanogénesis de las formaciones, por lo cual se ha establecido que los depósitos volcánicos proceden de distintos centros de emisión (Navarro et al., 2008). Es así que a falta de investigaciones y bibliografía que describa las características petrológicas, estratigráficas, físicas, químicas y modo de ocurrencia de la Secuencia Volcánica Tantachual, surge la necesidad de realizar un estudio petrológico detallado que permita tener un conocimiento más certero y concreto que pueda ser utilizado como base para posteriores estudios.

Las últimas investigaciones que han sido realizadas de los depósitos volcánicos en la Región Cajamarca han dejado a la luz nuevas interrogantes que muchas de ellas aún siguen sin resolver, tal es el caso de las características petrológicas y modo de ocurrencia de la Secuencia Volcánica Tantachual, en este sentido es que se plantea la siguiente interrogante para la investigación: ¿Cuáles son las características petrológicas de la Secuencia Volcánica Tantachual en las zonas de Pabellón Chico y Espina Amarilla?, por ello, surge la necesidad de realizar una investigación que permita caracterizar la secuencia volcánica en mención; en este contexto, el estudio de las características

petrológicas ayudará a definir los rasgos litológicos, propiedades físicas y químicas de las rocas, así como el modo de ocurrencia en la que se depositó dicha secuencia volcánica. Por otra parte, la falta de estudios geológicos en las zonas de Pabellón Chico y Espina Amarilla, le darán un valor agregado a la investigación la cual servirá como base para posteriores trabajos que se deseen realizar.

La investigación de las características petrológicas de la Secuencia Volcánica Tantachual en los centros poblados de Pabellón Chico y Espina Amarilla, será también, un aporte al conocimiento geológico puesto que se describirá a detalle rasgos litológicos, petrográficos y modo de ocurrencia de dicha Secuencia Volcánica; para ello como objetivo principal se tendrá que determinar las características petrológicas, a esto se suma, realizar la clasificación petrográfica, el cartografiado geológico a escala 1:20000, determinar los procesos de formación de los eventos volcánicos e interpretar la ubicación de centro de emisión volcánica.

Como parte de la investigación y a través de la información recopilada, se planteó como hipótesis que la Secuencia Volcánica Tantachual en los centros poblados de Pabellón Chico y Espina Amarilla se caracteriza por presentar una intercalación de flujos piroclásticos de composición andesítica que se diferencian unas de otras por la granulometría de sus componentes ya sea bombas, lapilli y/o cenizas; esto supone una actividad volcánica explosiva con distintos eventos de emisión a partir de un centro volcánico; por lo que se deduce que la secuencia volcánica no presenta variables extremas en la composición petrológica y geoquímica.

Por último, cabe señalar cómo está estructurada la presente tesis de investigación: Capítulo I, Introducción: Presenta y expone el problema, objetivos y justificación de la Tesis. Capítulo II, Marco Teórico: Describe los antecedentes tanto locales, nacionales e internacionales relacionados a la investigación, esto permite contrastar y comparar con otras fuentes; además describe las bases teóricas en la que se fundamenta gran parte del presente estudio y términos básicos a tener en cuenta. Capítulo III, Materiales y Métodos: Muestra la ubicación de la investigación, los procedimientos de cómo fue desarrollándose, la metodología aplicada, la identificación de variables, las técnicas, equipos e instrumentos utilizados, el análisis e interpretación de los datos y el contexto geológico. Capítulo IV, Análisis y Discusión de Resultados: Describe las características petrográficas macroscópicas, microscópicas, características geoquímicas, las consideraciones petrogenéticas y la contrastación de la hipótesis planteada. Capítulo V, Conclusiones y Recomendaciones: Expone de forma resumida los resultados de la investigación y propone nuevos estudios. Finalmente se describe las referencias bibliográficas y los anexos.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1. Antecedentes Internacionales

Alfaro (2017). Realizó el estudio denominado “Caracterización petrográfica y geoquímica de las rocas ígneas en el sector pacífico de la Cordillera de Talamanca, Costa Rica”, en el cual determinó que las ratios de Sr/Y – Y y La/Yb – Yb pueden usarse para la diferenciación de unidades geológicas las cuales se caracterizan por comprender rocas volcánicas.

Abdissa (2018). Realizó el estudio denominado “Petrography and geochemistry of basement rocks from Abay (blue Nile) River Gorge, around Agemsa, Etiopía”, determinando con la geoquímica, que en ciertas muestras en las que predominan los minerales félsicos y con valores de 77.4% de SiO₂, y contenido relativamente bajo de MgO, Fe₂O₃ y CaO indicarían que el protolito sería de rocas ígneas félsicas (granitos); por el contrario, en las muestras que predominan la hornblenda, plagioclasa y biotita con 45%-55% de SiO₂ y relativamente enriquecida por MgO, Fe₂O₃ y CaO, indicaría un protolito de roca ígnea máfica (basaltos).

2.1.2. Antecedentes Nacionales

Chávez (2010). Realizó el estudio denominado “Variaciones geoquímicas y clasificación por arcos magmáticos de las rocas volcánicas del Grupo Calipuy, Cajamarca, La Libertad y Ancash”, en el cual determinó que entre 24 M.a y 10 M.a, se tuvo la mayor producción de depósitos de piroclastos en respuesta a la maduración termal de la corteza, debido al engrosamiento cortical y al incremento en la velocidad de convergencia de la subducción.

Arcos (2016). Realizó el estudio denominado “Caracterización petrográfica-geoquímica del Grupo Barroso relacionada a la mineralización entre los paralelos 16°30’ y 17°30’ latitud Sur, Moquegua, Puno y Tacna” determinando que la zona de estudio en el Sector Occidental la

andesita ejerce el control petrográfico, donde la plagioclasa está presente con rangos de hasta 88%, piroxenos y anfíboles hasta 6%, minerales opacos menos del 5%, olivino hasta 2%; en cambio, en el Sector Oriental las traquitas ejercen el control petrográfico, donde las plagioclasas se presentan hasta en 50% y feldespato potásico hasta 40%, mayor presencia de matriz y de biotita-cuarzo.

Fuentes (2018). Realizó el estudio denominado “Petrología de rocas extrusivas en el Complejo turístico Sillustani, Puno” en el cual determinó las características geológicas y petrológicas representándolas como erupciones de andesitas basálticas de poco volumen, a manera de pequeños conos lávicos monogénicos; y que mediante la microscopia concluyó que las microestructuras presentes varían desde porfídica a hipidiomórfica.

2.1.3. Antecedentes Locales

Navarro (2008). Realizó el estudio denominado “Periodos eruptivos del volcanismo Cenozoico (Grupo Calipuy) en la cordillera Occidental del Norte del Perú: Segmento Cajamarca”, determinó que los depósitos volcánicos tuvieron una actividad continua entre el Eoceno Inferior al Mioceno Superior y estableció por lo menos cinco periodos de volcanismo.

Spelucín (2017). Realizó el estudio denominado “Caracterización petrológica de la Formación Porculla (Grupo Calipuy), Cumbemayo, Cajamarca” en el cual clasificó 30 muestras de rocas de la Fm. Porculla, empleando el diagrama de Streckeisen y Schmidt concluyendo en: 19 muestras de composición andesítica, 10 muestras de composición dacítica, y 1 muestra de composición riolítica; 15 tufos de cristales, 7 tufos cristalolíticos y 6 tufos cristalovítricos.

Rodríguez (2019). Realizó el estudio denominado “Caracterización petrológica del Volcánico Huambos en las zonas de Tual y Porcón Bajo, Cajamarca” determinando a partir de 45 muestras de roca empleando el diagrama de Streckeisen y Schmidt, una secuencia que consistió: 10 andesitas; 4 tobas de cristales, 26 tobas cristalolíticas y 5 tobas cristalovítricas.

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. Petrología de las Rocas Volcánicas

La petrología es el estudio de las rocas, y ya que la mayoría de las rocas están constituidas por minerales, la petrología depende en gran medida de la mineralogía y de la geoquímica. La petrología estudia la composición, estructura y textura de las rocas, su ocurrencia y distribución, y su origen en relación con condiciones físico-químicas, procesos geológicos y la tectónica de placas (García, 2016).

La petrología se apoya de la petrografía la cual se ocupa de la descripción y clasificación de las rocas mediante la observación microscópica de secciones o láminas delgadas derivadas de las rocas en estudio, en un microscopio petrográfico, clasificándolas según su textura y composición mineralógica. Este tipo de análisis revela una serie de características y/o propiedades evaluables en los cristales y la relación que existen entre ellos, lo que va a ayudar a determinar la composición de la roca centrándose principalmente en la naturaleza y origen de la misma.

De todos los minerales que forman una roca, se diferencian los componentes primarios y los secundarios; los primarios incluyen a los esenciales que dan nombre a la roca y se presentan de una manera constante y los accidentales o accesorios que su presencia no es tan indispensable para la clasificación de la roca; los minerales secundarios son aquellos que se originan por la transformación o alteración de minerales primarios.

Después de las observaciones macroscópicas se realiza una descripción microscópica, la cual consiste en determinar la composición mineralógica y los rasgos texturales, con lo que es posible obtener mucha información de donde se originó la roca; también se determina la forma y color de los cristales, tipo u origen de cada mineral (primarios o secundarios), la textura, la relación mutua entre los minerales y/o asociaciones minerales, así como la matriz o cementante en caso que esté presente. Cada tipo de roca tiene características microscópicas específicas muy importantes en una clasificación. Cabe señalar que ambos análisis en conjunto (macroscópico y microscópico) brindan los parámetros necesarios para describir y clasificar acertadamente una roca (Turner, 1963).

2.2.2. Definición de Rocas Volcánicas

Las rocas volcánicas se originan cuando los magmas emergen al exterior de la superficie de la Tierra, dando lugar a la lava de los volcanes, y se enfrían en la superficie terrestre a temperaturas y presiones bajas. El resultado son rocas constituidas por una masa de cristales pequeños o bien materia amorfa sin cristalizar (vidrio). En ocasiones se pueden distinguir algunos minerales rodeados de una masa microcristalina o amorfa. Es común clasificar las rocas volcánicas en función de su composición química. Una roca muy frecuente y fácil de reconocer por sus tonos oscuros es el basalto. La riolita, por el contrario, presenta tonos claros (Instituto de Geociencias de la Universidad Complutense de Madrid, 2016).

2.2.3. Clasificación de las Rocas Volcánicas

La IUGS (International Union of Geological Sciences) propone dos tipos de clasificaciones que son las más usadas. Una es la que se basa en las relaciones modales en el espacio QAFP, con idéntica definición a la dada en rocas plutónicas. La otra es la clasificación TAS (Total Alkali Silica), basada en la composición química y que se aplica cuando la moda no puede ser determinada. La determinación de la moda mineral es una tarea imposible en la mayoría de las rocas volcánicas, ya que en muchos casos solo se identifican los minerales que forman parte de la población de macrocristales (fenocristales y xenocristales), y no los de la matriz por ser criptocristalina o incluso vítrea.

La aplicación de este criterio de forma estricta llevaría a usar la clasificación química (TAS) como norma general en las rocas volcánicas, con las limitaciones que implica reducir toda la variabilidad composicional de las rocas a dos componentes: la suma de álcalis ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) y la sílice (SiO_2). Sin embargo, existe una gran cantidad de información útil en las asociaciones de macrocristales que, aunque no reproducen la composición modal de la roca, pueden ser utilizadas como guía para la clasificación.

2.2.3.1. Diagrama de Streckeisen

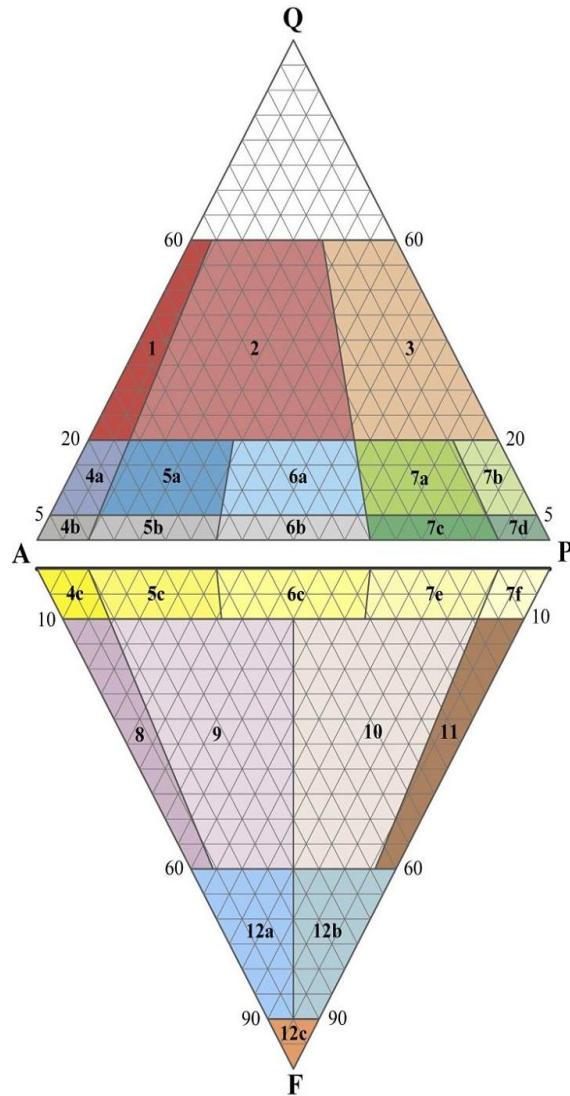
El diagrama QAFP es un diagrama ternario utilizado para la clasificación de las rocas ígneas. La peculiaridad que presenta es que el diagrama QAFP está configurado con dos triángulos ternarios contiguos en los que Cuarzo y Feldespatoides son compuestos antagónicos, es decir, que no pueden utilizarse ambos a la vez en la clasificación de una roca.

El término QAFP corresponde a los principales grupos de minerales de este tipo de rocas:

- **Q:** corresponde a “Cuarzo” (en inglés: Quartz) y a otros minerales de SiO_2 .
- **A:** significa “Feldespato Alcalino” (en inglés: Alkali Feldspar), en el que se incluyen los feldespatos potásicos: ortosa, hialofano y anortoclasa.
- **F:** que equivale a “Feldespatoideos” (en inglés: Feldspathoids) en los que se representa minerales como la leucita, kalsilita, nefelina, sodalita, noseana, hauyna, cancrinita, analcima y los productos de transformación de estos minerales.
- **P:** que corresponde a “Plagioclasa” (en inglés: Plagioclase) también denominado feldespato de calcio y sodio en los cuales están minerales tales como albita, andesina, anortita, banalsita, bytownita, dmisteinbergita y labradorita.

El Diagrama QAFP se utiliza en la clasificación de rocas ígneas, pudiendo obtenerse la composición de una roca incluso bajo microscopio óptico. Antes que nada, se debe de estimar el porcentaje de los componentes principales de las rocas: Cuarzo, feldespato potásico, plagioclasas y feldespatoideos. Cabe resaltar que para este diagrama el cuarzo y los feldespatoideos son incompatibles, por eso ocupan extremos opuestos en el doble triángulo. No obstante, una roca puede presentar muchos más minerales, y por tanto en el análisis composicional, se deben de tener todos en cuenta. Una vez estimada la composición porcentual de todos los minerales, se recalcularán únicamente teniendo en cuenta los minerales de interés.

Una vez recalculados los porcentajes de los 3 componentes a introducir en el diagrama, se proyectarán en este. Hay que tener en cuenta que cada vértice corresponde al 100% de ese componente. Con el cruce de los tres componentes, se obtendrá un punto concreto que se identificará con una roca ígnea. Para identificar dicha roca, deberemos de recurrir a la clasificación de rocas que se adjunta a continuación, obteniendo en ese momento el nombre de la roca correspondiente.



CLASIFICACIÓN DE ROCAS IGNEAS VOLCÁNICAS (STRECKEISEN, 1979)	
Q: Cuarzo	M menor a 90%: $M = 100 - (Q+A+P+F)$
A: Feldespato potásico o feldespato alcalino	
P: Feldespato sódico (Plagioclasas)	
F: Feldespatoides	M mayor a 90%: Ultramafita
M: Minerales máficos	
1: Riolita de feldespato alcalino	7: Andesitas y Basaltos (M > 35%)
2: Riolita	7a: Andesita calcoalcalina
3: Dacita	7b: Basalto toleítico
4: Traquitas de feldespato alcalino	7c: Mugearita
4a: Cuarzo-traquita de feldespato alcalino	7d: Basalto calcoalcalino rico en Al
4b: Traquita de feldespato alcalino	7e: Mugearita
4c: Traquita de feldespato alcalino con feldespatoides	7f: Basalto alcalino y Hawaiiita
5: Traquitas	8: Fonolita
5a: Cuarzo-traquita	9: Fonolita tefrítica
5b: Traquita	10: Tefrita fonolítica (Basanita si Olivino > 10%)
5c: Traquita con feldespatoides	11: Tefrita (Basanita si Olivino > 10%)
6: Lacitas o Latitas	12: Foídita
6a: Cuarzo-lacita	12a: Foídita fonolítica
6b: Lacita	12b: Foídita tefrítica
6c: Lacita con feldespatoides	12c: Foídita

Figura 1. Clasificación modal de rocas volcánicas en el doble triángulo (Streckeisen, 1979).

2.2.3.2. Diagrama TAS (Total Alkali Silica)

Esta clasificación es recomendada por la IUGS (International Union of Geological Sciences), se utiliza cuando se carece de análisis modales. Esta clasificación está dada por diversos autores, tales como: Zanettin (1984), Le Maitre (1984), Le Bas et al. (1986).

La construcción de la clasificación TAS se basa en los siguientes criterios:

- Los campos identificados fueron elegidos de acuerdo, con el uso corriente de los nombres empleados.
- Se consideraron como rocas frescas aquellas con $H_2O+ < 2\%$ y $CO_2 < 0.5\%$.
- Todos los análisis son re-calculados al 100%, libres de H_2O y CO_2 .
- Los límites de sílice para los campos de picrobasaltos, basaltos, andesitas basálticas y dacitas, son de 45%, 52% y 63% en peso respectivamente y coinciden con los usados para distinguir rocas ultrabásicas, básicas e intermedias (Carmichael et al. 1974). El valor 52% para los basaltos es el aceptado en la clasificación QAFP de Streckeisen.
- Algunos límites se determinan, localizando su contraparte en la clasificación QAFP.

La clasificación TAS debe ser usada con las siguientes restricciones:

- La clasificación es puramente descriptiva, no hay implicancias genéticas.
- Es independiente de la asociación de campo, excepto que la roca sea volcánica.
- La relación FeO a Fe_2O_3 se toma del análisis. Si no se ha determinado, un estado de oxidación estándar se calcula siguiendo el método de Le Maitre (1976).
- La clasificación no es aplicable para rocas que han sufrido enriquecimiento cristalino o han sufrido metasomatismo.

Las rocas que tienen contenidos de vidrio mensurables, se clasifican como: Vitrífero (0% - 20%), Vítrico (20% - 50%), Vítreo (50% - 80%) y Obsidiana o taquilita (80% - 100%).

Cabe señalar que el diagrama TAS excluye importantes componentes de las rocas, como MgO, CaO y TiO₂, lo que puede dar lugar a que las rocas con composiciones particulares no puedan distinguirse en el diagrama de otras más comunes como basaltos y andesitas (Castro, 2015).

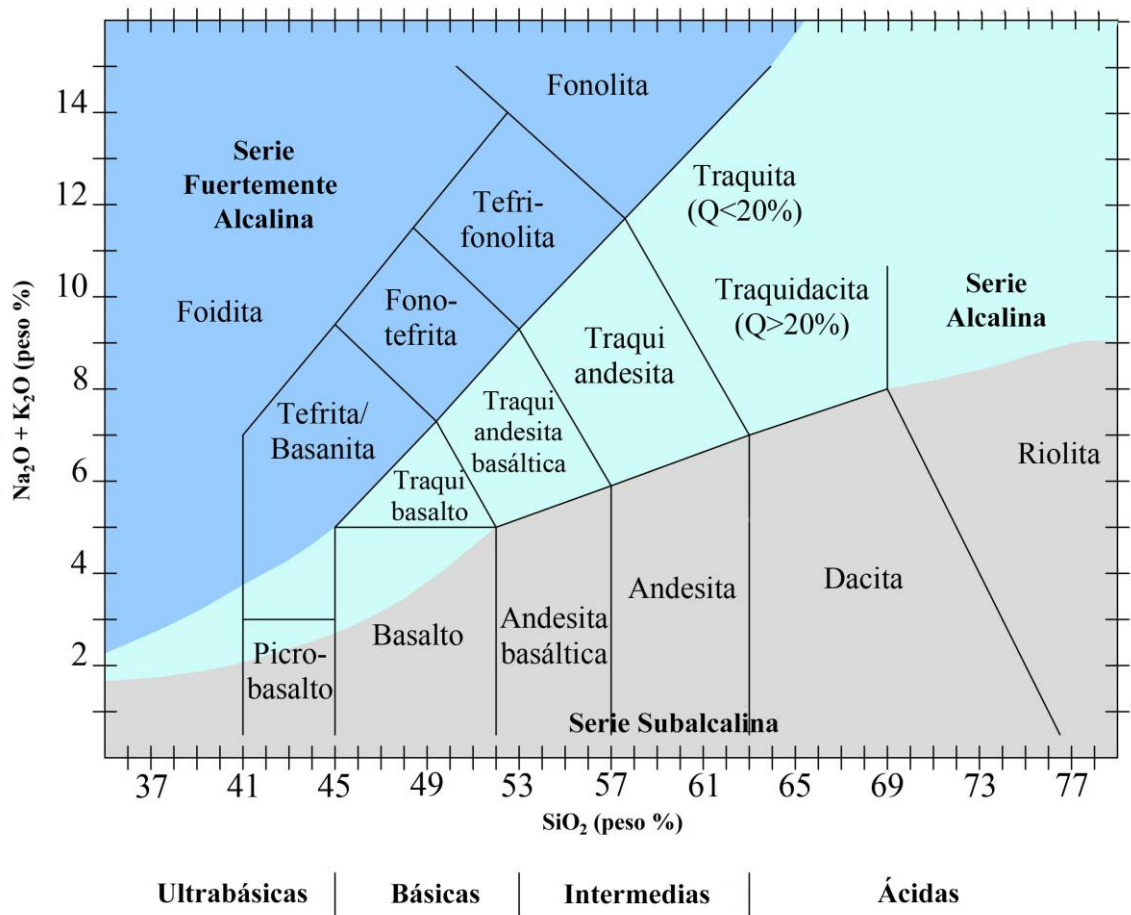


Figura 2. Clasificación TAS (Total Alkali Silica) para la clasificación de rocas volcánicas (Le Maitre, 2002).

2.2.3.3. Clasificación de Rocas Volcánicas Piroclásticas

Los piroclastos (del griego pyrós = fuego; clastos = roto, fragmento) son porciones de tamaño variable de rocas volcánicas y/o cristales, y/o vidrio; resultantes de la fragmentación del magma o de las rocas de la pared del conducto en erupciones volcánicas explosivas. Los clastos de roca volcánica procedentes de la fragmentación de rocas antiguas que son atravesadas por los conductos de ascenso del magma o del flujo piroclástico se denominan litoclastos.

Las rocas y depósitos piroclásticos están formados por la aglomeración de piroclastos como consecuencia directa de la actividad eruptiva. No todos los fragmentos de rocas volcánicas son piroclastos ni todos los agregados de los fragmentos de rocas volcánicas son depósitos piroclásticos:

- Respecto a la primera restricción, no se consideran piroclastos los fragmentos de magma producidos como consecuencia de la autobrechificación de la lava durante el flujo superficial y consolidación, ni tampoco los fragmentos producidos por brechificación hidroclástica de la lava (hialoclastitas).
- En cuanto a la segunda restricción, no se considera depósito ni roca piroclástica si hubo un transporte en un medio sedimentario posterior a la formación del depósito eruptivo. En este caso se denominan epiclastos a los fragmentos y depósitos y/o rocas epiclásticas. Las rocas epiclásticas se clasifican como rocas sedimentarias.

A. Bombas Volcánicas y Bloques

Son fragmentos de diámetro mayor de 64 mm. Las bombas tienen formas redondeadas ya que estaban sin consolidar (fragmentos de magma) durante el transporte aéreo en la columna eruptiva, donde adquieren la forma redondeada. Los bloques tienen formas angulosas indicando que eran rocas sólidas durante el transporte aéreo.

B. Lapilli

Son piroclastos de diámetro comprendido entre 2 mm y 64 mm.

C. Ceniza

Piroclastos de tamaño inferior a 2 mm. El rango de tamaños entre 2 mm y 62 micras (1/16 mm) se denomina ceniza gruesa. Los tamaños menores a 62 micras se denominan ceniza fina o polvo. Por tanto, en vulcanología se denomina ceniza a un material que tiene el grano de arena en sedimentos detríticos, mientras que el concepto general de ceniza es el de una materia muy fina como polvo. El polvo, o ceniza fina, sería equivalente al limo y limo arcilloso.

Tabla 1. Clasificación de rocas piroclásticas y rocas mixtas con más del 25% de piroclastos.

Diámetro de Clastos (mm)	Nombre del Piroclásto	Depósitos y Rocas Piroclásticas (> 75% Material Piroclástico)		Rocas Mixtas Piroclásticas - epiclásticas (25% a 75% de Piroclastos)
		No Consolidado (Tefra)	Consolidado (Roca Piroclástica)	
> 64	Bombas y bloques	Aglomerado, tefra de bombas o bloques	Aglomerado, brecha piroclástica	Aglomerado tobáceo, brecha tobácea
64 - 2	Lapilli	Capa de lapilli, tefra de lapilli	Toba de lapilli, lapillita	
2 - 1/16	Ceniza gruesa	Ceniza gruesa	Toba de ceniza gruesa	Arenisca tobácea
< 1/16	Ceniza fina (polvo)	Ceniza fina, polvo	Toba de ceniza fina, toba de polvo	1/16 - 1/256 Limolita tobácea, < 1/256 Lutita tobácea

Fuente: Castro (2015).

Para que un depósito o roca sea considerado piroclástico debe tener al menos un 75% de piroclastos. En depósitos o rocas mixtos con una proporción de piroclastos comprendida entre 25% y 75% de total de la roca o sedimento se usa la terminología de sedimentos y rocas sedimentarias agregando el modificador “tobáceo”. Para depósitos o rocas sedimentarias con menos del 25% de material piroclástico se usa la terminología normal de rocas sedimentarias.

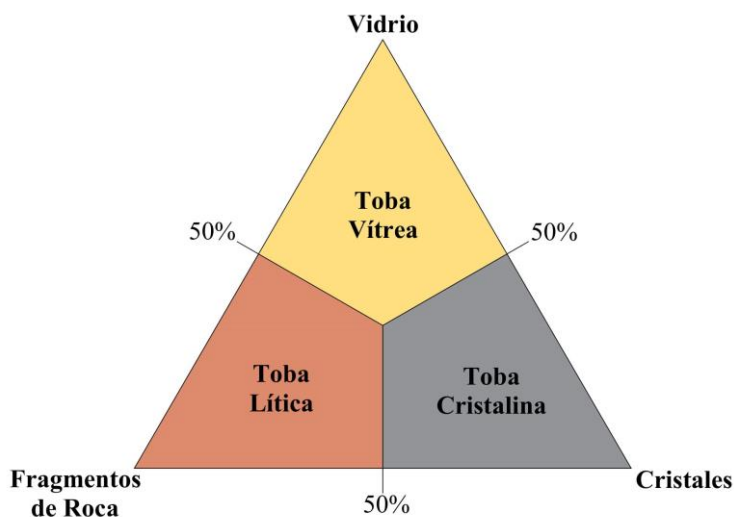


Figura 3. Clasificación triangular de las rocas piroclásticas según el material del cual está compuesto (Schmid, 1981).

Las rocas piroclásticas comúnmente se clasifican por el tipo de material fragmentado (colectivamente llamado piroclástico) o utilizando el tamaño de los fragmentos (que se agrega al nombre químico o modal). Si el volumen porcentual de vidrio, fragmentos de cristales y fragmentos líticos es determinado, se utiliza para la clasificación los diagramas triangulares. El

diagrama modificado de Fisher (1966), es el que más se ajusta a la clasificación granulométrica, distinguiendo tres elementos básicos: Ceniza (< 2mm), Lapilli (2 – 64 mm) y Bloques y Bombas (> 64mm).

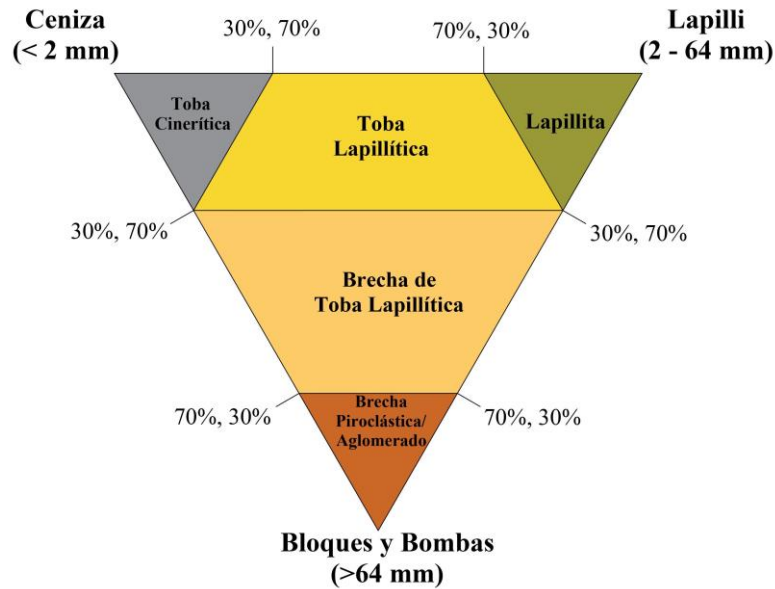


Figura 4. Clasificación triangular de las rocas piroclásticas según la granulometría de sus componentes, modificado de (Fisher, 1966).

2.2.4. Formación de las Rocas Volcánicas

Las rocas volcánicas o también denominadas ígneas extrusivas, se forman en la superficie de la corteza como resultado del derretimiento parcial de las rocas dentro del manto y la corteza. Estas se enfrían y solidifican más rápidamente que las rocas ígneas intrusivas. Se forman por el enfriamiento del magma fundido en la superficie de la tierra. El magma, que sale a la superficie a través de fisuras o erupciones volcánicas, se solidifica a un ritmo más rápido. Por lo tanto, estas rocas son lisas, cristalinas y de grano fino.

2.2.4.1. Proceso Magmático para la Generación de Rocas Volcánicas

El comportamiento de la lava, depende de su viscosidad, que está determinada por la temperatura, la composición, el contenido de cristal y la cantidad de sílice que contiene. Entre las características que tienen los magmas están:

- El magma de alta temperatura en la mayoría de veces tiene una composición basáltica, y se comporta de manera similar al aceite espeso y, a medida que se enfría, se asemeja a la melaza . Los flujos largos y delgados de basalto con superficies pahoehoe son comunes.
- El magma de composición intermedia, como los que forman la andesita , tiende a formar conos de ceniza, toba y lava entremezclados , y puede tener una viscosidad similar a la melaza fría y espesa o incluso al caucho cuando está en erupción.
- Los magma félsicos, como los que forman la riolita , por lo general, entran en erupción a baja temperatura y es hasta 10,000 veces más viscosa que el basalto. Los volcanes con magma riolítico comúnmente erupcionan explosivamente, y los flujos de lava riolítica son típicamente de extensión limitada y tienen márgenes pronunciados porque el magma es muy viscoso. Los magmas félsicos e intermedios que entran en erupción a menudo lo hacen violentamente, con explosiones impulsadas por la liberación de gases disueltos, generalmente vapor de agua, pero también dióxido de carbono.

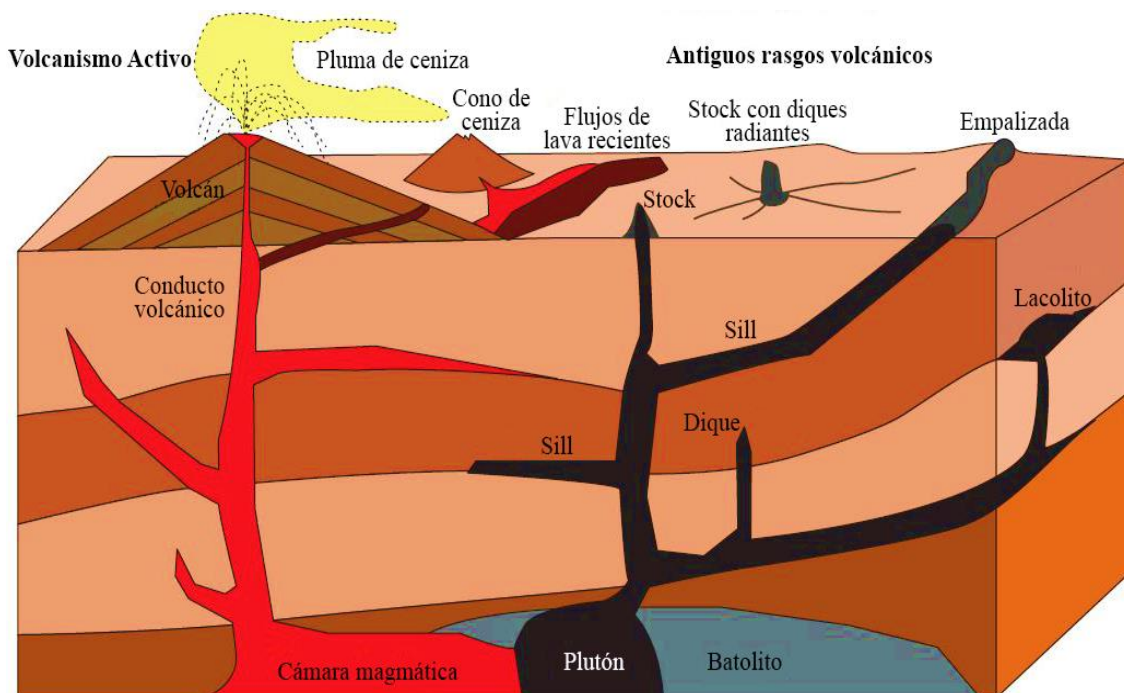


Figura 5. Procesos para la generación de eventos volcánicos y estructuras ígneas (Wiley & Sons, 2017).

El material piroclástico que se expelle a la superficie de forma explosiva se llama tefra e incluye toba , aglomerado e ignimbrita . La ceniza fina volcánica también entra en erupción y forma depósitos de toba de ceniza, que a menudo pueden cubrir vastas áreas.

2.2.4.2. Actividad Eruptiva

Una de las manifestaciones más evidentes de la dinámica interna de la Tierra es la actividad eruptiva, a veces violenta, otras tranquila. Esta actividad constituye el episodio final del proceso volcánico. La actividad eruptiva es el conjunto de fenómenos relacionados con la salida de materiales sólidos, líquidos y/o gaseosos a la superficie terrestre desde un centro emisor.

Una erupción se inicia cuando la presión ejercida por el magma dentro del conducto volcánico o en una cámara magmática supera la presión litostática. El aumento de la presión magmática se produce básicamente por dos causas, que pueden actuar de forma conjunta o aislada:

- La inyección de nuevo magma, procedente de zonas más profundas de la Tierra. Este es el origen de la inmensa mayoría de las erupciones volcánicas.
- La sobresaturación en gases (volátiles) de algunos magmas al subir a la superficie.

En magmas básicos, pobres en volátiles, el incremento de presión suele deberse a la inyección continuada de nuevo magma, mientras que en magmas ácidos a menudo intervienen las dos causas. Así, en depósitos superficiales de magmas ácidos, sobresaturados de gases, la llegada de nuevo magma puede acabar desencadenando la erupción. En función de todos estos factores podemos diferenciar dos tipos principales de actividad eruptiva: la efusiva y la explosiva (Macías, 2017), que se detallan a continuación:

A. Actividad Efusiva

Un magma con bajo contenido en volátiles da lugar a manifestaciones de tipo efusivo. La presión que ejercen las burbujas de gas en el interior del conducto volcánico no es lo suficientemente intensa como para fragmentar el magma y expulsarlo al aire. Este tipo de actividad se puede generar principalmente por:

- Emisión de magmas básicos y ultrabásicos, originalmente pobres en gases.
- Desgasificación de magmas ácidos por el escape gradual de los volátiles a través de fumarolas o erupciones de vapor.

- Actividad eruptiva explosiva previa, donde se produce la pérdida de la mayor parte de los gases del magma dentro del conducto volcánico.

B. Actividad Explosiva

Las manifestaciones volcánicas explosivas están asociadas a magmas con un alto contenido en volátiles. En las explosiones magmáticas, los gases se concentran en burbujas y se expanden dentro del tramo final del conducto volcánico. Estas burbujas interactúan entre sí y aíslan fragmentos de magma. El escape repentino de los gases al momento de llegar a la superficie provoca explosiones más o menos violentas que expulsan los fragmentos.

A partir de los volcanes activos y de las grandes erupciones acaecidas en los últimos siglos se han definido unos tipos básicos de actividad eruptiva explosiva magmática según el grado de explosividad: estromboliana, vulcaniana y pliniana. La actividad explosiva hidromagmática también puede tener diferentes grados de intensidad.

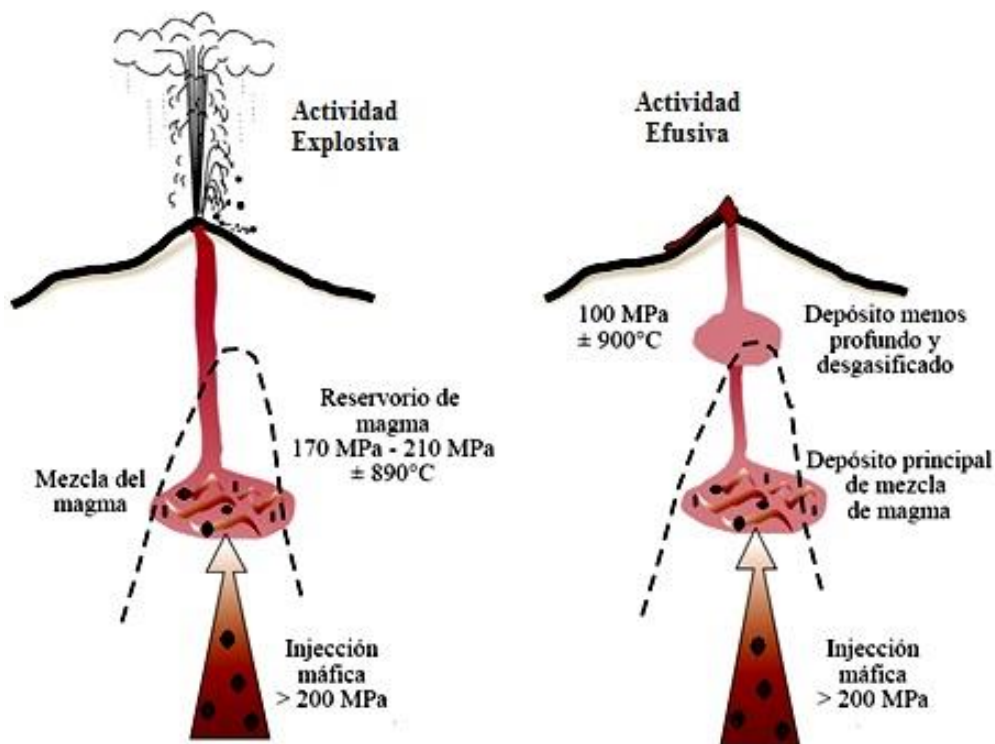


Figura 6. Modelo esquemático de la actividad volcánica explosiva y efusiva (Macías, 2017).

2.2.5. Productos Volcánicos

El estudio de las rocas volcánicas aporta información sobre cuáles fueron los mecanismos de transporte y depositación que las originaron y, por lo tanto, del tipo de actividad eruptiva del volcán. Los materiales volcánicos son todos aquellos productos sólidos, líquidos y gaseosos expulsados durante una erupción. Se puede diferenciar entre los volátiles, gases que se separan del magma, y los que se depositan, los cuales se clasifican en masivos y fragmentarios.

2.2.5.1. Materiales Masivos

Son cuerpos compactos de roca de composición homogénea, resultado del enfriamiento de flujos de lava que se originan a raíz de una actividad eruptiva efusiva. Estos cuerpos de roca pueden presentar formas diversas según la viscosidad inicial del magma. La variación de la temperatura en su emplazamiento, el volumen de material emitido y, por último, las características del terreno donde se emplaza (pendiente, irregularidades, humedad, entre otras variables) también influyen en su forma final, los materiales más comunes serán detallados a continuación (Echevarría, 2002):

A. Coladas de Lava

Las características que nos permiten diferenciar las coladas de lava son su litología, su morfología y su estructura interna. Estos parámetros variarán en función de la composición del líquido magmático, la velocidad de enfriamiento del flujo y las características del medio donde se emplaza. Según el aspecto de su superficie, las coladas de lava se clasifican en dos grandes grupos: **lisas** y **rugosas**. La estructura interna puede presentarse de forma masiva y compacta o fracturada, por una diaclasa conocida como disyunción.

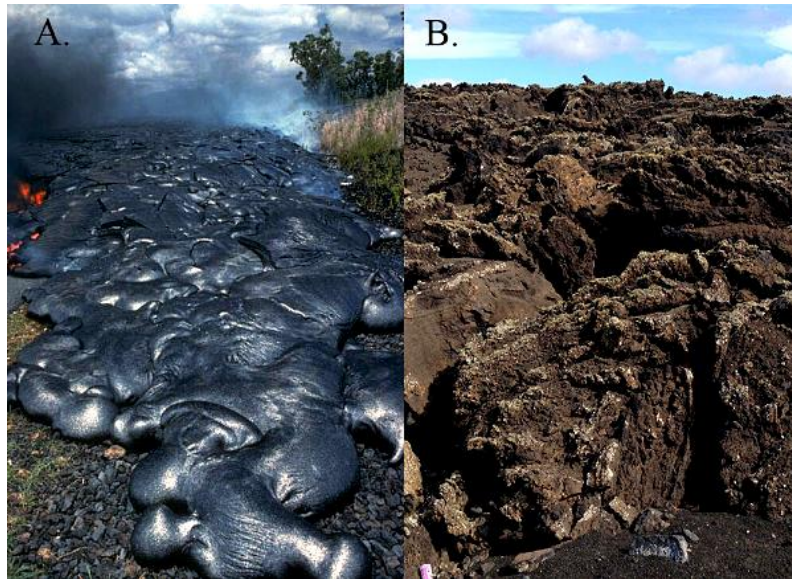


Figura 7. Coladas de lava lisa y rugosa. A. Colada de lava lisa tipo pahoehoe avanzando a través de una carretera en la zona Este del Volcán Kilauea (Recuperado de Griggs, 1990). B. Colada de lava rugosa (superficie irregular) de tipo Malpais en Lanzarote (Recuperado de Universidad Complutense de Madrid, 2010).

Las lavas experimentan una fuerte contracción al enfriarse, ya que el volumen que ocupan una vez solidificadas es menor que el que ocupaban en estado líquido. Esto provoca el desarrollo, en el interior del cuerpo de roca masivo, de diversos sistemas de fracturas que forman los hábitos de retracción, también conocidos como disyunciones. Los principales tipos de disyunción son: **columnar** o **lenticular**.

La **disyunción lenticular** o en lajas se produce cuando la corriente de lava aún está en movimiento, por ejemplo, por realimentación del flujo desde el centro emisor, y las burbujas de gas se disponen en planos paralelos a la dirección de avance. A medida que se enfría la lava, esos planos facilitan la formación de una fracturación horizontal que es más notoria en el centro de la colada de lava.

La **disyunción columnar** se da cuando la corriente de lava está en reposo. La diferencia de temperatura entre el centro, aún muy caliente, y el techo y la base de la colada, ya enfriados, permite la formación de celdas de convección en su interior. Estas celdas se disponen perpendicularmente a la base de la lava y desarrollan una fracturación vertical que individualiza prismas columnares hexagonales o pentagonales.

Aunque también se habla de **disyunción esferoidal**, esta estructura interna que a menudo presentan las zonas más externas de las coladas de lava no se puede considerar un hábito de retracción. Esta escamación en forma de bolas de las lavas es producto de la meteorización de la roca volcánica, como consecuencia de una lenta infiltración de humedad a través de las fisuras de retracción ya existentes. Otro tipo de alteración frecuente es el moteado blanco, producto de la meteorización de algunos minerales de la roca.

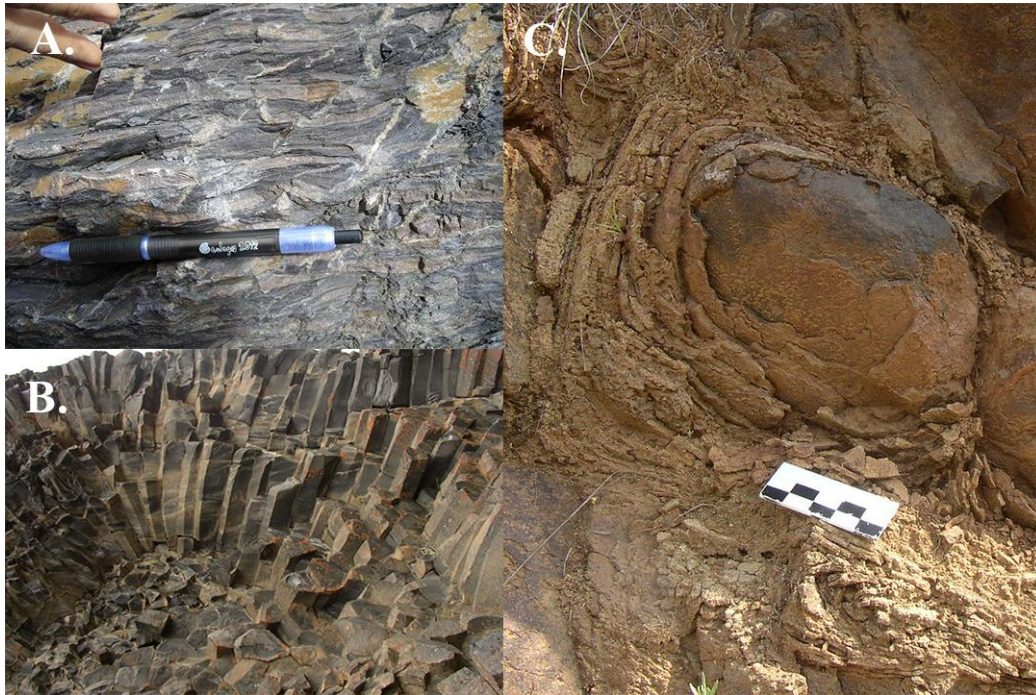


Figura 8. Tipos más comunes de disyunción en coladas de lava. A. Disyunción lenticular en roca de composición andesítica en Zaragoza (Franco, 2012). B. Disyunción columnar a partir de lavas basálticas en Islandia (Flickr, 2020). C. Disyunción esferoidal a partir de coladas de lava en Andalucía (Flickr, 2020).

B. Tossols

Cuando el flujo de lava se emplaza sobre un lago o una superficie húmeda, el agua se vaporiza y una gran cantidad de gas se incorpora al flujo. Este gas, en forma de burbujas, asciende por el interior de la colada hasta la parte más externa, a menudo semi-consolidada por su enfriamiento más rápido. La acumulación de burbujas en esta zona produce una presión que puede deformar y acabar rompiendo la superficie de la colada. El resultado son pequeños montículos que pueden llegar a medir unas decenas de metros, conocidos como blísteres o hornitos.

2.2.5.2. Materiales Fragmentarios

Son acumulaciones de clastos generados principalmente por la actividad eruptiva de tipo explosivo. Las burbujas de gas individualizan porciones de magma, que son expulsadas al exterior de forma más o menos violenta. La depositación de todos estos materiales da lugar a los depósitos fragmentarios, también denominados piroclásticos. Muchas veces la actividad eruptiva explosiva es tan violenta que su observación directa resulta difícil. Por este motivo, el estudio de los depósitos piroclásticos emitidos es muy importante para entender el funcionamiento de este tipo de actividad (Martínez, 2012).

A. Piroclastos

El vocablo piroclasto deriva del griego “clasto” y “piros”, es decir, ‘piedra de fuego’. Cada uno de los fragmentos, grande o pequeño, de una naturaleza o de otra, que forma parte de un depósito piroclástico tiene unas características propias que deben tenerse en cuenta.

Las explosiones volcánicas generan una amplia variedad de medidas de fragmentos. Dentro de esta diversidad granulométrica, se diferencia tres grupos principales de piroclastos: las cenizas, el lapilli y los bloques. Las cenizas tienen diámetros inferiores a 2 mm; el lapilli, localmente conocido como greda o tosquiya, mide entre 2 y 64 mm; por último, los fragmentos de dimensiones superiores a 64 mm son los bloques.

Entre los materiales fragmentarios se pueden distinguir dos tipos de clastos según su naturaleza: juveniles y líticos. Algunos depósitos piroclásticos están formados exclusivamente por un tipo de fragmentos, mientras que en otros se combinan los dos (Martínez, 2012):

- Fragmentos juveniles: También llamados esenciales, provienen directamente de la fractura del magma que llega a la superficie.
- Fragmentos líticos: Son fragmentos de las rocas que formaban el conducto volcánico, arrancados por las explosiones durante la erupción. Los clastos líticos pueden ser accesorios, cuando derivan de la fractura de rocas volcánicas emitidas en anteriores erupciones, o accidentales, cuando son fragmentos de rocas sedimentarias, metamórficas o ígneas del sustrato prevolcánico.

B. Bombas Volcánicas

Algunos fragmentos de magma, de medida de lapilli o bloque, no están del todo fríos al ser expulsados y, durante su trayectoria, adoptan morfologías redondeadas o fusiformes. A menudo presentan fisuras superficiales del tipo «corteza de pan», que se producen por la expansión de las burbujas de gas en el interior de la bomba, en estado semifluido a causa de la temperatura, mientras que la capa externa ya se ha enfriado y se rompe frágilmente.

C. Escorias

Son piroclastos juveniles, de medida de lapilli o superior, con morfologías irregulares, muy vesiculares y de composición basáltica o basáltico-andesítica. En los depósitos próximos al centro emisor se pueden presentar semi-soldados, ya que no están del todo solidificados cuando se emplazan.

D. Piedra Pómez

Fragmentos juveniles, generalmente de medida de lapilli, de composición ácida y de colores claros. Son extraordinariamente vesiculares y su densidad no supera 1 g/cm^3 , por lo que flotan en el agua.

2.2.6. Depósitos Piroclásticos

Los materiales fragmentarios forman acumulaciones muy diversas según los mecanismos de formación, transporte y depositación. Sin embargo, en función de su génesis, se pueden diferenciar tres tipos básicos de depósitos piroclásticos: de caída, de oleada piroclástica y de colada piroclástica (Martínez, 2012).

2.2.6.1. Depósitos Piroclásticos de Caída

Se forman cuando los fragmentos expulsados en la erupción caen libremente, ya sea en sentido vertical, después de formar parte de una columna eruptiva, o bien describiendo una trayectoria balística desde el cráter del volcán. Los depósitos de caída pueden presentar una gradación de medida de los clastos y mostrar un bandeo paralelo y lateralmente continuo. El grosor del

depósito y la medida de los fragmentos disminuyen progresivamente a medida que nos alejamos del centro emisor (Martínez, 2012).

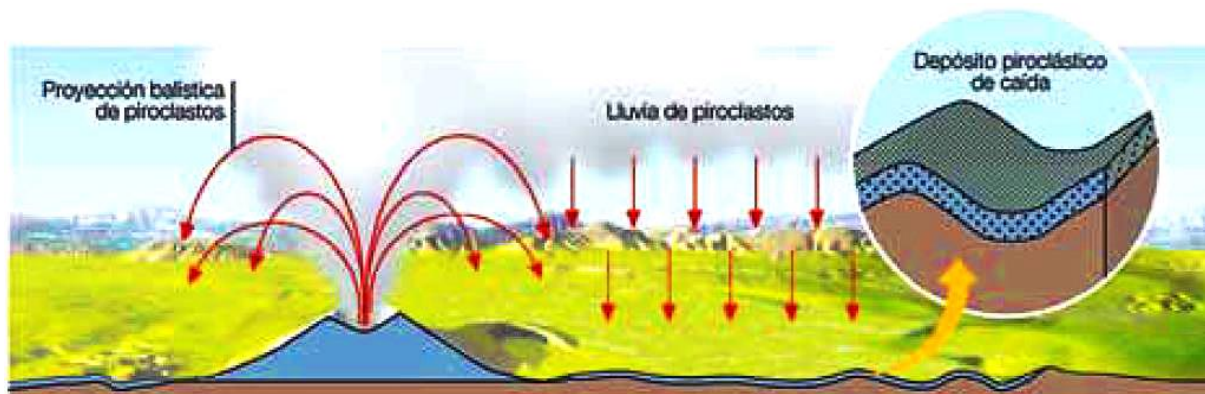


Figura 9. Proyección balística de piroclastos y emplazamiento de un depósito de caída (Martínez, 2012).

Los depósitos piroclásticos de caída tienen ciertas variantes, esto dependerá según el tipo de actividad volcánica, así se tiene:

A. Depósitos de Caída Estrombolianos

La baja energía de la erupción y la densidad elevada de los fragmentos hacen que los materiales expulsados no alcancen grandes alturas y caigan directamente siguiendo trayectorias balísticas. Este mecanismo es característico de la actividad estromboliana, donde los fragmentos se acumulan alrededor del centro eruptivo y forman el edificio volcánico.

B. Depósitos Piroclásticos Plinianos

Cuando la densidad de los fragmentos es baja, estos suben hasta alturas considerables formando las características columnas eruptivas plinianas. Luego los materiales caen en forma de lluvia de piroclastos. Los vientos dominantes pueden desplazar lateralmente la nube de materiales que forman la columna y condicionar el emplazamiento de los piroclastos. Estos depósitos cubren la topografía uniformemente, ya que se acumulan tanto en las depresiones como en las zonas altas.

C. Depósitos de Caída Hidrovolcánicos

En las violentas explosiones provocadas por la evaporación instantánea del agua, una parte de los fragmentos expulsados también sigue trayectorias balísticas. En este caso, a diferencia del estilo estromboliano, el componente horizontal es mucho más importante que el vertical. Las acumulaciones resultantes, con una presencia destacada de fragmentos líticos, también se conocen como brechas piroclásticas.

2.2.6.2. Depósitos de Oleada Piroclástica

Tienen su origen en flujos gaseosos turbulentos que transportan lateralmente y a ras de tierra pequeñas proporciones de piroclastos a velocidades supersónicas. La formación de oleadas piroclásticas está asociada principalmente (Martínez, 2012):

- Al colapso de la parte externa de las columnas eruptivas, mucho más diluida y fría que la central.
- A las explosiones anulares rasantes que se producen directamente desde la boca de emisión y se desplazan radialmente.

Estos flujos son muy energéticos y pueden remontar las pendientes topográficas. Por consiguiente, los depósitos producidos por las oleadas piroclásticas cubren la topografía, aunque la mayor acumulación de material se da en el fondo de los valles. Los depósitos se caracterizan por presentar estructuras sedimentarias unidireccionales y por una buena clasificación granulométrica.



Figura 10. Emisión y emplazamiento de una oleada piroclástica (Martínez, 2012).

2.2.6.3. Depósitos de Colada Piroclástica

Se depositan a partir de flujos gaseosos laminares y ricos en piroclastos muy calientes que se desplazan a gran velocidad y se encajan en las zonas deprimidas, controlados por la gravedad. Suelen originarse por el colapso, total o parcial, de una columna eruptiva vertical y durante su emplazamiento van acompañados de una gran nube de cenizas (Martínez, 2012).

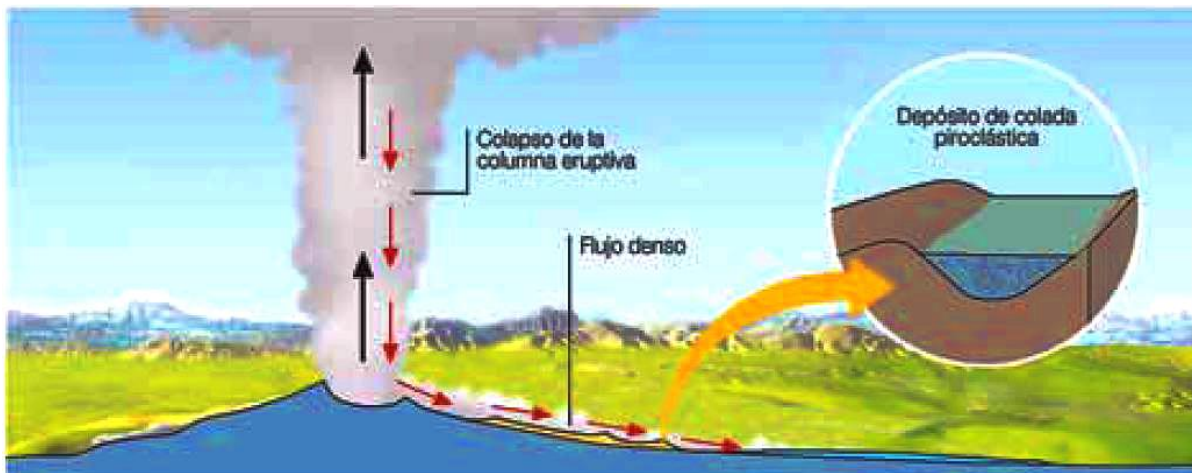


Figura 11. Colapso de la columna eruptiva y posterior depositación de una colada piroclástica (Martínez, 2012).

2.2.6.4. Lahares

Los Lahares son flujos acuosos que transporta una gran masa de materiales volcánicos. Cuando grandes cantidades de nieve cubren los volcanes o sus cráteres están ocupados por lagos, una erupción, por pequeña que sea, puede provocar crecida muy importante de lodo y rocas volcánicas (Martínez, 2012).

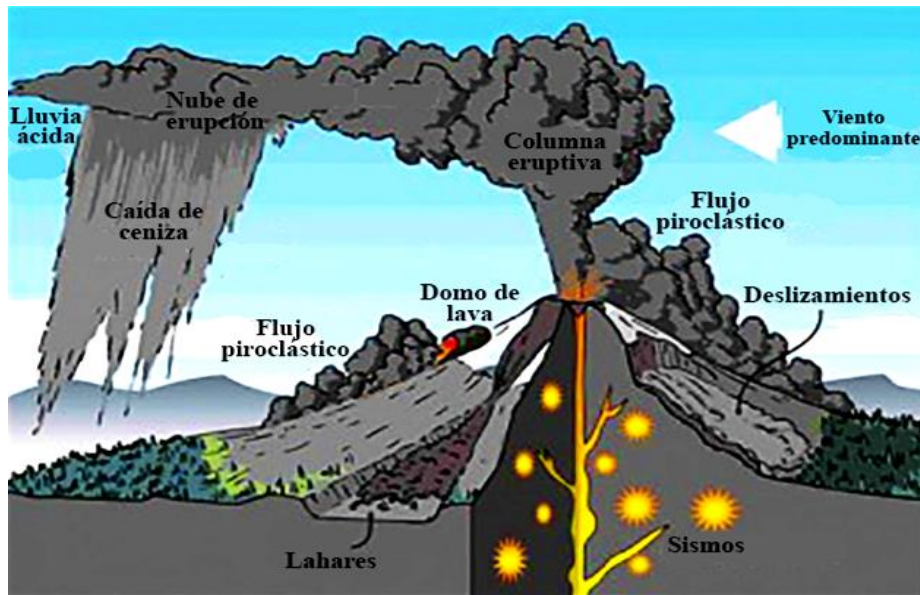


Figura 12. Productos volcánicos posterior a una erupción, en la que se destaca la formación de Flujos piroclásticos, domos de lava y los lahares (Lilly, 2010).

2.2.7. Propiedades de las Rocas Volcánicas

El magma expulsado hasta la superficie de la tierra se enfría rápidamente y su viscosidad tiende a aumentar en forma correspondiente debido a la pérdida de agua y gas. Tales condiciones favorecen la formación no solamente de vidrio, sino de ciertos minerales característicos de las rocas volcánicas: Tridimita, cristobalita, feldespatos potásico, sanidina, leucita y las plagioclasas; por consiguiente, también existe variabilidad en sus propiedades físicas y químicas de las rocas volcánicas (Huang, 1991).

2.2.7.1. Tipo de Matriz

El estudio textural de las rocas volcánicas tiene gran interés por varias razones: Primero, por ser uno de los pilares básicos de la descripción y de la clasificación; segundo, por la información valiosa que aporta en conocimiento de los procesos eruptivos y las condiciones pre-eruptivas de las cámaras magmáticas, e incluso de la región fuente en la que se han producido los magmas. Los rasgos texturales básicos, que pueden considerarse comunes a la mayoría de las rocas volcánicas son:

- Presencia de una matriz afanítica, micro o criptocristalina.
- Presencia de vidrio que puede ser local o generalizada en toda la matriz.

- Presencia de macrocristales que pueden ser o no fenocristales.

Las características de la matriz son una parte importante de la descripción textural ya que es una guía para llegar a la clasificación de las rocas, así se pueden distinguir los siguientes tipos de matriz (Castro, 2015):

A. Matriz Vítreo

La matriz completamente vítrea, con ausencia de microlitos, se da en rocas volcánicas que han experimentado un corto o rápido transporte y una final consolidación en condiciones subaéreas o subacuáticas. Por ejemplo, los domos riolíticos de las etapas tardías de la formación de grandes calderas suelen ser **vítreos o vitrofídicos** (presencia de fenocristales en matriz vítrea).

B. Matriz Microlítica

Consiste en la disposición de pequeños cristales de tamaño considerablemente inferior al de los macrocristales, que aparecen flotando en una mesostasis de grano aún más fino, normalmente criptocristalino o vítrea. El conjunto de microlitos y la mesostasis que los incluye forma la matriz de roca. Los minerales de los microlitos suelen estar representados en los fenocristales (macrocristales ortomagmáticos), pero no necesariamente.

C. Matriz Félsica

Es la matriz de muchas riolitas y dacitas no vítreas. Está formada por un agregado microcristalino equigranular de cuarzo y feldespatos, con escasos minerales máficos y óxidos. El nombre **félsico** alude a esta composición mineral, propia de las felsitas, el cual es un término de campo utilizado para denominar rocas volcánicas de grano muy fino y de color claro.

D. Matriz Máfica

Se caracteriza por ser un agregado microcristalino de color oscuro, compuesto en su mayoría por minerales máficos y óxidos de Fe y Ti (minerales opacos). Puede además contener microlitos de plagioclasas. Es la matriz característica de los basaltos y andesitas no vítreas.

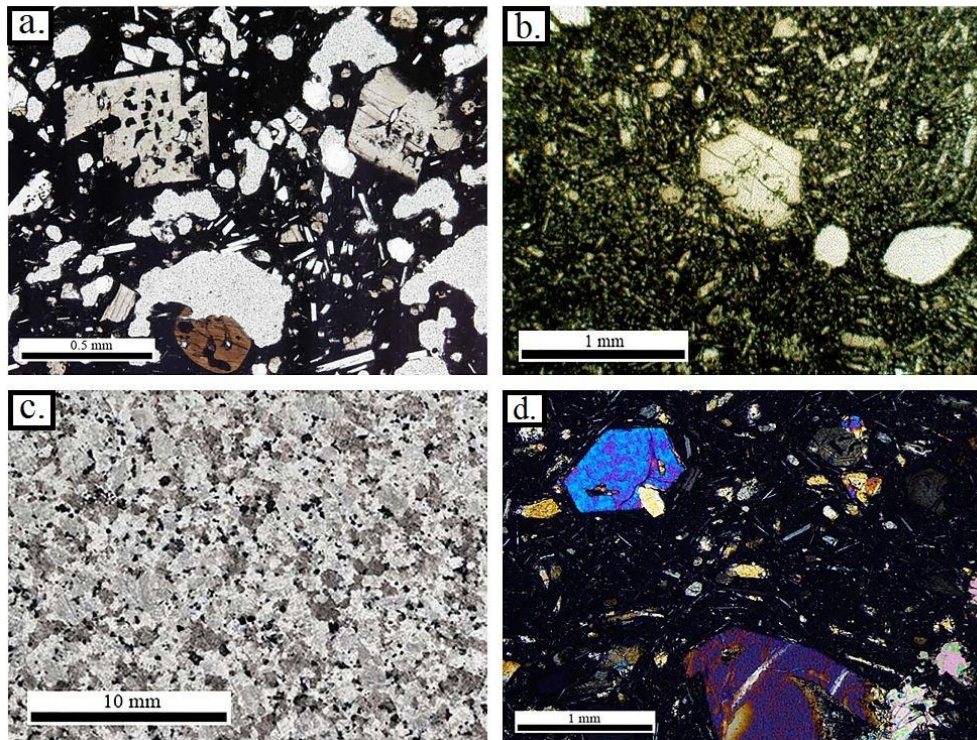


Figura 13. Matrices más comunes de las rocas volcánicas: a. Matriz vítrea englobando cristales de plagioclasa en un basalto. b. Microfenocristal de piroxeno en una matriz microlítica. c. Cristales de cuarzo y feldespatos englobados en una matriz félsica en una roca dacítica. d. Basalto rico en olivinos con nicoles cruzados presentando una típica matriz máfica (González, 2015).

2.2.7.2. Grado de Cristalinidad

Este parámetro se relaciona con la velocidad de enfriamiento del magma. Así, una roca será **holocristalina**, cuando haya tenido suficiente tiempo para alcanzar un desarrollo cristalino completamente; todas las rocas plutónicas lo son, como también pueden serlo las rocas volcánicas.

Una roca **holohialina** tiene una historia de enfriamiento lo suficientemente rápida como para que no se haya formado ningún cristal y una roca en parte cristalina y en parte vítrea, denominada **merocristalina** (hipocristalina, merohialina) tendrá una historia más compleja, con al menos dos etapas de enfriamiento.

Tabla 2. Tipo de cristalinidad según los componentes que albergan las rocas ígneas.

Cristalinidad	Componentes	Porcentaje
Holocristalina	Cristales	+ 90%
Holohialina, Vítreo	Vidrio	+ 90%
Merohialina, Hipocristalina, Merocristalina	Cristales + Vidrio	Variable

Fuente: Universidad Complutense de Madrid (2010).

2.2.7.3. Tamaño de los Cristales

Este parámetro está controlado por la interacción de las siguientes variables principales: Velocidad de enfriamiento del líquido magmático, composición química de los líquidos y existencia y composición de una fase disuelta o “libre”.

Tabla 3. Tamaños de granos según su diámetro mayor para rocas ígneas.

Tipo de Grano	Tamaño de Grano
Grano muy grueso	+ 50 mm
Grano grueso	50 mm - 5 mm
Grano medio	5 mm - 1 mm
Grano fino	1 mm - 0.1 mm
Grano muy fino	0.1 mm - 0.01 mm (100 μ m - 10 μ m)
Vidrio/Submicroscópico	- 0.01 mm (- 10 μ m)

Fuente: Hibbard (1995).

2.2.7.4. Relación de Tamaños

Una roca **equigranular** implica que el diámetro más generalizado de los granos de la misma, está entre los límites de uno de los grupos de tamaños establecidos. Por ejemplo, una roca de grano fino será equigranular si contiene cristales cuyos diámetros permanecen principalmente entre los límites de 0,1 y 1 mm. Si, por el contrario, el rango de los diámetros varía entre apenas por encima de 0,1 hasta cercano a los 5 mm, la roca se describiría como **inequigranular** seriada, porque dos tamaños de granos están involucrados.

2.2.7.5. Forma de los Cristales

Se refiere a la presencia o no de formas geométricas simples y regidas por el grado de simetría de la red cristalina. Se considera que esta forma de los cristales depende de la interacción de cinco principales mecanismos de crecimiento:

- El crecimiento libre, donde los cristales desarrollan en una matriz líquida que no obstaculiza su crecimiento.
- El crecimiento dificultado, en el cual la forma de los minerales está gobernada por las de los cristales vecinos que pueden ser sincrónicos o anteriores.
- Las fracturas mecánicas frías (frágiles) de origen esencialmente tectónico que tienen por efecto fragmentar los minerales.
- Las fracturas mecánicas calientes (dúctiles, plásticas) que provocan distorsiones de la red.

Tabla 4. Forma y relación de los cristales que componen una roca ígnea.

Forma de los Cristales		Relación entre los Cristales	
Euhedrales	Presentan una forma definida y caras fácilmente reconocibles	Panidiomórficos	+ 50% Cristales Eudrales
Subhedrales	Presenta las caras de los cristales parcialmente formadas	Hipidiomórficos	+ 50% Cristales Subhedrales
Anhedrales	Presenta las caras de los cristales no desarrollados	Alotriomórficos	+ 50% Cristales Anhedrales

Fuente: Recuperado de Universidad Complutense de Madrid (2010).

2.2.7.6. Color

Desde el punto de vista del índice de color se utiliza el porcentaje de minerales máficos $M' =$ (M - moscovita, apatito, carbonatos primarios).

Tabla 5. Clasificación por el color de los cristales en las rocas ígneas.

Clasificación por el Color	Poncentaje de Minerales Máficos
Hololeucocrática	0% - 10%
Leucocrática	10% - 35%
Mesocrática	35% - 65%
Melanocrática	65% - 90%
Holomelanocrática	90% - 100%

Fuente: Recuperado de Universidad Complutense de Madrid (2010).

Los fenocristales suelen estar englobados en una matriz vítrea o cristalina con desarrollo de una **textura felsítica**. Esta textura resulta de un alto grado de sobreenfriamiento, donde los cristales son anhedrales y forman un mosaico de grano fino generalmente compuesto por cuarzo y feldespato alcalino.

La **textura esferulítica**, también indica un grado de sobreenfriamiento muy elevado. Las esferulitas son masas radiales formadas por material cristalino que crece rápidamente hacia fuera en todas direcciones, a partir de un foco de nucleación. En las riolitas las esferulitas abiertas están usualmente englobadas por cuarzo de manera **poiquilítica** (y a veces en polimorfos de la sílice).

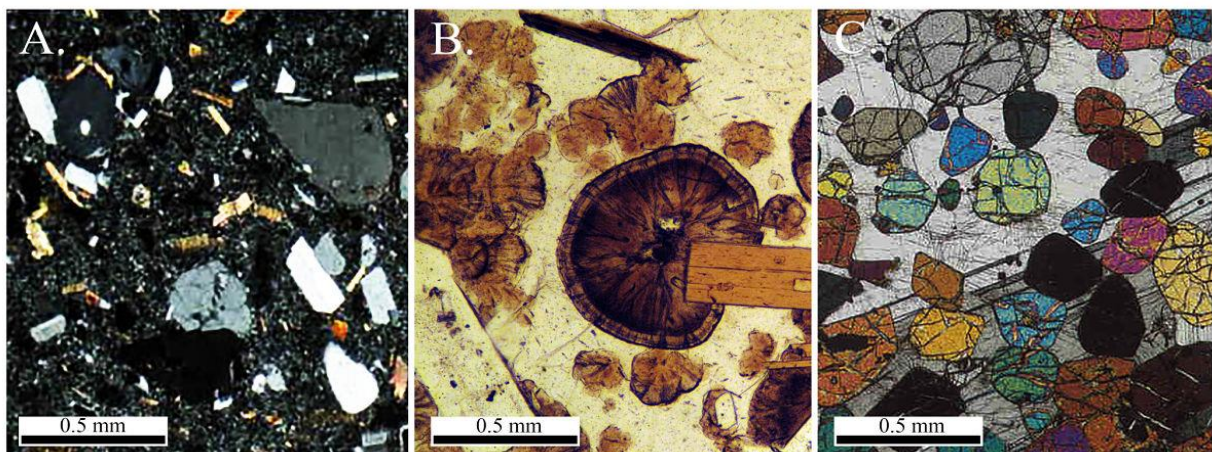


Figura 14. A. Textura Felsítica formada por una matriz criptocristalina en la que se aprecia fenocristales de biotita y cuarzo. B. Textura Esferulítica mostrando pequeños cuerpos esféricos, formada por la desvitrificación del vidrio volcánico. C. Cristales de olivino englobados dentro de un cristal de plagioclasa (Universidad Complutense de Madrid, 2010).

Las rocas volcánicas con menos del 20% de cuarzo, que incluyen a traquitas, latitas, andesitas y basaltos están dominadas por cristales de feldespatos inequidimensionales. La **textura traquítica**, consiste en un agregado de microlitos (cristales incipientes muy pequeños, generalmente de feldespatos) que se disponen paralelos o diferencialmente orientados debido a flujo, en una mesostasis criptocristalina o vítrea.

Entre las texturas intersticiales, se reconocen dos variedades en base al material que ocupa el espacio entre el feldespato. La disposición de pequeños minerales opacos y de piroxenos entre los cristales del feldespato dominante, se denomina **textura intergranular** y es particularmente característica de basaltos. La presencia de vidrio entre los cristales de feldespato da lugar a la **textura intersertal**; el vidrio puede ser fresco o haber sido alterado a palagonita, clorita, analcima o minerales de arcilla o incluso haber sido desvitrificado.

La **textura ofítica** es una variante de textura poiquilítica en que grandes cristales de piroxeno, engloban pequeños cristales elongados de feldespatos dispuestos al azar. En el caso de que los cristales de feldespatos sean de mayor tamaño, de modo que el piroxeno los englobe parcialmente se habla de **textura subofítica**. Si es vidrio lo que rodea al feldespato en lugar de piroxeno se denomina **textura hialofítica**.

Cuando la roca volcánica está compuesta por un mosaico totalmente vítreo, la textura se denomina precisamente **vítrea** y la misma a su vez puede desarrollar un aspecto craquelado, que forma estructuras esferoides, debido a la contracción durante el enfriamiento, que se conoce como **textura perlítica**. La **Textura de Flujo** se desarrolla tanto en rocas vítreas como en rocas de grano fino, se caracteriza por un patrón ondulado o arremolinado en el que minerales prismáticos o laminares están orientados a lo largo de planos de flujo.

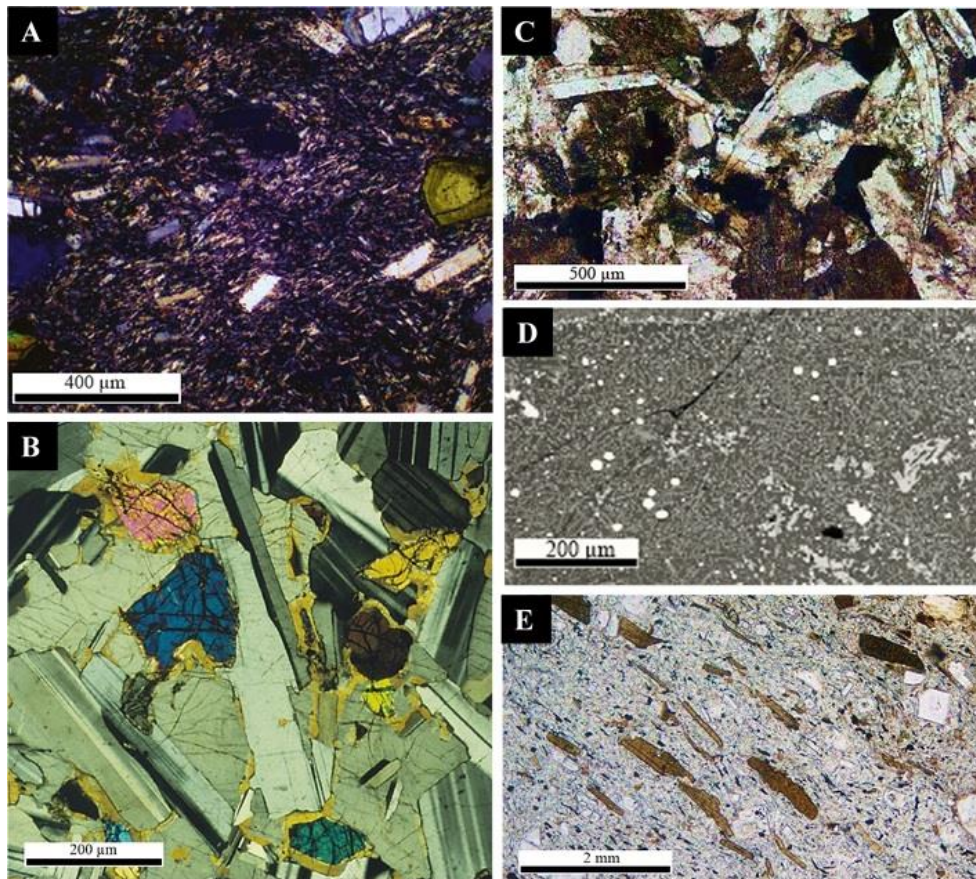


Figura 15. A. Textura traquítica en una traquiandesita de un domo sub-volcánico. Los fenocristales y la pasta traquítica están orientados por el flujo magmático (Llambias, 2008). B. Textura intergranular en la que se muestra cristales paralelos y cruzados de plagioclasa que dejado cavidades en donde ha cristalizado el olivino y piroxenos (UCM, 2010). C. Textura intersertal en la que se ve una red de feldespatos alargados con intersticios rellenos de vidrio (Universidad de Granada, 2006). D. Textura vítrea presente en roca basáltica con magnetita en forma dendrítica y tabular (Renzi, 214). E. Textura de Flujo en una dacita en la que destaca la presencia de abundante vidrio en la matriz (negro con nícoles cruzados), así como cristales de cordierita (Universidad Complutense de Madrid, 2010).

2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

Petrografía. Es la rama de la geología que se ocupa del estudio e investigación de las rocas, en especial en cuanto respecta a su aspecto descriptivo, su composición mineralógica y su estructura, especialmente a escala microscópica, este tipo de análisis revela una serie de características y/o propiedades evaluables en los cristales y la relación que existen entre ellos, lo que va a ayudar a determinar la composición de la roca (Licker, 2003).

Centro Volcánico. Es el lugar por donde se expelen o salen a la superficie los materiales volcánicos en forma de lava o piroclásticos provenientes de las cámaras magmáticas; también

definido como la apertura de un conducto volcánico, en forma cilíndrica, en la superficie terrestre, donde se origina el punto de erupción (Dávila, 2011).

Serie Magmática. Una serie magmática es un conjunto de rocas relacionadas en espacio y tiempo con caracteres químicos y mineralógicos comunes. Tal afinidad química y mineralógica señala que todas esas rocas se han derivado de una fuente común, llámese magma o cualquier otro tipo de fenómeno geológico (Carmichael, 2010).

Secuencia Volcánica. Es una secuencia estratigráfica derivada de la alternancia y combinación de eventos volcánicos y sedimentarios . El material volcánico de estas secuencias puede incluir flujos de lava y tefra o material volcánico reelaborado (Svendsen, 2004).

Piroclasto. Es cualquier fragmento sólido de material volcánico expulsado a través de la columna eruptiva arrojado al aire durante una erupción volcánica. Petrológicamente, los piroclastos son fragmentos de roca ígnea volcánica solidificados en algún momento de la erupción, más frecuentemente durante su recorrido aéreo (Sigurdur, 2010).

Flujo Piroclástico. Nube ardiente o corriente de densidad piroclástica a una mezcla de gases volcánicos calientes, materiales sólidos calientes y aire atrapado, que se mueve a nivel del suelo y resulta de ciertos tipos de erupciones volcánicas (Fossen, 2011).

Textura. Es la relación geométrica que existe entre los componentes de una roca pudiendo ser estos cristales o materiales amorfos como vidrio; de los cuales se destaca sus propiedades de cristalinidad, granularidad, forma de los cristales y arreglo entre estos (Mackenzie, 1982).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

3.1.1. Ubicación Geográfica

El área de investigación se encuentra ubicada al NO de la ciudad de Cajamarca perteneciente al cuadrángulo de Chota carta 14-f-II y 14-f-III de la zona 17S, delimitada por las coordenadas del sistema de Unidad Técnica de Medida (UTM) Datum WGS-84, y delimitada dentro de los siguientes vértices:

Tabla 6. Vértices en coordenadas UTM - WGS 84 que delimitan la Zona de Investigación.

VÉRTICE	NORTE	ESTE
V1	9241180	748100
V2	9241180	753050
V3	9236780	748100
V4	9236780	753050

3.1.2. Ubicación Política

El área de investigación se encuentra ubicada entre los centros poblados de Pabellón Chico Distrito de Llapa y Espina Amarilla Distrito de San Silvestre de Cochán, que pertenecen a la Provincia de San Miguel, Región de Cajamarca.

3.1.3. Accesibilidad

El acceso puede ser por dos rutas distintas a partir de la carretera afirmada PE-3N (Salida a Bambamarca), con un recorrido en una unidad móvil de aproximadamente 2 horas; para mayor especificación se muestra la siguiente tabla:

Tabla 7. Rutas de Accesibilidad a la Zona de Investigación.

ACCESOS	TRAMOS	Km	TRAMOS	Km	TRAMOS	Km	TOTAL (Km)
Acceso 01	Cajamarca	72.20	Empalme	8.90	Cruce Bados de	2.70	83.80
	Empalme		Cruce Bados de		Quilcate		
Acceso 02	Cajamarca	56.20	Cruce Lagunas	6.40	San Silvestre de	2.10	64.70
	Cruce Lagunas		de Alto Perú		Cochán		
	de Alto Perú		Cochán		Investigación		

3.2. PROCEDIMIENTOS

3.2.1. Etapa Preliminar de Gabinete

Esta etapa consiste en la revisión de toda la información existente, para este caso se ha realizado un análisis minucioso sobre la extensión del área de interés, y su accesibilidad apoyándose de las cartas geológicas proporcionadas por el INGEMMET (Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico) así como también de la plataforma virtual GEOCATMIN. Por otra parte, para la obtención de la topografía, se recurrió al Software Global Mapper, y para la Imagen Satelital a través del Freeware SAS Planet.

Además, se consultó investigaciones y trabajos técnicos del Grupo Calipuy realizados en la Región de Cajamarca, con el fin de dar soporte teórico y científico a la investigación.

3.2.2. Etapa de Campo

En esta etapa se emplearon las técnicas e instrumentos para la realización de la toma de datos como ubicación, rumbos, inclinaciones, estructuras y secuencias piroclásticas para el cartografiado geológico el cual determinó los diferentes eventos de la secuencia volcánica Tantachual diferenciándose principalmente por la composición y tamaños de sus agregados piroclásticos.

Así mismo, se realizó el muestreo en las diferentes zonas que conforman el grupo de Secuencias Volcánicas Tantachual, obteniendo así de las muestras de mano, rasgos macroscópicos tales como color, dureza, brillo, modo de ocurrencia entre otras características que ayudaron a dar una pre-clasificación de las rocas.

3.2.3. Etapa de Gabinete

Consiste básicamente en el procesamiento de la información obtenida en campo, elaboración y revisión de nuevos formatos, así también como el análisis de laboratorio (fotomicrografías) que ayuden a dar una correcta y certera clasificación de las rocas. Con lo que respecta al cartografiado este ha sido plasmado en planos los cuales fueron procesados en el Software ArcGIS y para la base de datos el Software Excel.



Figura 16. Esquema de la Metodología de Trabajo de la Investigación.

3.3. METODOLOGÍA

3.3.1. Tipo, Nivel, Diseño y Método de la Investigación

El tipo de investigación fue descriptiva, porque implica observar y describir las características petrológicas; según el nivel es explicativa, porque busca explicar los procesos de formación de las secuencias volcánicas; según el diseño es no experimental-transversal, porque implica la recolección de datos en determinado tiempo, y por último el método de investigación es mixto (teórico-práctico) ya que está basada en conceptos y teorías para luego aplicarlas en campo.

Tabla 8. Tipo, Nivel, Diseño y Método de la Investigación.

TIPO DE LA INVESTIGACIÓN	Descriptiva
NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN	Explicativa
DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	No Experimental
MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN	Mixta

Fuente: Modificado de Supo (2015).

3.3.2. Población de Estudio

La población de estudio es la Secuencia Volcánica Tantachual entre los centros poblados de Pabellón Chico y Espina Amarilla, en un área de 19 km².

3.3.3. Muestra

Litología, estructura, textura, mineralogía y modo de ocurrencia.

3.3.4. Unidad de Análisis

Características petrológicas y mineralógicas de las rocas volcánicas que conforman la Secuencia Volcánica Tantachual.

3.4. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES

En la investigación se identificó las siguientes variables: Variable dependiente características petrológicas y como variables independientes litología, estructura, textura, mineralogía, y modo de ocurrencia; para mejor entendimiento se presentan las variables en la siguiente tabla:

Tabla 9. Identificación de variables Independientes y Dependientes de la Investigación.

VARIABLES INDEPENDIENTES	VARIABLES DEPENDIENTES
Litología	Características Petroológicas
Textura	
Estructura	
Mineralogía	
Modo de Ocurrencia	

3.5. TÉCNICAS

La principal técnica que se aplicó, es la del muestreo en campo utilizando el martillo de geólogo, teniendo el mayor cuidado con las muestras y contramuestras obtenidas, evitando su contaminación; estas luego pasaron a un análisis fisicoquímico donde se utilizó la lupa de aumento 30x, rayador imantado y en algunas muestras el microscopio petrográfico. Además, los datos obtenidos se llenaron en formatos de clasificación de rocas volcánicas (Clasificación de Streckeisen 1979, Diagrama TAS) y de rocas piroclásticas (Clasificación de Schmid 1981 y la clasificación granulométrica de Fisher 1966) para luego procesarlos en el Excel.

3.6. EQUIPOS E INSTRUMENTOS

3.6.1. Equipos

Los equipos utilizados durante el desarrollo de la investigación y sobre todo en la etapa de campo son los siguientes:

- **Brújula Brunton:** Utilizada para orientarnos en el espacio y medir azimut e inclinaciones de las Facies Volcánicas.
- **Cámara Fotográfica de Alta Resolución (Nikon Coolpix-20 Mpx):** Para capturar en forma virtual la realidad en que se encuentra la roca y su estructura de esta.
- **Flexómetro:** Para medir el espesor de las unidades de las Facies.
- **GPS (Sistema de Posicionamiento Global) Garmin:** Para la ubicación espacial de los puntos de muestreo; a través de sus coordenadas UTM, (Unidad Técnica de Medida).

- **Lupa 30x (Iwamoto):** Para reconocer los componentes de las rocas muestreadas y para medir de forma aproximada el tamaño de grano textural, con la cual también se podrá ver algunas impurezas que presenta la roca.
- **Picota de Geólogo:** Para obtener muestras frescas de rocas representativas de la Zona de Investigación.
- **Protactor:** Para plasmar en los planos las coordenadas, ángulos y orientaciones obtenidas en campo.
- **Rayador de Punta Imantada:** Para obtener la dureza según la escala de Mohs de la roca muestreada.

3.6.2. Instrumentos

Los instrumentos de recolección de datos utilizados en la investigación fueron los siguientes:

- **Formatos de clasificación petrográfica de rocas Volcánicas y Piroclásticas:** Utilizado para colocar los datos macroscópicos de las rocas recolectadas en campo.
- **Lápiz, lapiceros, colores y marcadores:** Se utilizará para el cartografiado geológico de la Secuencia Volcánica Tantachual y anotaciones de datos.
- **Libreta de campo:** Se utilizará para la anotación de coordenadas, datos de las rocas y otros apuntes que aporten a la investigación.
- **Plano Geológico y Topográfico:** Para ubicar la formación geológica de estudio y para tener un alcance de sus límites con otras formaciones. Sirviendo como base las Cartas Geológicas pertenecientes al cuadrángulo de Chota 14-f-II y 14-f-III dispuestas por el INGEMMET a escala 1:50000, para posteriormente realizar el cartografiado a escala 1:20000.

3.7. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE DATOS

El análisis e interpretación de datos fue de forma continua y se basó en los datos obtenidos en campo, correlacionando la descripción macroscópica, microscópica y geoquímica con la ayuda de diagramas de estimación visual como lo es la clasificación propuesta por Streckeisen 1979, Schmidt 1981 y el Diagrama TAS (Total Alkali Silica). Posteriormente a estos resultados se procedió a la delimitación de las unidades que conforman la Secuencia Volcánica Tantachual. Finalmente, con todos los datos, planos y diferenciación litológica obtenida, se interpretó la ubicación del centro de emisión volcánica de la mencionada Secuencia Volcánica.

3.8. CONTEXTO GEOLÓGICO

3.8.1. Geología Local

La Secuencia Volcánica Tantachual es una unidad que se encuentra dentro de la denominada Formación Porculla (Cuadrángulo de Chota), formando parte a su vez del Grupo Calipuy.

La **Formación Porculla** esta descrita como una secuencia gruesa de volcánicos mayormente ácidos con bancos gruesos sub-horizontales que constituyen planicies más o menos extensas limitadas por escarpas pronunciadas y que en su mayoría los colores de sus componentes son grisáceos; además presentan sills y pequeños stocks. Litológicamente consiste en rocas volcánicas dacíticas con intercalaciones de andesitas englobados en piroclastos siendo estos más abundantes que los derrames volcánicos. Esta formación suprayace a la formación Llama e infrayace al Volcánico Huambos (Wilson, 1984).

Actualmente el INGEMMET viene actualizando los mapas que conforman la Carta Geológica Nacional a escala 1:50000; en este sentido se ha tomado como referencia las Cartas Geológicas 14-f-II y 14-f-III pertenecientes al cuadrángulo de Chota; en estas cartas el INGEMMET divide al Grupo Calipuy en Secuencias Volcánicas y Centros Volcánicos tomando como base los trabajos de Carta Geológica Serie A-INGEMMET (Navarro y Monge, 2008). Revisar anexos adjuntos (Cartas 14-f-II y 14-f-III).

Por otra parte, Navarro (2013) en su informe “Nuevas Dataciones en el Segmento Sur de Cajamarca” realizado para el INGEMMET, concluye que la actividad magmática para la generación de los depósitos piroclásticos que conforman el Grupo Calipuy está ligada a

distintos Centros Eruptivos y en las zonas donde no se identificaron dichos Centros se les denominó Secuencias Volcánicas, además las dataciones radiométricas delimitaron geocronológicamente las unidades volcánicas.

3.8.1.1. Secuencia Volcánica Tantachual (Po-tch)

Es la Secuencia Volcánica motivo de la investigación y representa el 86.32 % (18.80 Km²) del área total. La Secuencia Volcánica Tantachual (Po-tch) según la Carta Geológica Nacional a escala 1:50000 pertenece al periodo Paleógeno y a la época Oligoceno. La tabla Cronoestratigráfica de la IUGS (International Union of Geological Sciences) tiene edades absolutas para estos tiempos: Paleógeno (66.0 M.a – 23.03 M.a), Oligoceno (33.9 M.a – 23.03 M. a).



Foto 1. Panorama de las secuencias volcánicas principales identificadas en el área de investigación: Evento Po-tch/3, Evento Po-tch/4 y Po-tch/5. Coordenadas Fotográficas (UTM): N: 9238591; E: 750792; C: 3211.

Esta secuencia se caracteriza por contener depósitos piroclásticos con componentes de distintos tamaños (pómez, ceniza, lapilli y bloques), por lo que se le ha dividido por el INGEMMET en 09 eventos de los cuales solo 06 se identificaron en el área de investigación y que se diferencian por tres aspectos principales: A) Tamaño de sus componentes, B) Composición geoquímica de sus componentes y C) Arreglo de las facies que conforman cada secuencia. A continuación, se describirá cada evento:

3.8.1.1.1. Secuencia Volcánica Tantachual Evento 02 (Po-tch/2)

Este evento representa el 18.78 % (4.09 Km²) del área total, y se caracteriza por estar conformado por depósitos de flujos piroclásticos de pómez densas y fibrosas con cenizas grises,

amarillentas a blanquecinas, con fragmentos líticos porfiríticos y sedimentarios (clastos calcáreos). Espesor aproximado de la Secuencia: 130m.

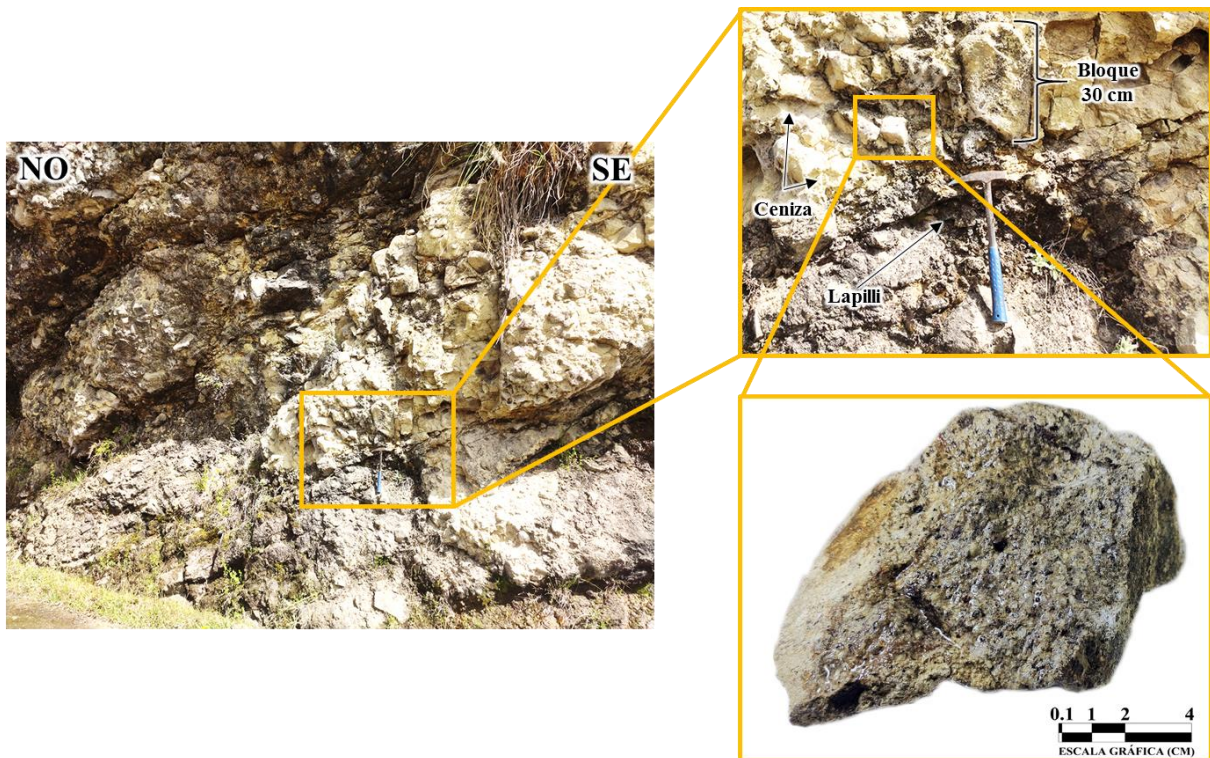


Foto 2. Depósito de flujos piroclásticos de bloques, lapilli y cenizas bien consolidadas, estos depósitos contienen fragmentos porfiríticos y tobáceos tal como muestra las fotos de enfoque indicando una Toba Cristalovítrea. Coordenadas Fotográficas (UTM): N: 9237874; E: 751819; C: 3364. Ver Anexos: Formato Descriptivo MGC-43.

3.8.1.1.2. Secuencia Volcánica Tantachual Evento 03 (Po-tch/3)

Este evento representa el 21.07 % (4.59 Km²) del área total, y se caracteriza por estar conformado por intercalaciones de flujos piroclásticos de bloques y cenizas, gris azulinas a verdosas porfiríticos y monolíticos con flujos piroclásticos de pómez y cenizas de color gris amarillento. Espesor aproximado de la Secuencia: 150m.

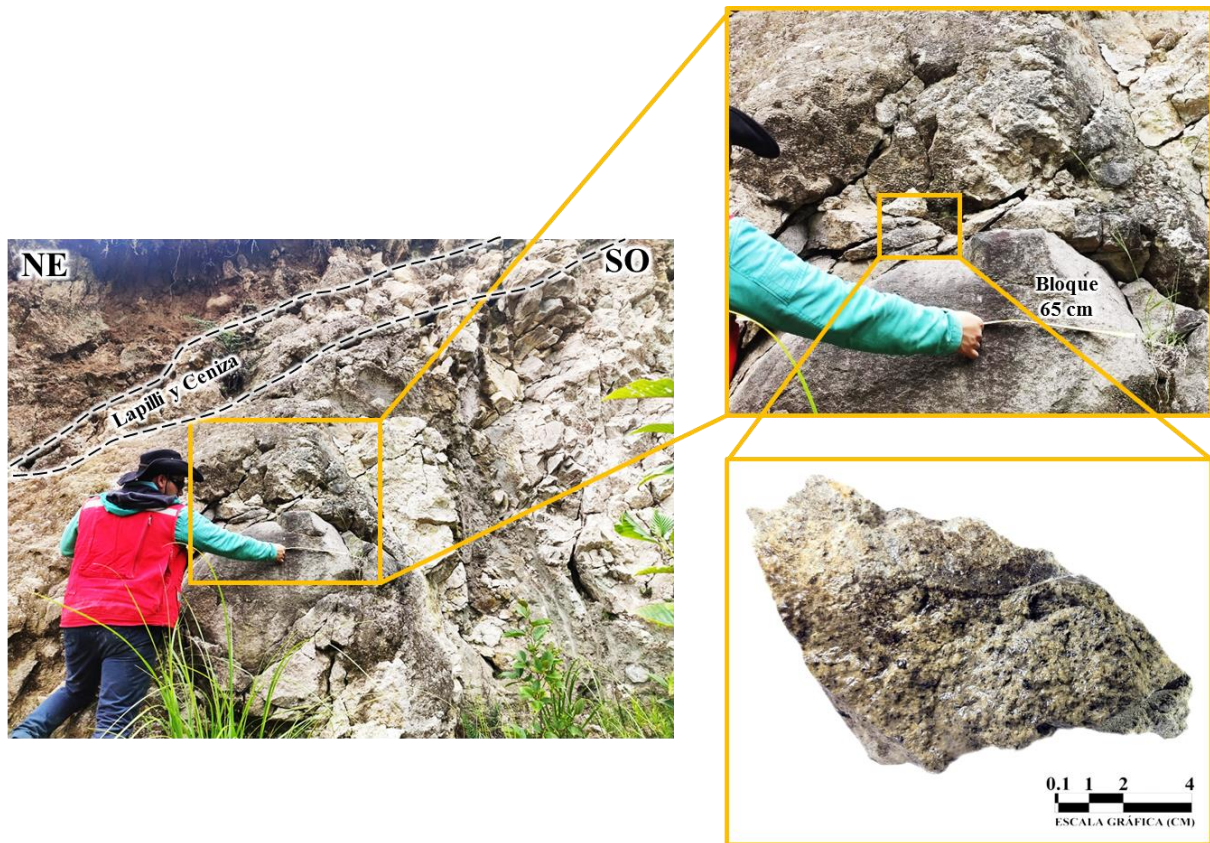


Foto 3. Depósitos piroclásticos de bloques y cenizas en intercalación con depósitos de lapilli y cenizas. La foto de enfoque presenta una muestra tomada de la secuencia fina de lapilli y ceniza clasificándola según Schmid en una Toba Cristalovítrea. Coordenadas Fotográficas (UTM): N: 9238524; E: 751278; C: 3224. Ver Anexos: Formato Descriptivo MGC-19.

3.8.1.1.3. Secuencia Volcánica Tantachual Evento 04 (Po-tch/4)

Este evento representa el 21.72 % (4.73 Km²) del área total, y se caracteriza por estar conformado por depósitos de flujo piroclástico de pómez y ceniza de color gris claro a blanquecino ricos en cristales, estos sobreyacen a flujos piroclásticos de bloques y cenizas grises verdosas porfiríticos y monolíticos. Espesor aproximado de la Secuencia: 150m.

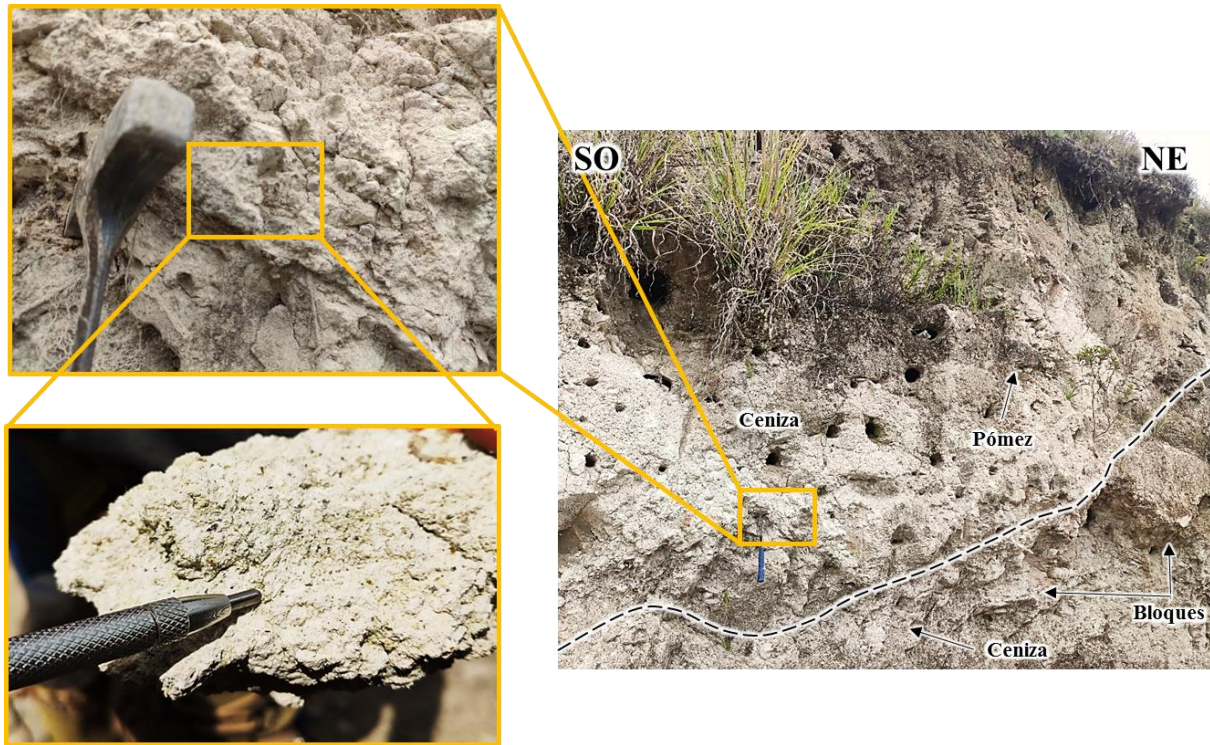


Foto 4. Depósito de pómez y ceniza sobreyaciendo a piroclastos de bloques y ceniza gris verdosas. Las fotos de enfoque muestran material piroclástico de ceniza y lapilli con cristales no muy bien consolidados. Coordenadas Fotográficas (UTM): N: 9238273; E: 749691; C: 3153. Ver Anexos: Formato Descriptivo MGC-36.

3.8.1.1.4. Secuencia Volcánica Tantachual Evento 05 (Po-tch/5)

Este evento representa el 8.68 % (1.89 Km²) del área total, y se caracteriza por estar conformado por depósitos de flujo piroclástico de pómez y ceniza de color gris claro con fragmentos porfiríticos. Espesor aproximado de la Secuencia: 80m.

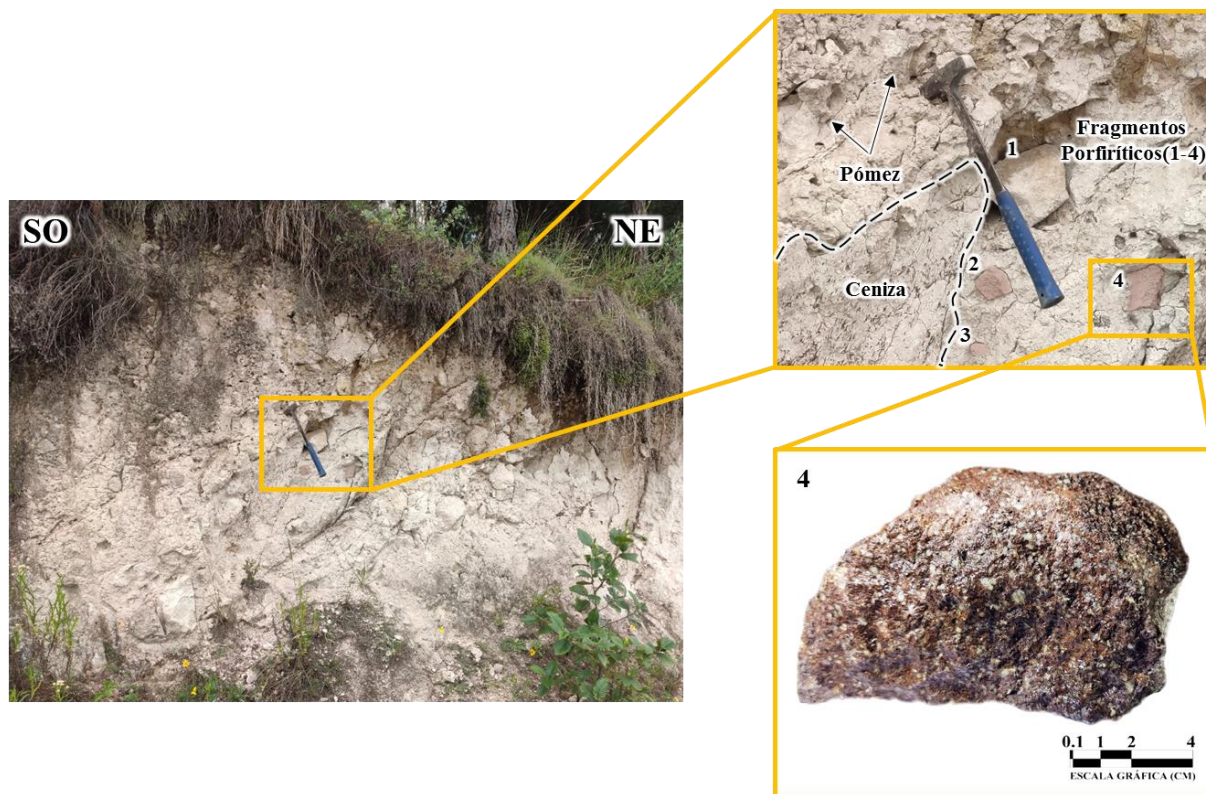


Foto 5. Depósito de pómez y ceniza con fragmentos líticos (5 cm – 30 cm) de tobas y volcánicos porfíricos. Las fotos de enfoque muestran los fragmentos polilíticos, de cuales se muestreó un fragmento volcánico de textura porfírica (muestra más representativa de los fragmentos) para determinar su clasificación según Streckeisen, dando como resultado una Dacita. Coordenadas Fotográficas (UTM): N: 9237815; E: 749241; C: 3203. Ver Anexos: Formato Descriptivo MGC-11.

3.8.1.1.5. Secuencia Volcánica Tantachual Evento 06 (Po-tch/6)

Este evento representa el 1.56 % (0.34 Km²) del área total, y se caracteriza por estar conformado por intercalaciones de flujos piroclásticos de bloques y ceniza, gris verdoso con flujos de lava andesítica tabular, asociados con flujos piroclásticos de cenizas gris amarillentas. Espesor aproximado de la Secuencia: 80m.

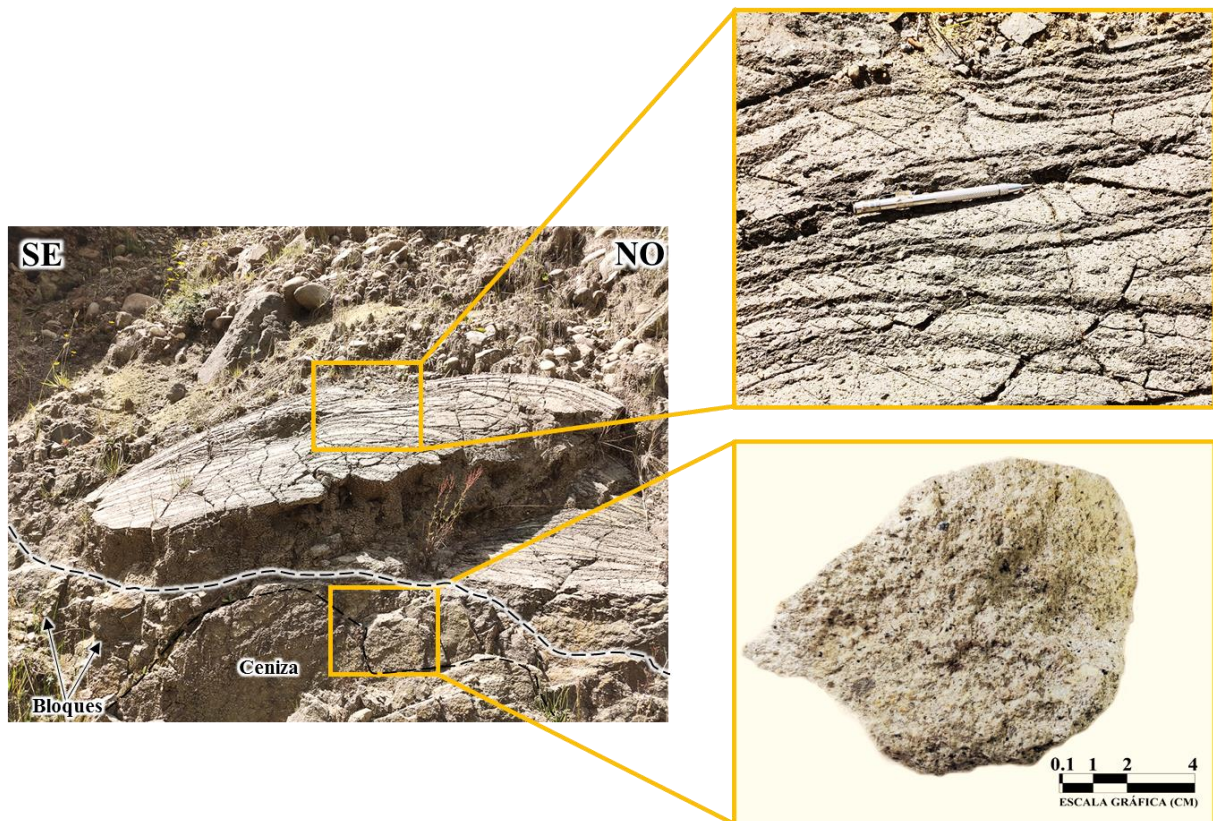


Foto 6. Depósito de flujos piroclásticos de bloques y ceniza en contacto con flujos de lava andesítica con una microestructura fluidal tal y como se muestra en la foto de enfoque superior. La foto de enfoque inferior presenta la muestra de mano obtenida del material piroclástico subyacente al flujo de lava andesítico, y según la clasificación de Schmid se ha determinado como una Toba Cristalovítrea. Coordenadas Fotográficas (UTM): N: 9240533; E: 749523; C: 3429. Ver Anexos: Formato Descriptivo MGC-04.

3.8.1.1.6. Secuencia Volcánica Tantachual Evento 08 (Po-tch/8)

Este evento representa el 14.51 % (3.16 Km²) del área total, y se caracteriza por estar conformado por flujos piroclásticos de pómez y cenizas gris amarillento ricos en cristales. Una particularidad de este evento es que está dispuesto en pseudo-estratos con espesores mayor a 2m. Espesor aproximado de la Secuencia: 200m.

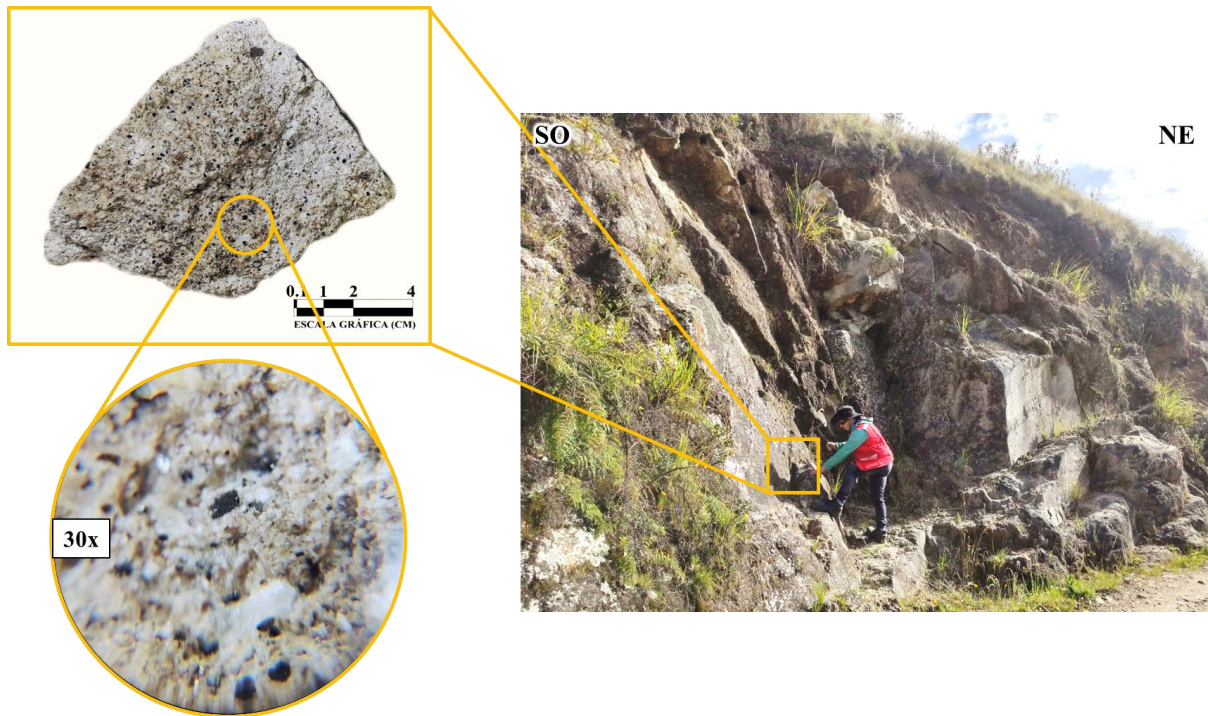


Foto 7. Toma de muestra para el análisis macroscópico de los depósitos piroclásticos de pómez y ceniza ricos en cristales de plagioclasas y máficos en los bancos pseudo-estratificados de espesores mayores a 2 m de la Secuencia Volcánica Po-tch/8, tal como se muestra en las tomas de enfoque (lupa 30x) a la izquierda de la foto. Coordenadas Fotográficas (UTM): N: 9240028; E: 750072; C: 3276. Ver Anexos: Formato Descriptivo MGC-27.

3.8.1.2. Subvolcánicos Andesíticos del Oligoceno (Po-and)

Esta unidad representa el 0.55 % (0.12 Km²) del área total, y se caracteriza por cortar los eventos de la Secuencia del Volcánica Tantachual. Contiene subvolcánicos andesíticos gris parduzcos a oscuros y con textura porfirítica de cristales de plagioclasa y anfíboles.

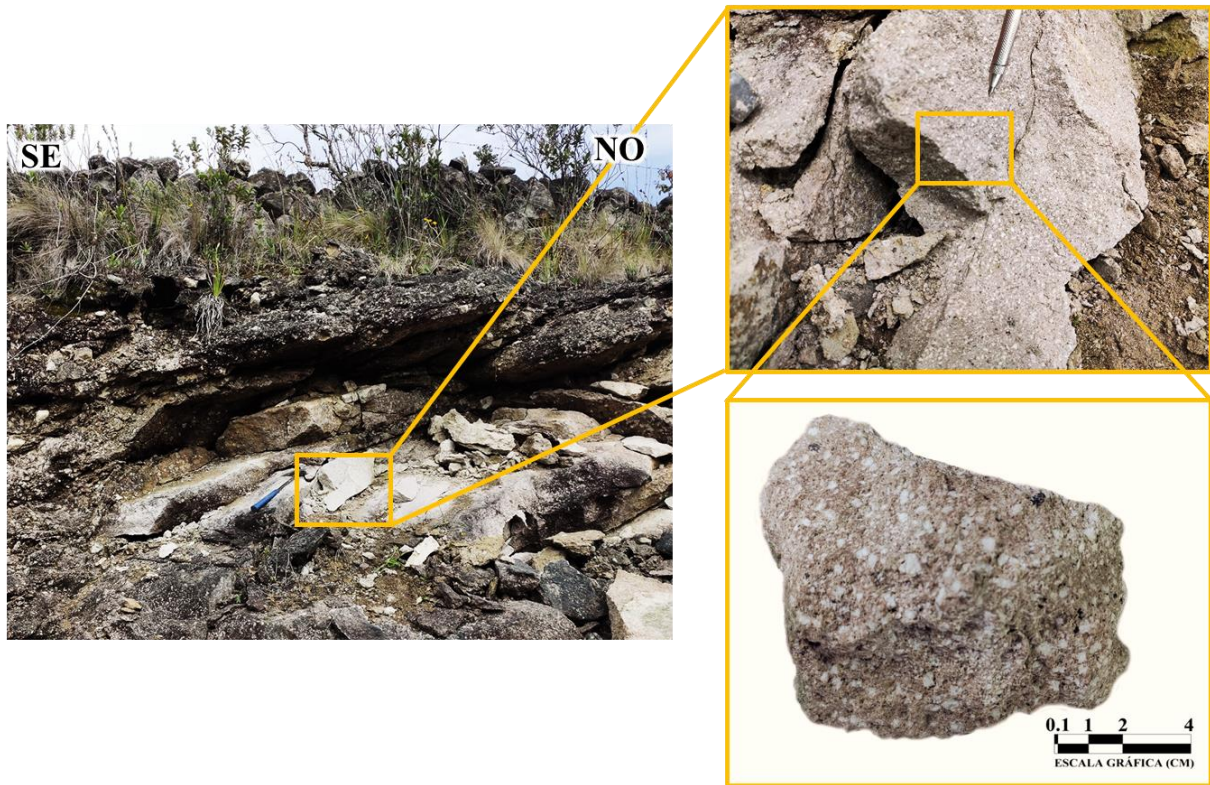


Foto 8. Pseudo-estratificación de las intrusiones subvolcánicas andesíticas que cortan la Secuencia Volcánica Tantachual y representa los últimos eventos de época del Oligoceno. Las fotos de enfoque muestran un bloque de roca en las cuales son notorios los fenocristales de plagioclasa en una matriz fina. Coordenadas Fotográficas (UTM): N: 9240786; E: 749875; C: 3409. Ver Anexos: Formato Descriptivo MGC-02.

3.8.1.3. Centro Volcánico Chicche-Hueco Grande (Nm-chg)

3.8.1.3.1. Centro Volcánico Chicche-Hueco Grande Evento 5 (Nm-chg/5)

Este evento representa el 12.26 % (2.67 Km²) del área total, y se caracteriza por estar conformado por depósitos de flujos piroclásticos de pómez y cenizas, gris amarillento, ricos en cristales, pómez densas, fragmentos líticos porfiríticos. Espesor aproximado de la Secuencia: 130m.

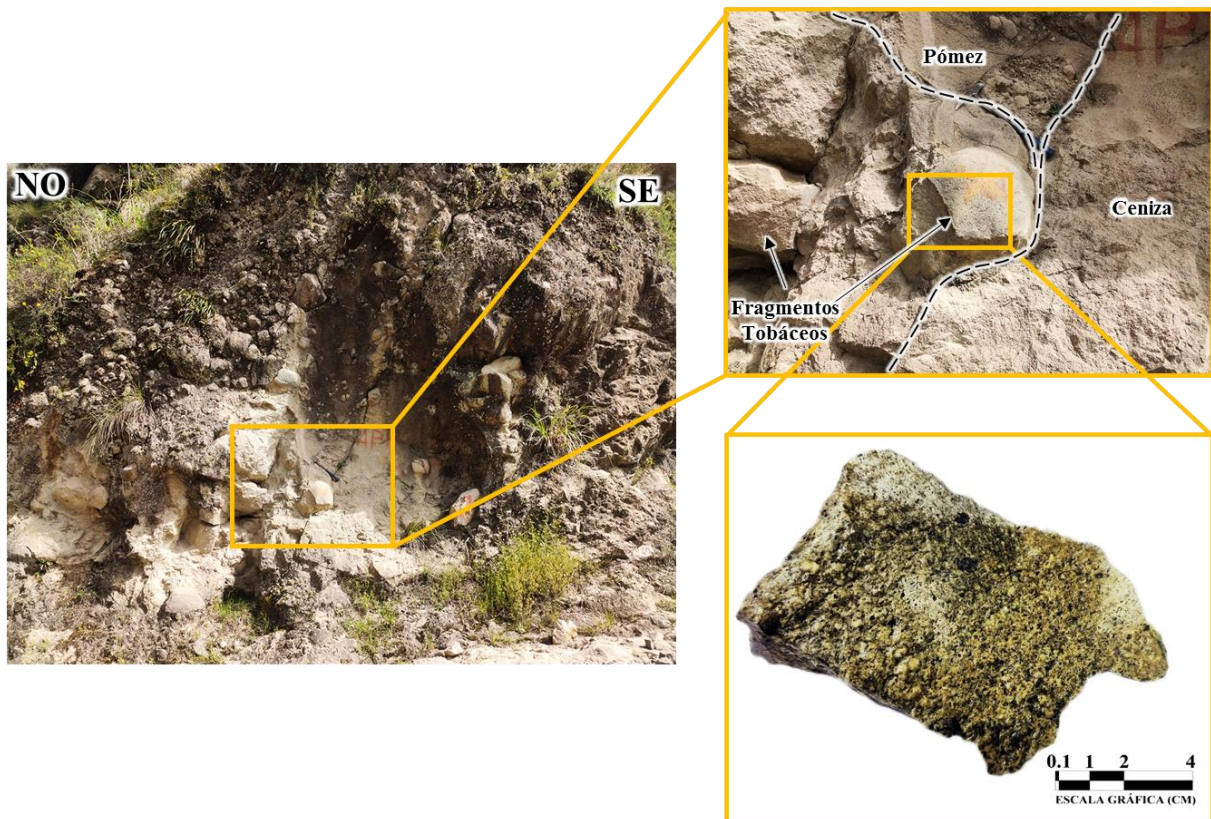


Foto 9. Depósito piroclástico de pómez y ceniza con fragmentos tobáceos y porfiríticos dispersos en toda su extensión. Las fotos de enfoque presentan la muestra para la cual se determinó una Toba Cristalovítrea con una matriz bien soldada. Coordenadas Fotográficas (UTM): N: 9240320; E: 748304; C: 3432. Ver Anexos: Formato Descriptivo MGC-01.

3.8.1.4. Subvolcánicos y Domos Andesíticos del Mioceno (Nm-and)

Esta unidad representa el 0.87 % (0.19 Km²) del área total, y se caracteriza por cortar las secuencias del Centro Volcánico Chicche-Hueco Grande. Contiene Subvolcánicos y Domos andesíticos, gris parduzcos y verdosos porfiríticos de cristales de plagioclasa y anfíboles.

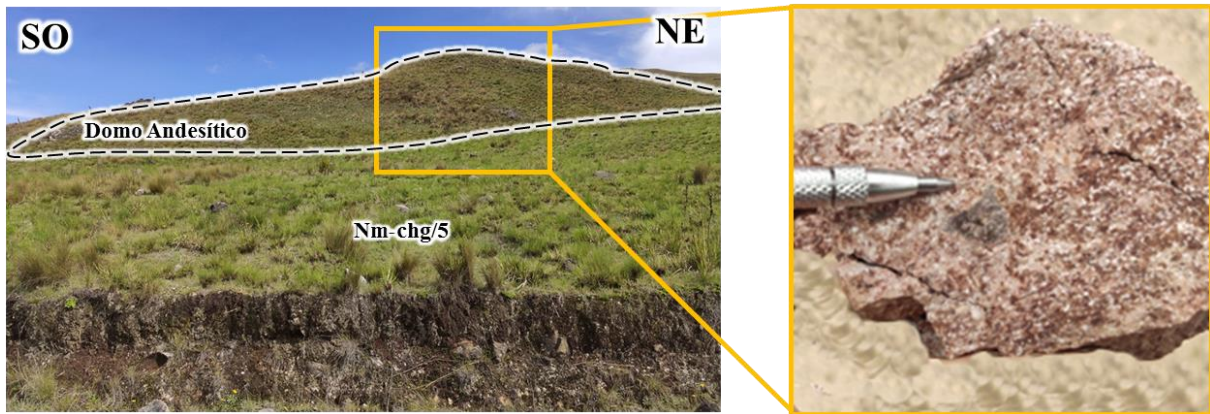


Foto 10. Vista de domo andesítico intruyendo el Centro Volcánico Chicche-Hueco Grande-Evento 5 (Nm-chg/5). La foto de enfoque muestra una andesita con presencia de óxidos en los intersticios. Coordenadas Fotográficas (UTM): N: 9239813; E: 748903; C: 3393. Ver Anexos: Formato Descriptivo MGC-09.

3.8.1.5. Depósitos Cuaternarios

Se encuentran como depósitos fluviales (Qh-fl) principalmente al margen del río Yanahuanga y en menor proporción en los márgenes de las quebradas, caracterizados por contener un material heterogéneo de clastos redondeados y sub-redondeados (Foto 11-A). De igual manera están los depósitos eluviales (Qp-el) los cuales se encuentran principalmente en los bordes de los acantilados y que se caracterizan por presentar clastos sub-angulosos, erosionados de los afloramientos adyacentes (Foto 11-B).

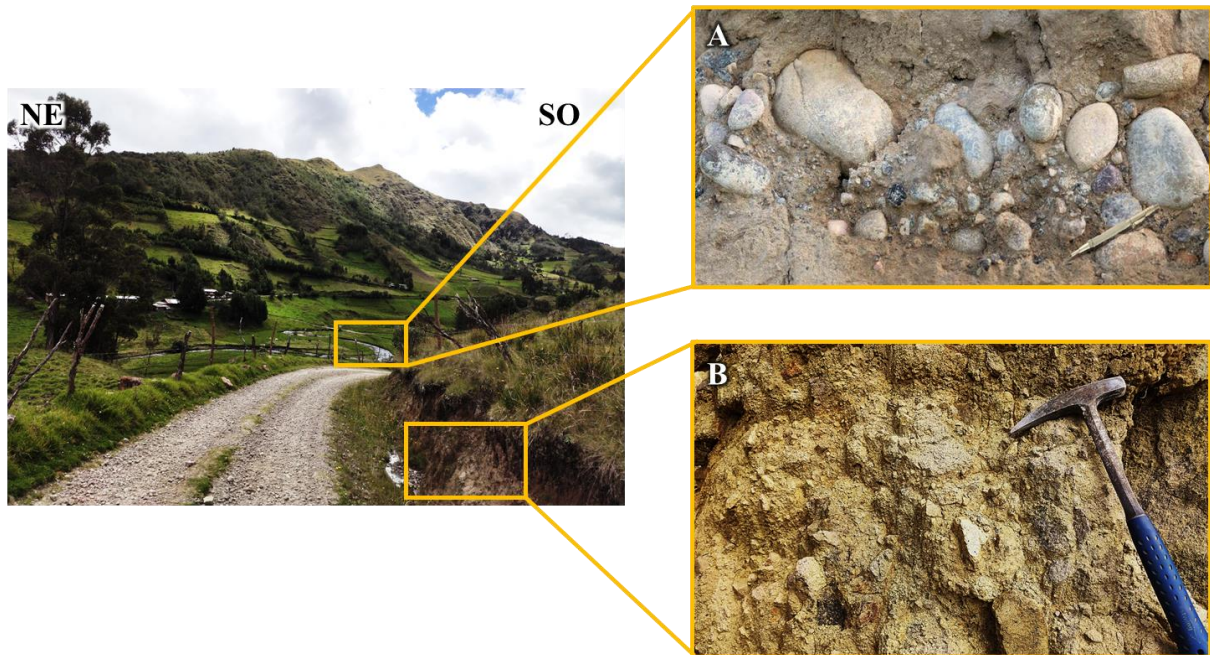


Foto 11. Principales depósitos cuaternarios, las imágenes de enfoque muestran: A. Depósito fluvial con material redondeado y sub-redondeado. B. Depósito eluvial con material sub-anguloso expuesto en el corte de carretera. Coordenadas Fotográficas (UTM): N: 9239169; E: 750470; C: 3166.

3.8.2. Geomorfología

3.8.2.1. Drenaje

En el área de estudio se puede identificar dos drenajes marcados: los **ríos** y las **quebradas** los cuales tienen una orientación preferencial de NO – SE. El patrón de drenaje es **Dendrítico** (Ver Anexos: Plano N° 06).

A) Ríos

Para el caso de los ríos, el único que está dentro del área de investigación es el **Río Yanahuanga** el cual tiene una orientación NE – SO, y está clasificado por el MIDAGRI (Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego) como río de **Quinto Orden** y río de **Clase 3** según MINAM (Ministerio del Ambiente). El río Yanahuanga aporta sus aguas al río San Miguel el cual es un afluente de la Sub Cuenca San Miguel y esta a su vez forma parte de la Cuenca Jequetepeque encontrándose el río Yanahuanga al NE de dicha cuenca.



Foto 12. Vista panorámica aguas abajo del Río Yanahuanga, principal afluente del Río San Miguel. Coordenadas Fotográficas (UTM): N: 9238727; E: 750073; C: 3127.

B) Quebradas

Las principales quebradas están en la parte NE de la zona de estudio, y en su minoría en la parte SO, tienen una orientación preferencial NO-SE. Todas forman parte como afluentes del Río Yanahuanga. La más importante por su tamaño es la **Quebrada Ferruyoc** la cual se ubica en el flanco izquierdo aguas abajo del Río Yanahuanga.



Foto 13. Vista panorámica aguas arriba de la Quebrada Ferruyoc, principal afluente del Río Yanahuanga. Coordenadas Fotográficas (UTM): N: 9240351; E: 751076; C: 3326.

3.8.2.2. Unidades Morfogenéticas

La clasificación de las unidades morfogenéticas se ha realizado con ayuda del Software ArcGIS 10.7 en base a los parámetros presentados por Rodríguez, 2016 los que se detallan a continuación:

Tabla 10. Clasificación de las Unidades Morfogenéticas y los resultados obtenidos mediante el Software ArcGIS 10.7.

Rango de Pendiente	Descripción	Área	Porcentaje
0° - 8°	Planicie	6.98 Km ²	32.04 %
8° - 20°	Lomada	11.38 Km ²	52.23 %
20° - 50°	Ladera	3.38 Km ²	15.55 %
> 50°	Escarpe	0.04 Km ²	0.18 %
-	-	Total: 21.78 Km²	-

Fuente: Tomado de Rodríguez (2016).

A) Planicie

Las planicies (0° - 8°) están en toda la dimensión de zona investigada y conforma el 32.04 % de su área, aunque el sector NO y N se encuentra más denso. Estos terrenos tienen formas homogéneas y planas, y son utilizadas para la agricultura y ganadería.

B) Lomada

Las lomadas (8° - 20°) están en toda la dimensión de zona investigada y son las unidades que conforma la mayor parte de la zona en investigación, siendo 52.23 % de su área. Estos terrenos tienen formas semi-planas con ciertas ondulaciones, y son utilizadas para la agricultura y ganadería.

C) Ladera

Las lomadas (20° - 50°) están en toda la dimensión de zona investigada, aunque hay una tendencia de NE-SO, y ocupan el 15.55 % del área. Estos terrenos están moderadamente empinados y son aprovechados para la ganadería y en algunos casos para la agricultura.

D) Escarpe

Los escarpes ($> 50^\circ$) no están desarrollados en la zona de estudio, a excepción de una zona en particular en la parte central del área investigada la cual ocupa el 0.18 %. Estos terrenos presentan una pendiente pronunciada lo cual impide cualquier actividad agrícola o ganadera.



Foto 14. Principales unidades morfogénicas de la zona de estudio. Ladera: 7° ; Lomada: 16° y Ladera: 31° . Coordenadas Fotográficas (UTM): N: 9239980; E: 750555; C: 3295.

3.8.2.3. Unidades Morfológicas Menores

Las unidades morfológicas menores son aquellas que regulan el aspecto de forma parcial o completa de una unidad o secuencia.

En el caso de la zona de estudio se tiene identificada algunas morfologías menores tales como la **disyunción esferoidal** la cual se da en las rocas piroclásticas de diferentes eventos que conforman la Secuencia Volcánica Tantachual a consecuencia de la meteorización por infiltraciones líquidas en la roca que como resultado hace que se fracture en capas esferoidales.

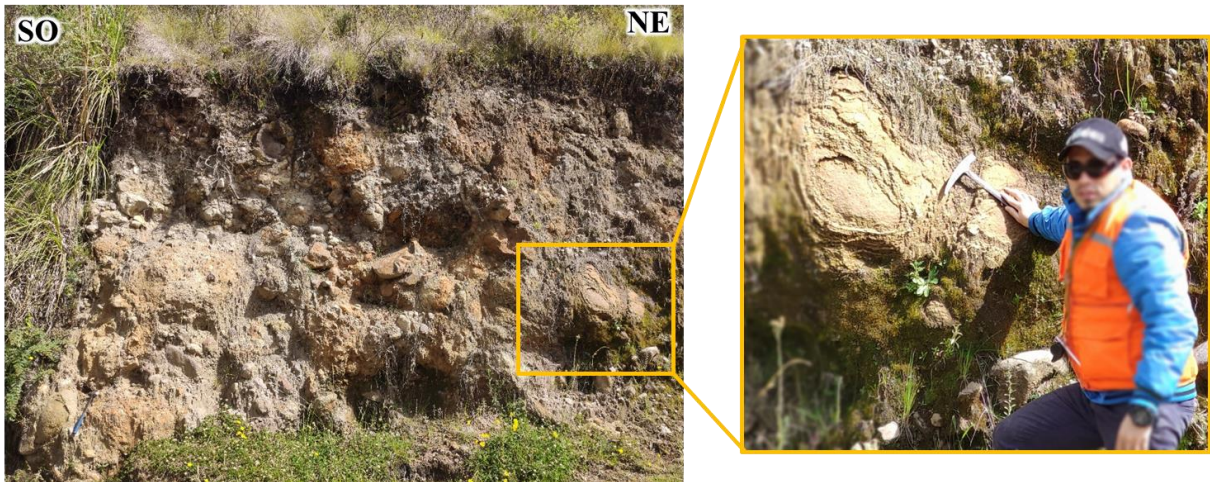


Foto 15. Disyunción esferoidal en los bloques de rocas piroclásticas de la Secuencia Volcánica Tantachual-Evento 04 (Po-tch/4). Coordenadas Fotográficas (UTM): N: 9237514; E: 749376; C: 3091.

Así mismo se logró identificar algunas estratificaciones en sectores puntuales del área de estudio, no suelen ser muy frecuentes ya que han sido eventos esporádicos de flujos de lava de composición andesítica según resultados geoquímicos (Muestra: MGC-14) como parte de toda actividad piroclástica del Oligoceno.



Foto 16. Estratificación de flujos de lava de composición andesítica suprayaciendo a la Secuencia Volcánica Tantachual-Evento 3 (Po-tch/3). Coordenadas Fotográficas (UTM): N: 9236802; E: 749136; C: 3056. Ver Anexos: Formato Descriptivo MGC-14.

3.8.3. Geología Estructural

La zona de investigación presenta un sistema estructural de fallas, pliegues, y lineamientos los cuales en su mayoría coinciden con la dirección del sistema andino (NO – SE). Las **fallas** identificadas son locales ya que no trascienden fuera de los límites en estudio, algunas de estas han sido corroboradas con las cartografiadas por el INGEMMET (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico) y otras son inferidas. En su gran mayoría tienen una dirección NO-SE. No es

posible determinar con certeza la cinemática y movimientos de las fallas por la densa cobertura vegetal, aunque sin embargo se ha podido identificar una falla con una cinemática principal de **Rumbo Sinistral** la cual coincide en una parte entre el contacto litológico entre **Po-tch/2** y **Po-tch/3** ubicado en la zona central (Ver Anexos: Plano N° 06).

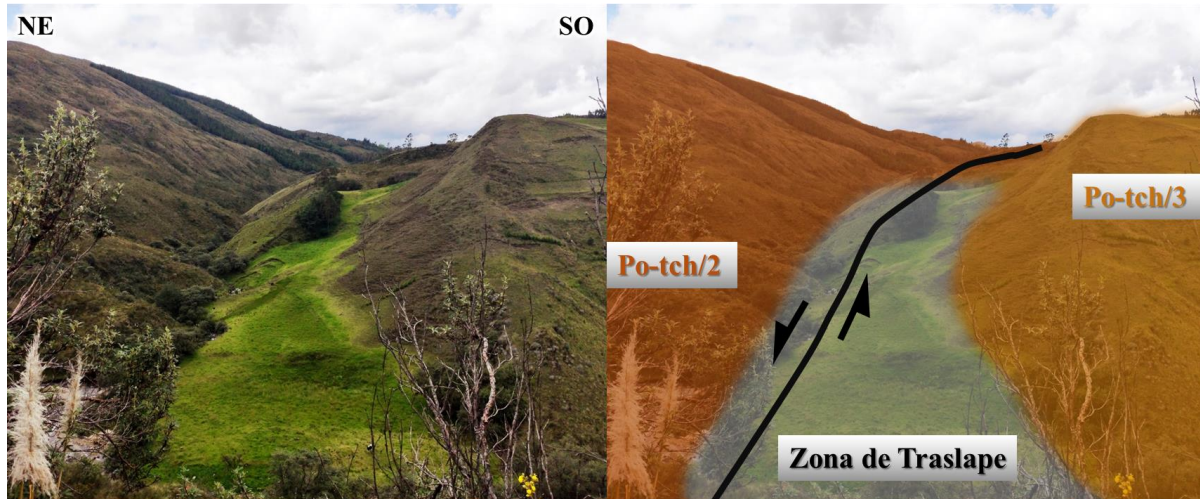


Foto 17. Falla de dirección NO - SE (Azimut: N 330° – N 345°, Inclinación: 15°NE.) con cinemática principal de Rumbo Sinistral que desplaza a la secuencia Po-tch/3 con respecto a la Po-tch/2, tal como muestra la foto réplica editada. Coordenadas Fotográficas (UTM): N: 9239587; E: 750807; C: 3198.

También se identificaron casos puntuales de fallamiento en los estratos piroclásticos y de flujo lávico. Hacia la parte NO del área de investigación se identificó un valle formado por el plegamiento **Sinclinal** de la Secuencia Volcánica Po-tch/6. Así mismo se identificaron algunos **lineamientos** estructurales con dirección preferencial NO-SE, (Ver Anexos: Plano N° 06).

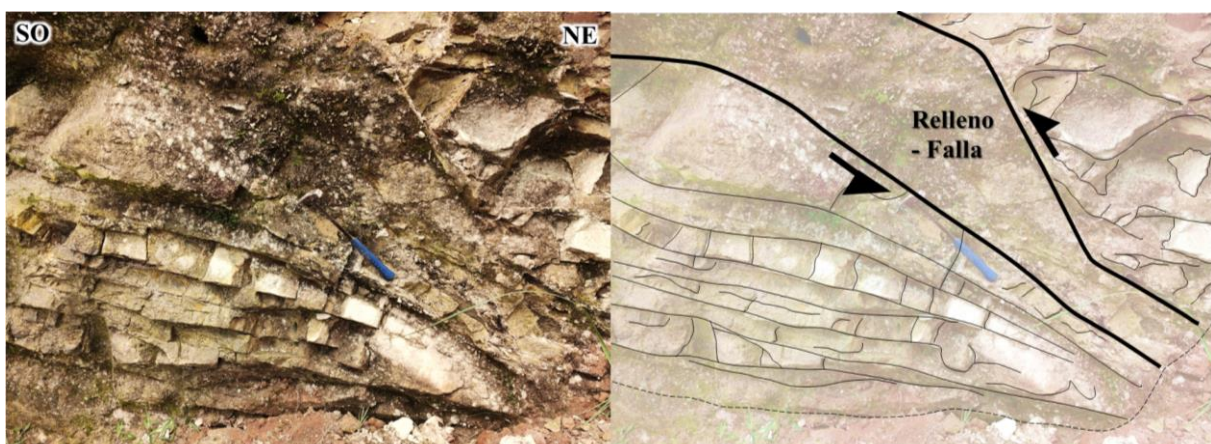


Foto 18. Falla de dirección SO – NE (Azimut: N 187°, Inclinación: 41° NO) con cinemática principal Inversa afectando los flujos andesíticos estratificados de la Secuencia Volcánica Po-tch/4, tal y como muestra la foto réplica editada. Coordenadas Fotográficas (UTM): N: 9239325; E: 750641; C: 3181.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. CARACTERIZACIÓN PETROGRÁFICA MACROSCÓPICA

La caracterización petrográfica macroscópica se ha basado en la descripción de 45 muestras de mano las cuales han sido muestreadas en toda la zona de estudio. Dicha descripción ha sido llevada a cabo con la ayuda de una lupa 30x (Iwamoto), rayador imantado, ácido clorhídrico, protactor y una cámara fotográfica (Nikon Coolpix-20 Mpx).

Para facilitar que la descripción sea sistemática y ordenada, se adaptó el formato descriptivo propuesto por Arapa, 2020; acorde a las características de las rocas muestreadas. El formato descriptivo se le denominó: “Caracterización Petrográfica Macroscópica de Muestras de Mano - Volcánicas y Subvolcánicas”, este formato consta de 06 ítems, los cuales se describen a continuación:

- **Ítem I - Código de Muestra y Datos de Ubicación:** Este ítem detalla datos tales como código de muestra, localidad de muestreo, unidad geológica y coordenadas UTM.
- **Ítem II – Fotografías de Muestra:** Este ítem presenta dos fotografías, la primera foto a escala centimétrica (cm) mostrando el tamaño real de la muestra de mano, y la segunda foto a escala milimétrica (mm) la cual sido posible con la ayuda de la lupa 30x.
- **Ítem III – Propiedades Físico-Químicas:** Este ítem describe características tales como el color de la superficie fresca, dureza promedio según la escala de Mohs, fractura de la roca y reacción con el ácido clorhídrico (HCl).
- **Ítem IV – Propiedades Texturales Macroscópicas:** Este ítem describe las características intrínsecas de la roca tales como grado de visibilidad, grado de cristalinidad, tamaño de cristales, relación de tamaños, forma de los cristales, relación de cristales, color según % de máficos contenidos y la textura macroscópica predominante.

- **Ítem V – Modo de Ocurrencia Geológica:** Este ítem describe brevemente el ambiente o depósito de donde se obtuvo la muestra de mano, mencionándose aquí la secuencia y número de evento correspondiente como parte de la unidad geológica a la que representa.
- **Ítem VI – Clasificación de Rocas Volcánicas y Subvolcánicas:** En este ítem se presentan tres clasificaciones acordes a la composición y tamaño granulométrico de la roca presentada, tal y como se describe a continuación:

- **Streckeisen (1979):** Esta clasificación se basa en la composición de los cristales de la roca, discriminando macroscópicamente a los componentes afaníticos. Este diagrama de doble entrada se fundamenta en 04 componentes: Cuarzo (Q), Feldespato Potásico o Alcalino (A), Feldespato Sódico o Plagioclasas (P) y Feldespatoides (F) en donde solo 03 de estos componentes se utilizan para obtener el tipo de roca. Este método de clasificación aplicó para las 45 muestras, incluidas las rocas volcánicas explosivas siendo determinante para nombrarlas composicionalmente, ya que no aplicaría con algún nombre que establezca el presente diagrama.

- **Schmid (1981):** Esta clasificación se basa en el tipo de componente por los cuales está constituido la roca. El diagrama utilizado es un triángulo que se fundamenta en 03 componentes: Vidrio (V), Fragmentos de Roca (FR), Cristales (C); estos componentes determinan 03 clasificaciones principales y 03 clasificaciones secundarias (por asociación de componentes). Este método de clasificación se aplicó solo para las muestras volcánicas explosivas (tobas).

- **Fisher (1966):** Esta clasificación se basa en el tamaño de los componentes que conforman la roca. El diagrama utilizado es un triángulo que se fundamenta en 03 componentes: Ceniza (I) (< 2 mm), Lapilli (L) (2mm – 64mm) y Bloques y Bombas (BB) (>64mm); estos componentes determinan 03 clasificaciones principales y 02 clasificaciones secundarias (por asociación de componentes). Este método de clasificación se aplicó solo para las muestras volcánicas explosivas (tobas).

Tabla 11. Datos de ubicación y descripción de la unidad geológica de las 45 muestras de mano.

CÓDIGO DE MUESTRA	COORDENADAS UTM (WGS 84)			ABREVIATURA	UNIDAD GEOLÓGICA	DESCRIPCIÓN
	NORTE	ESTE	COTA			
MGC-01	N: 9 240 320	E: 748 304	C: 3 432	Nm-chg/5	Centro Volcánico Chicche - Hueco Grande - Evento 5	
MGC-02	N: 9 240 786	E: 749 875	C: 3 409	Po-And	Subvolcánicos Andecíticos del Oligoceno	
MGC-03	N: 9 240 530	E: 748 988	C: 3 409	Po-tch/5	Secuencia Volcánica Tantachual - Evento 5	
MGC-04	N: 9 240 533	E: 749 523	C: 3 429	Po-tch/6	Secuencia Volcánica Tantachual - Evento 6	
MGC-05	N: 9 239 022	E: 749 550	C: 3 307	Po-tch/4	Secuencia Volcánica Tantachual - Evento 4	
MGC-06	N: 9 238 641	E: 749 576	C: 3 221	Po-tch/4	Secuencia Volcánica Tantachual - Evento 4	
MGC-07	N: 9 238 510	E: 749 261	C: 3 240	Po-tch/4	Secuencia Volcánica Tantachual - Evento 4	
MGC-08	N: 9 237 977	E: 749 396	C: 3 162	Po-tch/5	Secuencia Volcánica Tantachual - Evento 5	
MGC-09	N: 9 239 813	E: 748 903	C: 3 393	Nm-And	Subvolcánicos y Domos Andesíticos del Mioceno	
MGC-10	N: 9 237 588	E: 748 638	C: 3 316	Po-tch/4	Secuencia Volcánica Tantachual - Evento 4	
MGC-11	N: 9 237 815	E: 749 241	C: 3 203	Po-tch/5	Secuencia Volcánica Tantachual - Evento 5	
MGC-12	N: 9 238 927	E: 748 173	C: 3 395	Nm-chg/5	Centro Volcánico Chicche - Hueco Grande - Evento 5	
MGC-13	N: 9 238 164	E: 749 754	C: 3 118	Po-tch/4	Secuencia Volcánica Tantachual - Evento 4	
MGC-14	N: 9 236 800	E: 749 138	C: 3 056	Po-tch/3	Secuencia Volcánica Tantachual - Evento 3	
MGC-15	N: 9 236 843	E: 749 020	C: 3 123	Po-tch/3	Secuencia Volcánica Tantachual - Evento 3	
MGC-16	N: 9 237 667	E: 749 579	C: 3 087	Po-tch/5	Secuencia Volcánica Tantachual - Evento 5	
MGC-17	N: 9 238 260	E: 750 057	C: 3 115	Po-tch/4	Secuencia Volcánica Tantachual - Evento 4	
MGC-18	N: 9 238 171	E: 750 093	C: 3 130	Po-tch/4	Secuencia Volcánica Tantachual - Evento 4	
MGC-19	N: 9 238 523	E: 751 279	C: 3 225	Po-tch/3	Secuencia Volcánica Tantachual - Evento 3	
MGC-20	N: 9 239 280	E: 752 080	C: 3 376	Po-tch/2	Secuencia Volcánica Tantachual - Evento 2	
MGC-21	N: 9 240 083	E: 752 128	C: 3 294	Po-tch/8	Secuencia Volcánica Tantachual - Evento 8	
MGC-22	N: 9 240 415	E: 751 660	C: 3 359	Po-tch/8	Secuencia Volcánica Tantachual - Evento 8	
MGC-23	N: 9 240 990	E: 751 144	C: 3 387	Po-tch/8	Secuencia Volcánica Tantachual - Evento 8	
MGC-24	N: 9 240 428	E: 750 022	C: 3 431	Po-tch/4	Secuencia Volcánica Tantachual - Evento 4	
MGC-25	N: 9 240 483	E: 751 099	C: 3 337	Po-tch/8	Secuencia Volcánica Tantachual - Evento 8	
MGC-26	N: 9 239 968	E: 750 548	C: 3 297	Po-tch/3	Secuencia Volcánica Tantachual - Evento 3	
MGC-27	N: 9240 033	E: 750 994	C: 3 276	Po-tch/8	Secuencia Volcánica Tantachual - Evento 8	
MGC-28	N: 9 239 800	E: 751 239	C: 3 249	Po-tch/2	Secuencia Volcánica Tantachual - Evento 2	
MGC-29	N: 9 239 610	E: 750 947	C: 3 195	Po-tch/3	Secuencia Volcánica Tantachual - Evento 3	
MGC-30	N: 9 239 539	E: 749 976	C: 3 392	Po-tch/4	Secuencia Volcánica Tantachual - Evento 4	
MGC-31	N: 9 239 325	E: 750 641	C: 3 179	Po-tch/3	Secuencia Volcánica Tantachual - Evento 3	
MGC-32	N: 9 239 019	E: 750 523	C: 3 132	Po-tch/3	Secuencia Volcánica Tantachual - Evento 3	
MGC-33	N: 9 238 728	E: 750 062	C: 3 129	Po-tch/4	Secuencia Volcánica Tantachual - Evento 4	
MGC-34	N: 9 238 522	E: 750 053	C: 3 104	Po-tch/4	Secuencia Volcánica Tantachual - Evento 4	
MGC-35	N: 9 238 350	E: 749 720	C: 3 151	Po-tch/4	Secuencia Volcánica Tantachual - Evento 4	
MGC-36	N: 9 238 273	E: 749 691	C: 3 153	Po-tch/4	Secuencia Volcánica Tantachual - Evento 4	
MGC-37	N: 9 236 820	E: 749 772	C: 3 309	Po-tch/4	Secuencia Volcánica Tantachual - Evento 4	
MGC-38	N: 9 237 036	E: 749 901	C: 3 331	Po-tch/4	Secuencia Volcánica Tantachual - Evento 4	
MGC-39	N: 9 237 534	E: 750 284	C: 3 222	Po-tch/4	Secuencia Volcánica Tantachual - Evento 4	
MGC-40	N: 9 237 213	E: 750 448	C: 3 249	Po-tch/3	Secuencia Volcánica Tantachual - Evento 3	
MGC-41	N: 9 237 159	E: 750 911	C: 3 355	Po-tch/3	Secuencia Volcánica Tantachual - Evento 3	
MGC-42	N: 9 237 034	E: 752 116	C: 3 398	Po-tch/3	Secuencia Volcánica Tantachual - Evento 3	
MGC-43	N: 9 237 875	E: 751 819	C: 3 364	Po-tch/2	Secuencia Volcánica Tantachual - Evento 2	
MGC-44	N: 9 238 277	E: 752 472	C: 3 536	Po-tch/2	Secuencia Volcánica Tantachual - Evento 2	
MGC-45	N: 9 237 810	E: 752 704	C: 3 574	Po-tch/2	Secuencia Volcánica Tantachual - Evento 2	

Tabla 12. Clasificación genética, y clasificación modal por: Streckeisen (1979), Schmid (1981) y Fisher (1966) de las 45 muestras de mano.

CÓDIGO DE MUESTRA	CLASIFICACIÓN GENÉTICA	CLASIFICACIÓN DE ROCAS VOLCÁNICAS Y SUBVOLCÁNICAS		
		STRECKEISEN (1979)	SCHMID (1981)	FISHER (1966)
MGC-01	Volcánica (Extrusiva)-Piroclástica	Composición: Andesita Calcoalcalina	Toba Cristalovítrea	Toba Cinerítica
MGC-02	Volcánica(Extrusiva)-Efusiva	Andesita Calcoalcalina	N.A.	N.A.
MGC-03	Volcánica (Extrusiva)-Piroclástica	Composición: Andesita Calcoalcalina	Toba Vitrocristalina	Toba Cinerítica
MGC-04	Volcánica (Extrusiva)-Piroclástica	Composición: Andesita Calcoalcalina	Toba Cristalovítrea	Toba Cinerítica
MGC-05	Volcánica (Extrusiva)-Piroclástica	Composición: Andesita Calcoalcalina	Toba Cristalovítrea	Toba Cinerítica
MGC-06	Volcánica(Extrusiva)-Efusiva	Andesita Calcoalcalina	N.A.	N.A.
MGC-07	Volcánica(Extrusiva)-Efusiva	Andesita Calcoalcalina	N.A.	N.A.
MGC-08	Volcánica (Extrusiva)-Piroclástica	Composición: Andesita Calcoalcalina	Toba Cristalina	Toba Cinerítica
MGC-09	Volcánica(Extrusiva)-Efusiva	Andesita Calcoalcalina	N.A.	N.A.
MGC-10	Volcánica (Extrusiva)-Piroclástica	Composición: Andesita Calcoalcalina	Toba Vitrocristalina	Toba Cinerítica
MGC-11	Volcánica(Extrusiva)-Efusiva	Dacita	N.A.	N.A.
MGC-12	Volcánica(Extrusiva)-Efusiva	Andesita Calcoalcalina	N.A.	N.A.
MGC-13	Volcánica (Extrusiva)-Piroclástica	Composición: Andesita Calcoalcalina	Toba Vitrocristalina	Toba Cinerítica
MGC-14	Volcánica(Extrusiva)-Efusiva	Andesita Calcoalcalina	N.A.	N.A.
MGC-15	Volcánica (Extrusiva)-Piroclástica	Composición: Andesita Calcoalcalina	Toba Cristalovítrea	Toba Cinerítica
MGC-16	Volcánica (Extrusiva)-Piroclástica	Composición: Andesita Calcoalcalina	Toba Vitrocristalina	Toba Cinerítica
MGC-17	Volcánica(Extrusiva)-Efusiva	Andesita Calcoalcalina	N.A.	N.A.
MGC-18	Volcánica (Extrusiva)-Piroclástica	Composición: Andesita Calcoalcalina	Toba Cristalina	Toba Cinerítica
MGC-19	Volcánica (Extrusiva)-Piroclástica	Composición: Andesita Calcoalcalina	Toba Cristalovítrea	Toba Cinerítica
MGC-20	Volcánica (Extrusiva)-Piroclástica	Composición: Andesita Calcoalcalina	Toba Cristalina	Toba Cinerítica
MGC-21	Volcánica (Extrusiva)-Piroclástica	Composición: Andesita Calcoalcalina	Toba Cristalovítrea	Toba Cinerítica
MGC-22	Volcánica (Extrusiva)-Piroclástica	Composición: Andesita Calcoalcalina	Toba Vitrocristalina	Toba Cinerítica
MGC-23	Volcánica (Extrusiva)-Piroclástica	Composición: Andesita Calcoalcalina	Toba Cristalovítrea	Toba Cinerítica
MGC-24	Volcánica (Extrusiva)-Piroclástica	Composición: Andesita Calcoalcalina	Toba Cristalovítrea	Toba Cinerítica
MGC-25	Volcánica (Extrusiva)-Piroclástica	Composición: Andesita Calcoalcalina	Toba Cristalina	Toba Cinerítica
MGC-26	Volcánica (Extrusiva)-Piroclástica	Composición: Andesita Calcoalcalina	Toba Vitrocristalina	Toba Cinerítica
MGC-27	Volcánica (Extrusiva)-Piroclástica	Composición: Andesita Calcoalcalina	Toba Cristalovítrea	Toba Cinerítica
MGC-28	Volcánica (Extrusiva)-Piroclástica	Composición: Andesita Calcoalcalina	Toba Cristalovítrea	Toba Cinerítica
MGC-29	Volcánica (Extrusiva)-Piroclástica	Composición: Andesita Calcoalcalina	Toba Vitrocristalina	Toba Cinerítica
MGC-30	Volcánica (Extrusiva)-Piroclástica	Composición: Andesita Calcoalcalina	Toba Vitrocristalina	Toba Cinerítica
MGC-31	Volcánica(Extrusiva)-Efusiva	Andesita Calcoalcalina	N.A.	N.A.
MGC-32	Volcánica(Extrusiva)-Efusiva	Andesita Calcoalcalina	N.A.	N.A.
MGC-33	Volcánica (Extrusiva)-Piroclástica	Composición: Andesita Calcoalcalina	Toba Vitrocristalina	Toba Cinerítica
MGC-34	Volcánica(Extrusiva)-Efusiva	Andesita Calcoalcalina	N.A.	N.A.
MGC-35	Volcánica (Extrusiva)-Piroclástica	Composición: Andesita Calcoalcalina	Toba Cristalovítrea	Toba Cinerítica
MGC-36	Volcánica (Extrusiva)-Piroclástica	Composición: Andesita Calcoalcalina	Toba Cristalina	Toba Cinerítica
MGC-37	Volcánica (Extrusiva)-Piroclástica	Composición: Andesita Calcoalcalina	Toba Cristalovítrea	Toba Cinerítica
MGC-38	Volcánica (Extrusiva)-Piroclástica	Composición: Andesita Calcoalcalina	Toba Vitrocristalina	Toba Cinerítica
MGC-39	Volcánica (Extrusiva)-Piroclástica	Composición: Andesita Calcoalcalina	Toba Cristalina	Toba Cinerítica
MGC-40	Volcánica(Extrusiva)-Efusiva	Andesita Calcoalcalina	N.A.	N.A.
MGC-41	Volcánica(Extrusiva)-Efusiva	Andesita Calcoalcalina	N.A.	N.A.
MGC-42	Volcánica(Extrusiva)-Efusiva	Andesita Calcoalcalina	N.A.	N.A.
MGC-43	Volcánica (Extrusiva)-Piroclástica	Composición: Andesita Calcoalcalina	Toba Cristalovítrea	Toba Cinerítica
MGC-44	Volcánica (Extrusiva)-Piroclástica	Composición: Andesita Calcoalcalina	Toba Cristalina	Toba Cinerítica
MGC-45	Volcánica (Extrusiva)-Piroclástica	Composición: Andesita Calcoalcalina	Toba Cristalovítrea	Toba Cinerítica

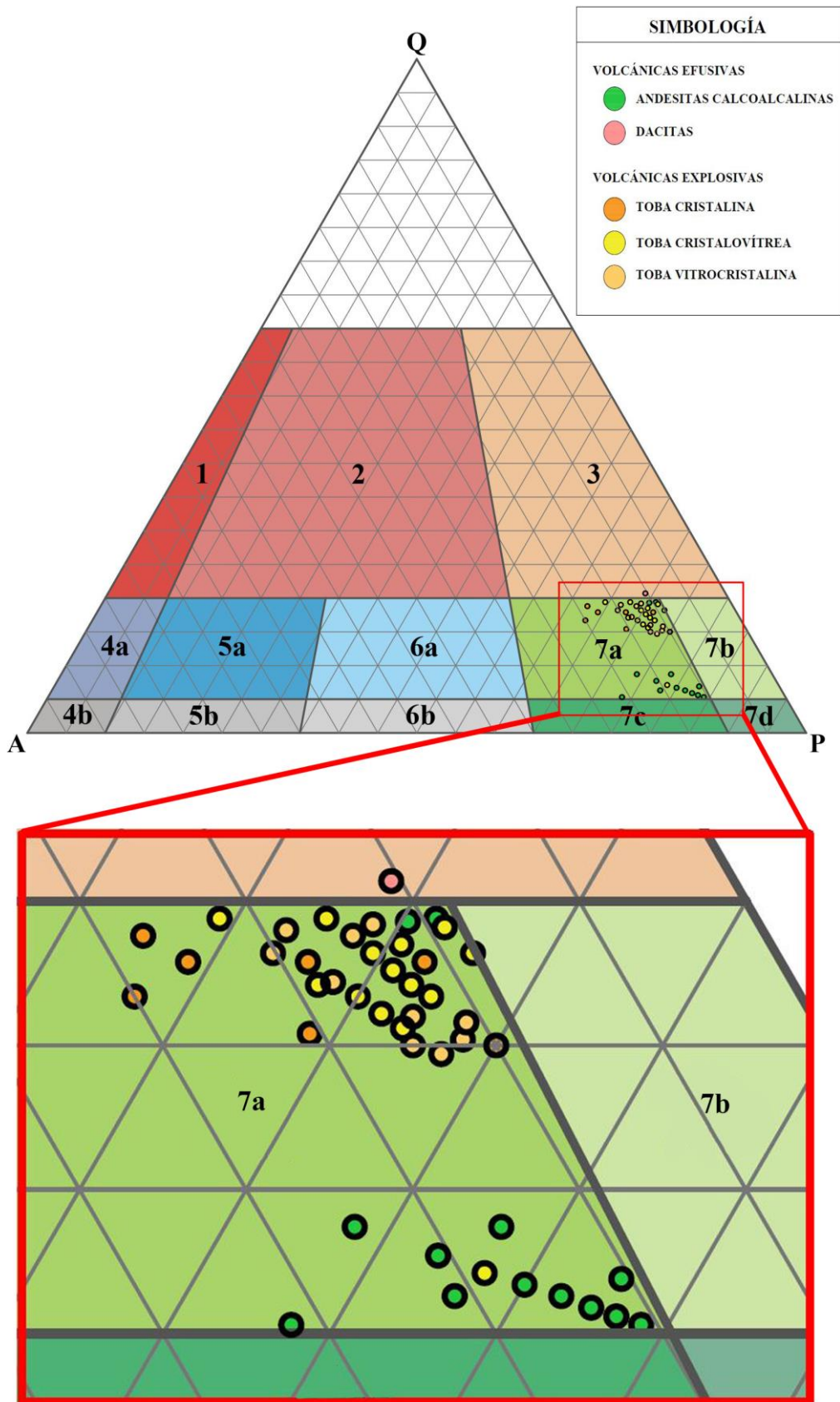


Figura 17. Clasificación modal por Streckeisen (1979). Todas las muestras han sido clasificadas con esta metodología ya sea para la determinación de su nombre (volcánicas efusivas) o para determinar el nombre de su composición (volcánicas explosivas). En la imagen de acercamiento se nota que 44 muestras recaen en la zona de las Andesitas Calcoalcálicas y 1 muestra en las Zona de las Dacitas.

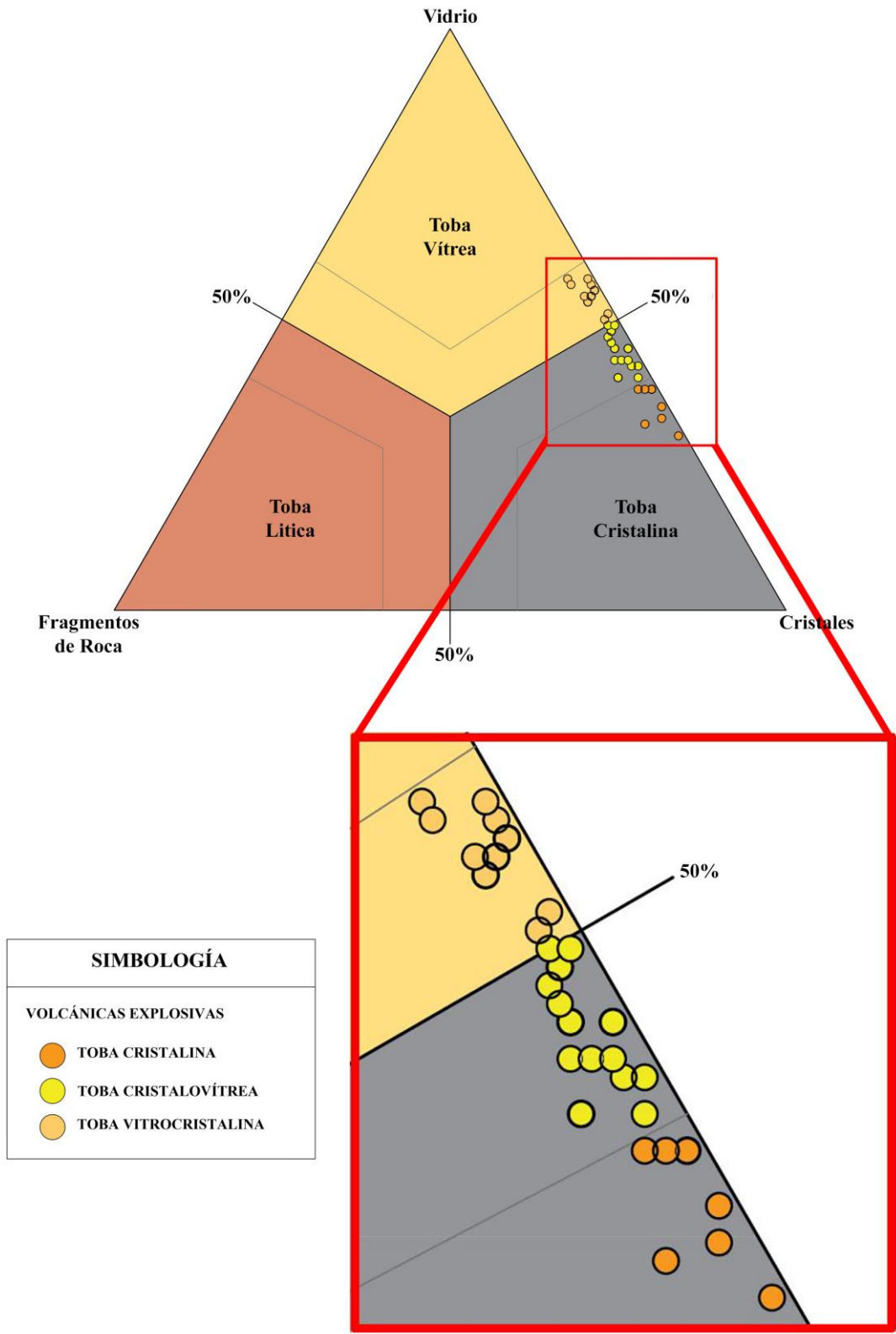


Figura 18. Clasificación modal por Schmid (1981). Las muestras que han sido clasificadas por esta metodología han sido 33 y corresponden a las rocas volcánicas explosivas de las cuales 07 son tobas cristalinas, 14 tobas cristalovítreas y 10 tobas vitrocrystalinas; basándose en el tipo de componente que forma la roca (cristales, vidrio y fragmentos de roca). En la imagen de acercamiento se nota la distribución de las tobas acorde a su composición.

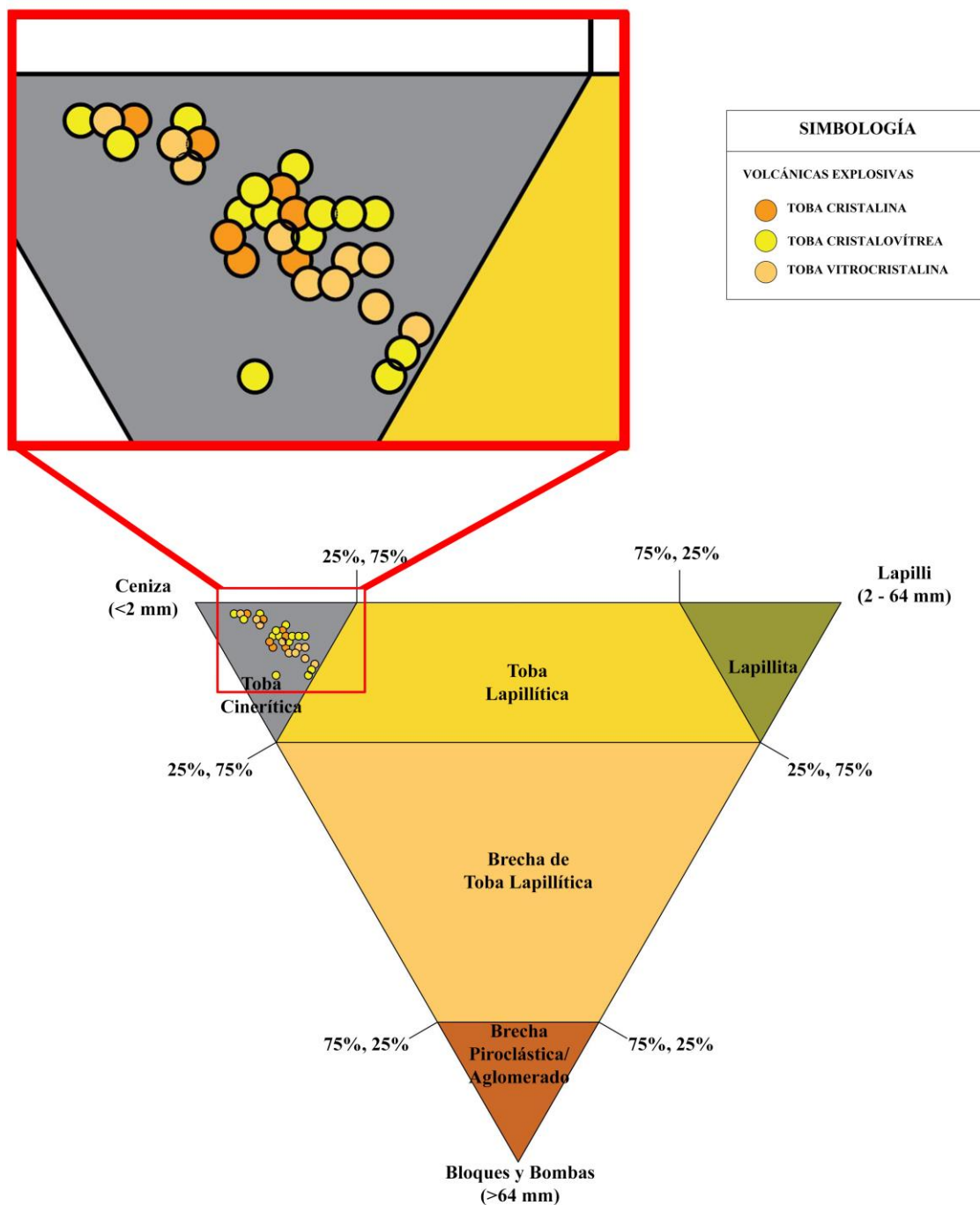


Figura 19. Clasificación modal por Fisher (1966). Las muestras que han sido clasificadas por esta metodología han sido 33 y corresponden a las rocas volcánicas explosivas de las cuales 07 son tobas cristalinas, 14 tobas cristalovítreas y 10 tobas vitrocrystalinas; basándose en el tamaño granulométrico de los materiales que componen la roca. En la imagen de acercamiento se nota que todas las muestras recaen en el triángulo gris el cual está considerado para las denominadas “Tobas Cineríticas” ya que más del 75% de sus componentes son menores a 2 mm.

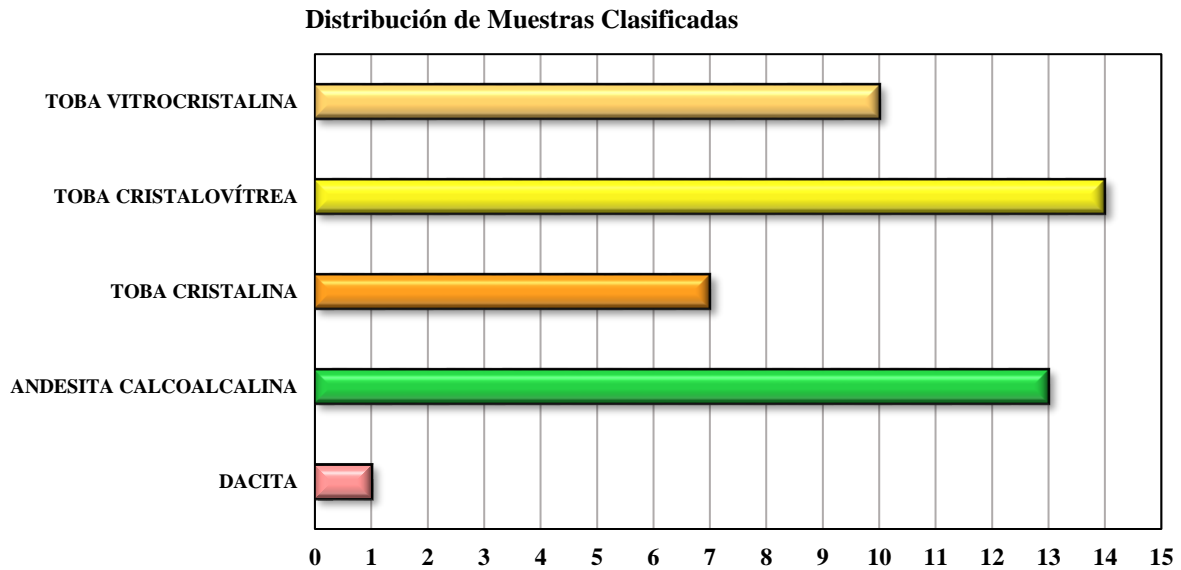


Figura 20. Distribución de las muestras clasificadas en el gráfico de barras mostrando acorde a su clasificación la cantidad que le corresponde: Dacita (01 Und.), Andesita Calcoalcalina (13 Und.), Toba Cristalina (07 Und.), Toba Cristalovítrea (14 Und.), Toba Vitrocristalina (10 Und.).

Para tener un respaldo técnico y especializado de la descripción de las rocas se ha tenido el apoyo del INGEMMET (Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico), institución a la cual se le brindó 06 muestras representativas del muestreo total realizado: MGC-07, MGC-11, MGC-13, MGC-14, MGC-17, MGC-20. A continuación se muestra la descripción macroscópica realizada por dicha institución:



Figura 21. MGC-07: Roca ígnea compacta de naturaleza volcánica, de color gris parduzco, con textura porfirítica. Está compuesta por fenocristales de plagioclasas y minerales ferromagnesianos, dispuestos sobre una matriz afanítica vítrea. La roca posee densidad media a baja y dureza media, ausente de magnetismo. Fuente: INGEMMET, 2021.



Figura 22. MGC-11: Roca ígnea (volcánica-efusiva), compacta de naturaleza volcánica, de color gris medio con tonalidad parduzca, con textura porfírica. Está compuesta por fenocristales de cuarzo, plagioclasas y escasos minerales ferromagnesianos, dispuestos sobre una matriz afanítica vítrea, se aprecian estructuras vítreas alargadas. La roca posee densidad media a baja y dureza media. Ausente de magnetismo. Fuente: INGEMMET, 2021.



Figura 23. MGC-13: Roca ígnea (volcánica-piroclástica), compacta de naturaleza volcánica, de color blanco grisáceo, con textura porfírica. Está compuesta por fenocristales de cuarzo, plagioclasas y escasos minerales ferromagnesianos, dispuestos sobre una matriz afanítica vítrea. La roca posee densidad media a baja y dureza media, ausente de magnetismo. Fuente: INGEMMET, 2021.



Figura 24. MGC-14: Roca ígnea (volcánica-efusiva), compacta, de color gris pardo con tonalidad rosácea, de textura porfirítica. Está conformada por fenocristales de feldespatos y ferromagnesianos, distribuidos en matriz afanítica impregnadas por óxidos de hierro. La muestra presenta densidad y dureza media, con magnetismo muy débil. Fuente: INGEMMET, 2021.



Figura 25. MGC-17: Roca ígnea (volcánica-efusiva), compacta, de color gris oscuro, de textura porfirítica. Está conformada por fenocristales de feldespatos y moldes de cristales reemplazados por carbonatos, en una matriz afanítica. La roca presenta dureza y densidad media, con magnetismo débil; además con débil efervescencia en moldes de ferromagnesianos. Fuente: INGEMMET, 2021.


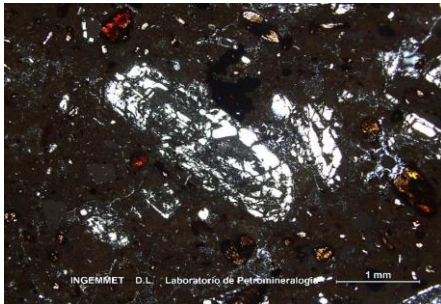


Figura 26. MGC-20: Roca ígnea (volcánica-piroclástica), compacta, de color pardo con tonalidad amarillenta, de textura fragmental. Están conformada por cristales y fragmento de cristales de feldespatos y ferromagnesianos, en una matriz afanítica. La muestra presenta densidad baja, dureza media y con magnetismo puntual. Fuente: INGEMMET, 2021.

4.2. CARACTERIZACIÓN PETROGRÁFICA MICROSCÓPICA


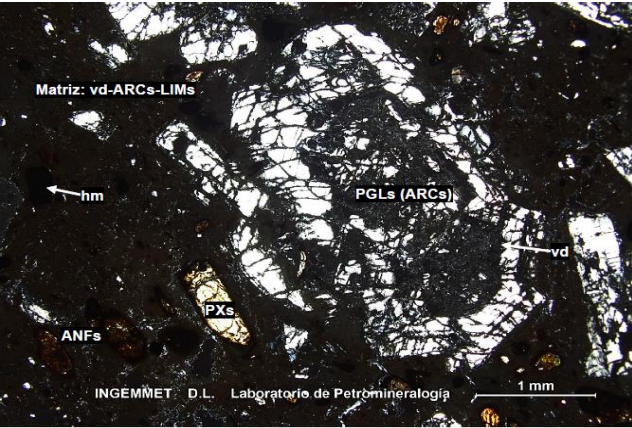
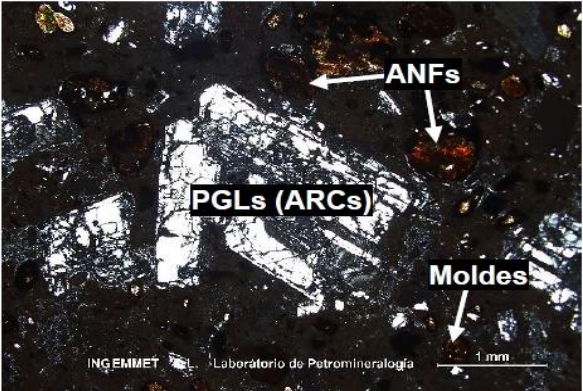
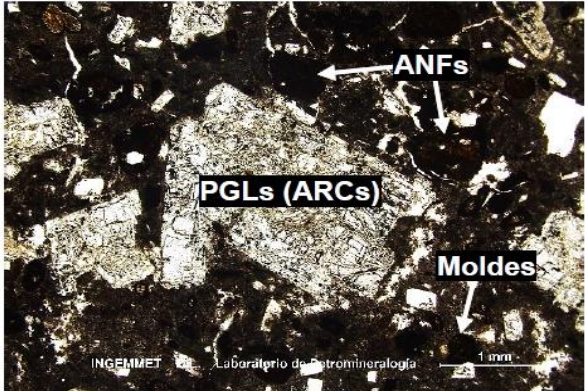
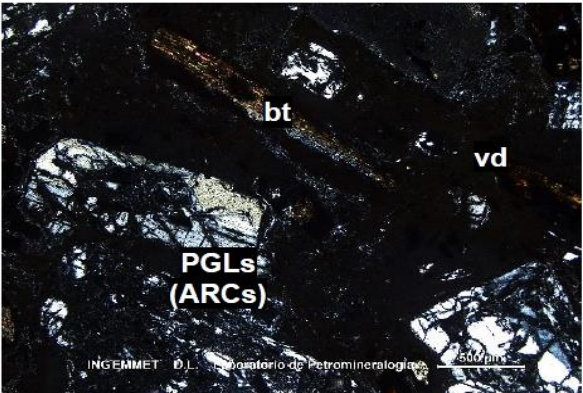
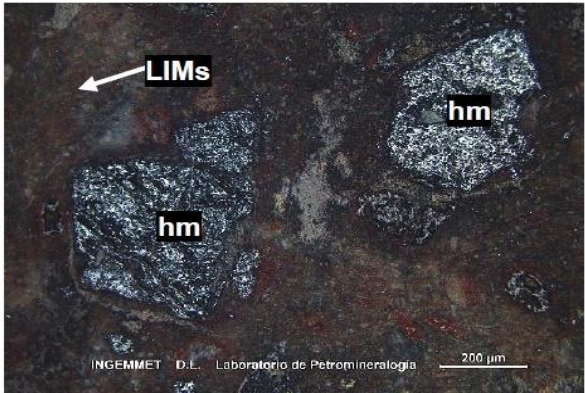
Acorde a lo mencionado en el ítem anterior (caracterización petrográfica macroscópica), para tener un respaldo técnico y especializado de la descripción de las rocas se ha tenido el apoyo del INGEMMET (Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico), institución a la cual se le envió 06 muestras representativas del muestreo total realizado: MGC-07, MGC-11, MGC-13, MGC-14, MGC-17, MGC-20; en las siguientes líneas se plasmará la descripción microscópica realizada por dicha institución:

Cuadro 1. Descripción Microscópica y Mineralógica para la muestra MGC-07.

		ESTUDIO PETROMINERALÓGICO (DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA Y MINERALÓGICA)		
I. DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA				
MUESTRA: MGC-07		NXs: Nícoles Cruzados		
<p>Roca ígnea volcánica con textura porfirítica, está conformada por fenocristales de plagioclasas, anfíboles, piroxenos y biotita, además de moldes de ferromagnesianos reemplazados por agregados micáceos e impregnaciones de limonitas. La matriz es vítrea con escasos microcristales de plagioclasas, la matriz se encuentra desvitrificada a arcillas, se presentan impregnaciones de limonitas, además de micas en intersticios.</p>				
II. DESCRIPCIÓN MINERALÓGICA				
		MINERAL	TAMAÑO (mm)	%
CRISTALES	Esenciales	Plagioclasas , fenocristales con formas subhedrales y hábitos prismáticos, presentes maclados y algunos zonados, fuertemente microfracturados. Se encuentran alterados a arcillas y cloritas. Algunos poseen bordes corroídos por la matriz vítrea y también a modo de parches dentro de los cristales.	≤ 2.80	25
	Accesorios	Moldes de ferromagnesianos , se presentan con formas subangulosas, algunas con bordes subredondeados relictos de hábitos tabulares, en ocasiones se aprecian con hábitos rómbicos. Están totalmente reemplazados por agregados de cloritas, inclusiones de hematita e impregnaciones de limonitas.	≤ 2.56	-
		Anfíboles , cristales con formas subhedrales y hábitos prismáticos a tabulares, ligeramente microfracturados, se encuentran alterados a cloritas y con impregnaciones de limonitas.	≤ 2.15	4
		Hematita , cristales con formas anhedrales con bordes subredondeados, se presentan como inclusiones en moldes de ferromagnesianos y diseminados en intersticios de la matriz.	≤ 0.73	3
		Piroxenos , cristales con formas anhedrales y bordes subredondeados, algunas subhedrales con hábitos prismáticos, muy microfracturados, con presencia de agregados de cloritas en sus fracturas, además presencia de limonitas hacia sus bordes.	≤ 1.52	3
		Biotita , cristales con formas subhedrales y con hábitos tabulares, están siendo alterados débilmente a cloritas y se aprecian con impregnaciones de limonitas.	≤ 1.68	1
MATRIZ	Vidrio , agregados criptocristalinos presentes como constituyente principal de la matriz, se encuentran desvitrificados a arcillas. Por sectores se aprecian reabsorbiendo bordes de cristales de cuarzo.		-	43
	Plagioclasas , microcristales con formas subhedrales y hábitos tabulares, algunos con ligero maclado, se aprecian en intersticios a modo de relictos.		≤ 0.15	2
LÍTICOS	No presenta.		-	-
SECUNDARIOS	Arcillas , agregados criptocristalinos debidos principalmente a la desvitrificación de la matriz vítrea, en menor proporción por alteración de las plagioclasas.		≤ 0.004	10
	Limonitas , agregados criptocristalinos, se producen como impregnaciones en la matriz vítrea, además en moldes de ferromagnesianos, anfíboles y bordes de piroxenos.		≤ 0.004	5
	Cloritas , agregados microfibrosos presentes como relleno de los moldes de ferromagnesianos, alteración de anfíboles y se aprecian en fracturas de piroxenos.		≤ 0.11	4



Fuente: INGEMMET (2021).

Cuadro 2. Características Texturales y de Alteración - Descripción de Fotomicrografías para la muestra MGC-07.

 ESTUDIO PETROMINERALÓGICO (CARACTERÍSTICAS TEXTURALES Y DE ALTERACIÓN - DESCRIPCIÓN DE FOTOMICROGRAFÍAS)				
I. CARACTERÍSTICAS TEXTURALES Y DE ALTERACIÓN				
MUESTRA: MGC-07	NXs: Nícoles Cruzados			
Roca ígnea volcánica con textura porfirítica, se encuentra conformada por plagioclasas alteradas a arcillas: PGLs (ARCs) con parches de vidrio: vd, piroxenos: PXs, anfíboles: ANFs y hematita diseminada: hm, sobre una matriz vítrea desvitrificada a arcillas con impregnaciones de limonitas: vd-ARCs-LIMs.				
TEXTURAS PRINCIPALES				
Porfirítica en matriz vítrea				
SECUENCIA DE FORMACIÓN PROBABLE				
Hematita → Limonitas				
GRADO DE ALTERACIÓN				
Argilización, oxidación y cloritización.	Incipiente (Trazas)	Débil (1% - 11%)	Moderada (12% - 49%)	Intensa (> 50%)
		X		
				
II. DESCRIPCIÓN DE FOTOMICROGRAFÍAS				
 <p style="text-align: center;">1</p>	 <p style="text-align: center;">2</p>			
 <p style="text-align: center;">3</p>	 <p style="text-align: center;">4</p>			
1 y 2. Cristales de plagioclasas levemente alterados a arcillas: PGLs (ARCs), anfíboles: ANFs y moldes de ferromagnesianos. Vista en luz transmitida nícoles cruzados y nícoles paralelos respectivamente. 3. Cristales de biotita con hábitos tabulares: bt, plagioclasas alteradas a arcillas: PGLs (ARCs), sobre matriz vítrea. 4. Detalle de cristales de hematita diseminados: hm sobre la matriz vítrea con impregnaciones de limonitas: LIMs. Luz reflejada nícoles paralelos.				
COMENTARIOS / OBSERVACIONES				
La clasificación está basada a composición modal de los cristales. Se recomienda revisar el análisis químico para determinar la composición del vidrio, la cual puede modificar o confirmar la clasificación modal.				


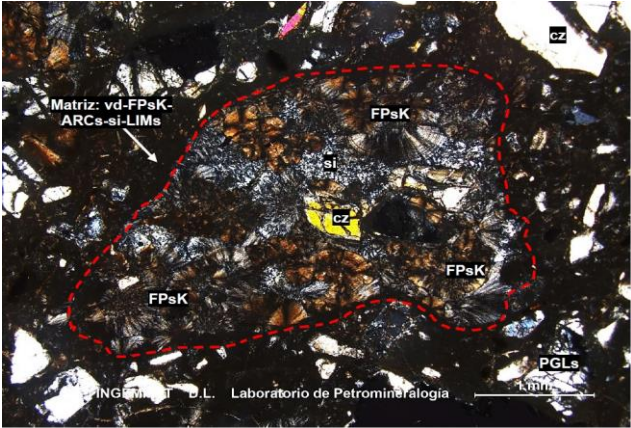
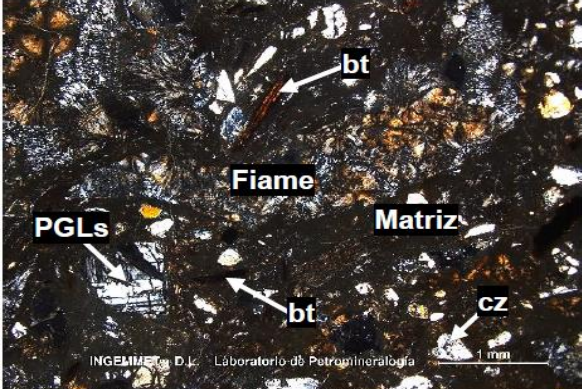
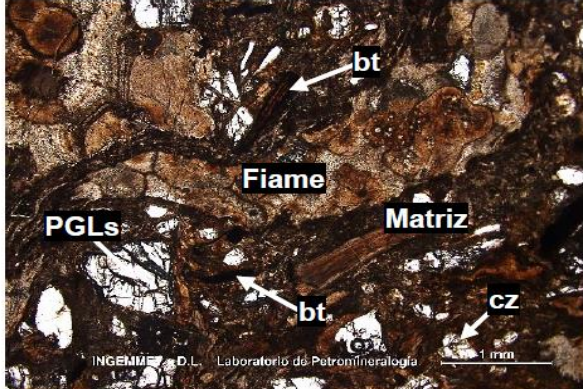
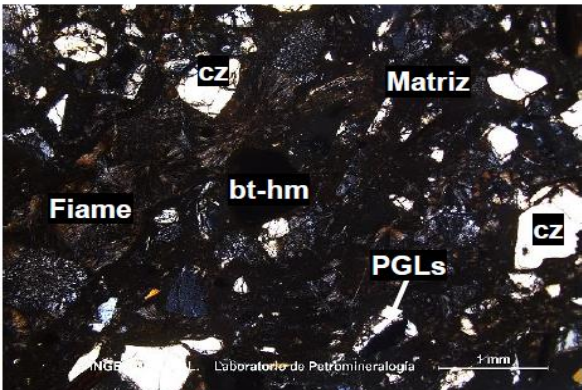
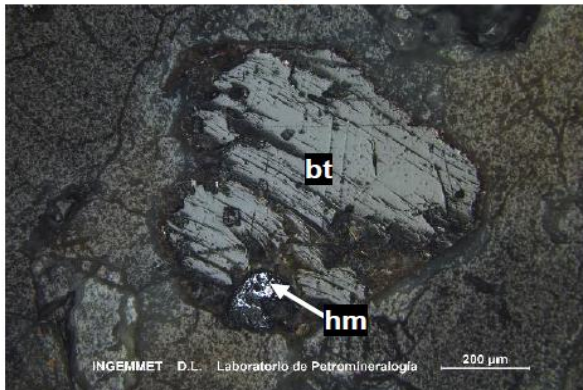
Fuente: INGEMMET (2021).

Cuadro 3. Descripción Microscópica y Mineralógica para la muestra MGC-11.

		ESTUDIO PETROMINERALÓGICO (DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA Y MINERALÓGICA)		
I. DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA				
MUESTRA: MGC-11		NXs: Nícoles Cruzados		
<p>Roca ígnea volcánica con textura porfirítica, está conformada por fenocristales de cuarzo, plagioclasas y biotita, además se aprecian fiames alargados conformados por agregados esferulíticos de feldespatos potásicos y sílice. La matriz es vítrea, se encuentra desvitrificada principalmente a feldespatos potásicos, arcillas y sílice, se presentan impregnaciones de limonitas.</p>				
II. DESCRIPCIÓN MINERALÓGICA				
		MINERAL	TAMAÑO (mm)	%
CRISTALES	Esenciales	Cuarzo , cristales con formas subhedrales a anhedrales, con hábitos prismáticos, algunos con bordes reabsorbidos por la matriz vítrea, se aprecian microfracturados. En ocasiones se pueden observar dentro de fiames junto con feldespatos potásicos, arcillas y sílice.	≤ 5.92	13
		Plagioclasas , cristales con formas subhedrales con hábitos prismáticos, maclados y algunos con leve zonación, microfracturados, por sectores se aprecian a modo de fragmentos. Se encuentran incipientemente alterados a arcillas.	≤ 2.15	6
	Accesorios	Fiames , irregulares principalmente alargadas, están conformadas por agregados de feldespatos potásicos, en su mayoría son agregados esferulíticos radiados, también con sílice. En algunos casos se encuentran cristales de cuarzo, plagioclasas, biotita y ocasionalmente con diseminados de hematita.	≤ 11.64	-
		Biotita , cristales con formas subhedrales con hábitos tabulares alargados, ocurren con impregnaciones de limonitas.	≤ 1.20	2
		Hematita , cristales con formas anhedrales, presentes como diseminados en la matriz vítrea, ocasionalmente como inclusiones en fiames.	≤ 0.38	1
MATRIZ	Vidrio , agregados criptocristalinos, se encuentran desvitrificados casi en su totalidad a feldespatos potásicos, además a arcillas y sílice. Se aprecian reabsorbiendo bordes de cristales de cuarzo.	-	5	
LÍTICOS	No presenta.	-	-	
SECUNDARIOS	Feldespatos potásicos , agregados de cristales con formas anhedrales, principalmente como agregados esferulíticos, debidos a la desvitrificación de la matriz vítrea, además presente en fiames junto con sílice y arcillas.	≤ 1.16	59	
	Arcillas , agregados criptocristalinos debidos principalmente a la desvitrificación de la matriz vítrea.	≤ 0.004	6	
	Sílice , agregados microcristalinos a criptocristalinos, se aprecian en intersticios debidos a la desvitrificación, junto con feldespatos potásicos y arcillas en fiames.	≤ 0.13	6	
	Limonitas , agregados criptocristalinos, se aprecian como producto de impregnaciones en biotita y por sectores también en la matriz vítrea.	≤ 0.004	2	
	Goethita , cristales con formas anhedrales, se encuentran como relleno en intersticios de la matriz.	≤ 0.12	Traza	


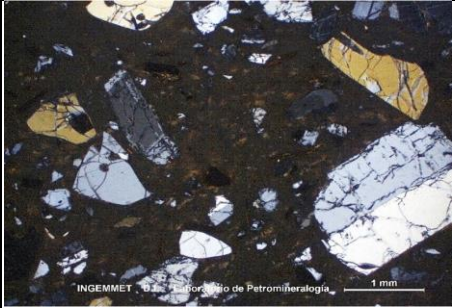
Fuente: INGEMMET (2021).

Cuadro 4. Características Texturales y de Alteración - Descripción de Fotomicrografías para la muestra MGC-11.

 ESTUDIO PETROMINERALÓGICO (CARACTERÍSTICAS TEXTURALES Y DE ALTERACIÓN - DESCRIPCIÓN DE FOTOMICROGRAFÍAS)					
L. CARACTERÍSTICAS TEXTURALES Y DE ALTERACIÓN					
MUESTRA: MGC-11	NXs: Nícoles Cruzados				
Roca ígnea volcánica con textura porfirítica, se encuentra conformada por cristales de cuarzo: cz y plagioclasas microfracturadas: PGLs; además de fiames constituidas principalmente por agregados esferulíticos de feldespatos potásicos: FPsk, junto con sílice: si y ocasionalmente con cristales de cuarzo: cz. Se encuentran dispuestos sobre una matriz vítrea desvitrificada a arcillas con impregnaciones de limonitas: vd- FPsk-ARCs-si-LIMs.					
TEXTURAS PRINCIPALES					
Porfirítica en matriz vítrea					
SECUENCIA DE FORMACIÓN PROBABLE					
Hematita → Goethita → Limonita					
GRADO DE ALTERACIÓN					
(1) Feldespatización. Argilización, silícea y oxidación.	(2)	Incipiente (Trazas)	Débil (1% - 11%)	Moderada (12% - 49%)	Intensa (> 50%)
			(2)		(1)
II. DESCRIPCIÓN DE FOTOMICROGRAFÍAS					
 <p style="text-align: center;">1</p>		 <p style="text-align: center;">2</p>			
 <p style="text-align: center;">3</p>		 <p style="text-align: center;">4</p>			
1 y 2. Detalle de fiames alargados, plagioclasas: PGLs, cuarzo: cz y biotita: bt, sobre matriz vítrea. Vista en luz transmitida nícoles cruzados y nícoles paralelos respectivamente. 3. Cristales de cuarzo microfracturado: cz, plagioclasas: PGLs y biotita con inclusiones de hematita: bt-hm, además de fiames sobre la matriz vítrea. 4. Detalle de hematita: hm como inclusión en biotita: bt. Luz reflejada nícoles paralelos.					
COMENTARIOS / OBSERVACIONES					
La clasificación está basada a composición modal de los cristales. Se recomienda revisar el análisis químico para determinar la composición del vidrio, la cual puede modificar o confirmar la clasificación modal.					


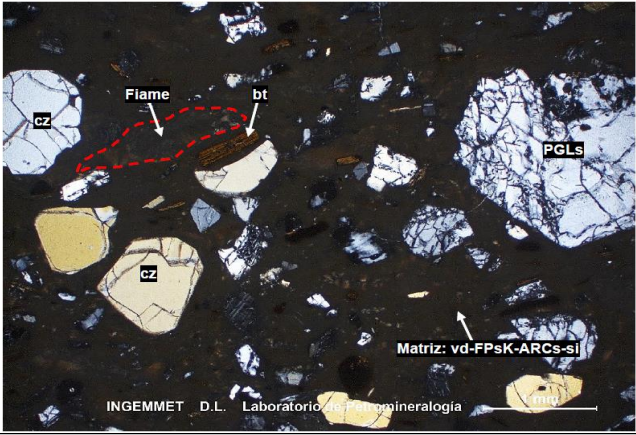
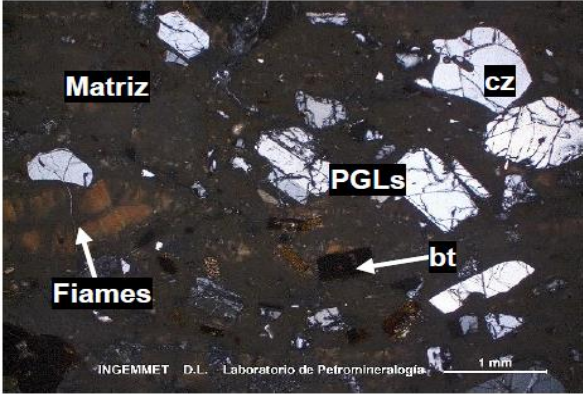
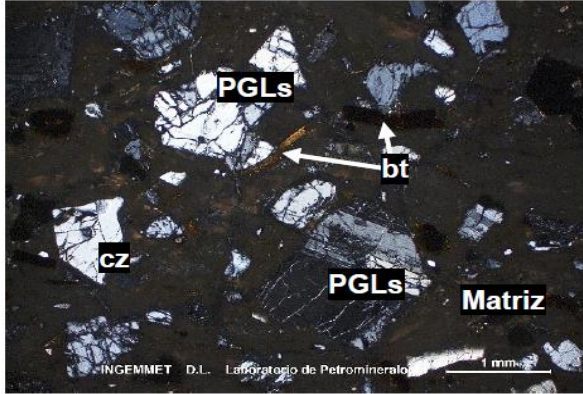
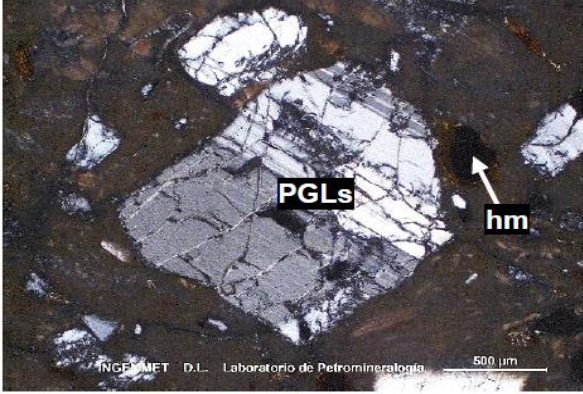
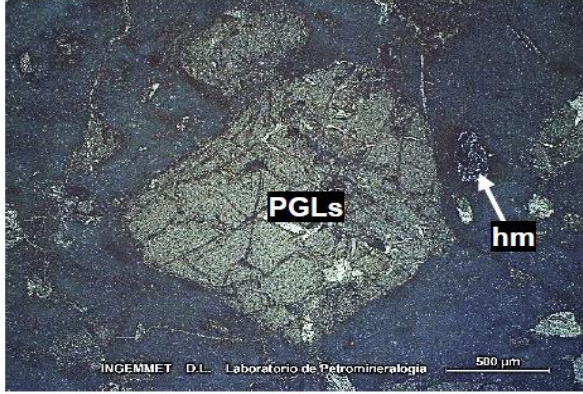
Fuente: INGEMMET (2021).

Cuadro 5. Descripción Microscópica y Mineralógica para la muestra MGC-13.

		ESTUDIO PETROMINERALÓGICO (DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA Y MINERALÓGICA)		
I. DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA				
MUESTRA: MGC-13		NXs: Nícoles Cruzados		
<p>Roca ígnea piroclástica con textura Fragmental, está conformada por fragmentos y cristales de cuarzo, plagioclasas y biotita, trazas de anfíboles y moldes de ferromagnesianos reemplazados por goethita y hematita. Además, se aprecian fiames alargados aparentemente orientados según el flujo de la muestra. La matriz se encuentra desvitrificada principalmente a feldespatos potásicos, arcillas y sílice, se presentan impregnaciones de limonitas.</p>				
II. DESCRIPCIÓN MINERALÓGICA				
		MINERAL	TAMAÑO (mm)	%
CRISTALES	Esenciales	Cuarzo , cristales y fragmentos con formas anhedrales a subhedrales, con bordes subredondeados, se aprecian reabsorbidos por la matriz vítrea, además microfracturados.	≤ 3.88	13
		Plagioclasas , cristales y fragmentos con formas subhedrales y hábitos prismáticos alargados, maclados y zonados, se aprecian microfracturados, algunos con bordes reabsorbidos por la matriz y con parches de vidrio matricial. Se encuentran con incipiente alteración a arcillas.	≤ 2.52	7
	Accesorios	Fiames , con formas irregulares principalmente alargadas, algunos pseudo lenticulares; están conformadas principalmente por agregados esferulíticos de feldespatos potásicos, también con presencia de sílice y arcillas. En algunos casos se encuentran relictos de vidrio de la matriz, además de cristales de cuarzo y plagioclasas.	≤ 9.56	-
		Moldes de ferromagnesianos , con formas subangulosas y relictos de hábitos tabulares, se encuentran completamente reemplazados por goethita y limonitas.	≤ 0.48	-
		Biotita , cristales con formas subhedrales con hábitos tabulares, algunos ligeramente deformados, presentan impregnaciones de limonitas y algunos cristales de goethita a modo de diseminados.	≤ 1.08	3
		Anfíboles , cristales con formas subhedrales, principalmente en sección basal hexagonal, se encuentran con impregnaciones de limonitas y ocasionalmente con presencia de goethita a modo de inclusiones.	≤ 0.63	Traza
		Hematita , cristales con formas anhedrales ocurren a modo de diseminaciones en intersticios de la matriz vítrea.	≤ 0.25	Traza
MATRIZ	Vidrio , agregados criptocristalinos presentes como constituyente de la matriz, se encuentran desvitrificados principalmente a feldespatos potásicos, además a arcillas y sílice. Se aprecian reabsorbiendo bordes de cristales de cuarzo y como parches en algunos cristales de plagioclasas.	-	20	
LÍTICOS	No presenta.	-	-	
SECUNDARIOS	Feldespatos potásicos , agregados de cristales con formas anhedrales, principalmente como agregados esferulíticos, ocurren debido a la desvitrificación de la matriz vítrea, también se presentan como relleno en fiames junto con sílice y arcillas.	≤ 1.40	45	
	Arcillas , agregados criptocristalinos, por la desvitrificación de la matriz junto con feldespatos potásicos y arcillas, en menor proporción por alteración de plagioclasas.	≤ 0.004	7	
	Sílice , agregados microcristalinos, se aprecian en intersticios de la matriz debido a la desvitrificación y junto con feldespatos potásicos y arcillas como relleno en fiames.	≤ 0.11	2	
	Limonitas , agregados criptocristalinos, se aprecian como producto de impregnaciones en biotita y anfíboles además reemplazando moldes de ferromagnesianos.	≤ 0.004	2	
	Goethita , cristales con formas anhedrales, se encuentran como reemplazando moldes de ferromagnesianos junto con limonitas, además como inclusiones en algunos cristales de biotita y anfíboles.	≤ 0.52	1	


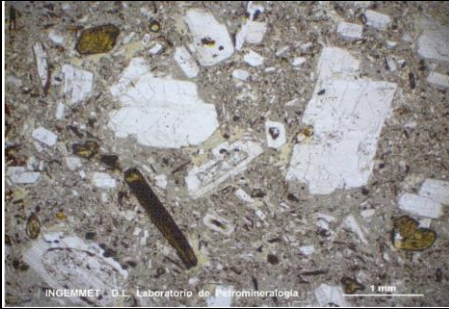
Fuente: INGEMMET (2021).

Cuadro 6. Características Texturales y de Alteración - Descripción de Fotomicrografías para la muestra MGC-13.

		ESTUDIO PETROMINERALÓGICO (CARACTERÍSTICAS TEXTURALES Y DE ALTERACIÓN - DESCRIPCIÓN DE FOTOMICROGRAFÍAS)			
L. CARACTERÍSTICAS TEXTURALES Y DE ALTERACIÓN					
MUESTRA: MGC-13		NXs: Nícoles Cruzados			
<p>Roca ígnea piroclástica con textura porfírica, se encuentra conformada por cristales de cuarzo microfracturados: cz y plagioclasas macladas, zonadas y fuertemente microfracturadas: PGLs; también se aprecia biotita: bt y algunos fiames alargados. Ocurren dispuestos sobre una matriz vítrea desvitrificada a feldespatos potásicos, arcillas y sílice: vd-FPsK-ARCs-si.</p>					
TEXTURAS PRINCIPALES					
Fragmental					
SECUENCIA DE FORMACIÓN PROBABLE					
Hematita → Goethita → Limonita					
GRADO DE ALTERACIÓN					
(1) Feldespatización. Argilización, sílice y oxidación.	(2)	Incipiente (Trazas)	Débil (1% - 11%)	Moderada (12% - 49%)	Intensa (> 50%)
			(2)	(1)	
II. DESCRIPCIÓN DE FOTOMICROGRAFÍAS					
					
1		2			
					
3		4			
<p>1 y 2. Cristales de plagioclasas: PGLs, cuarzo: cz, biotita: bt algunas deformadas, además de fiames, dispuestos sobre una matriz vítrea. 3 y 4. Cristales de anfíboles I: ANFs I, siendo reemplazados por agregados de anfíboles II: ANFs II. Vista en luz transmitida nícoles cruzados y luz reflejada nícoles paralelos respectivamente.</p>					
COMENTARIOS / OBSERVACIONES					
Sin observaciones.					


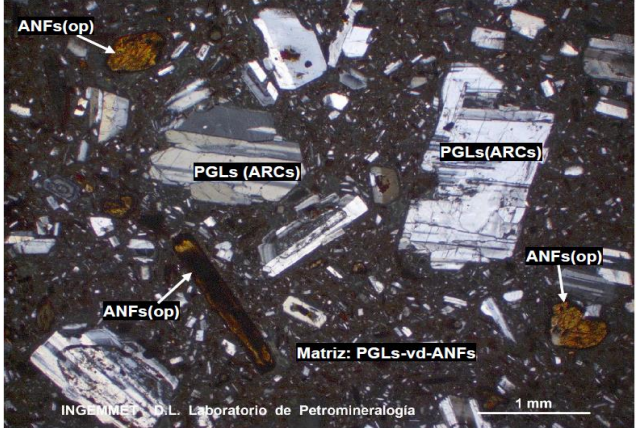
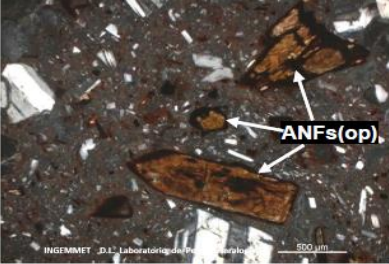

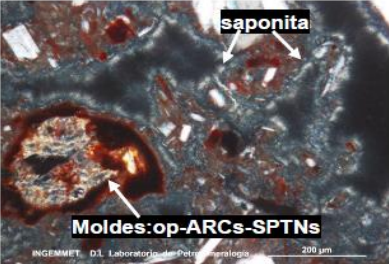
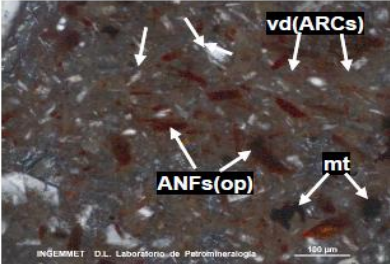
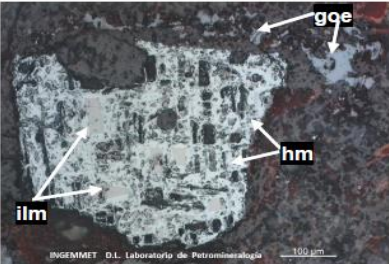
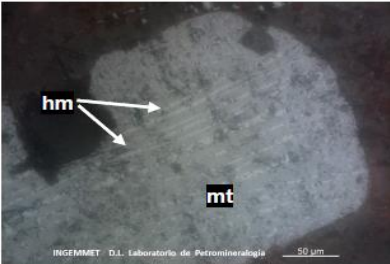
Fuente: INGEMMET (2021).

Cuadro 7. Descripción Microscópica y Mineralógica para la muestra MGC-14.

		ESTUDIO PETROMINERALÓGICO (DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA Y MINERALÓGICA)		
I. DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA				
MUESTRA: MGC-14		NXs: Nícoles Cruzados		
<p>Roca ígnea volcánica de textura porfírica, conformada por cristales de plagioclasas, anfíboles y moldes de ferromagnesianos, con diseminación de magnetita e ilmenita. La matriz microcristalina constituida por plagioclasas, vidrio volcánico y anfíboles. Como minerales secundarios se presentan arcillas, opacita, hematita, goethita, limonitas, serpentinas y saponita.</p>				
II. DESCRIPCIÓN MINERALÓGICA				
		MINERAL	TAMAÑO (mm)	%
CRISTALES	Esenciales	Plagioclasas , cristales de formas subhedrales a euhedrales, prismáticos y tabulares; ocurren maclados, microfracturados, algunos con zonación concéntrica y de bordes corroídos por la matriz. Por sectores están agrupados formando textura glomeroporfídica. Se encuentran débilmente alterados a arcillas. Algunos poseen inclusiones de apatito, hematita, magnetita y de vidrio volcánico mostrando textura sieve.	≤ 2.77	30
		Anfíboles , cristales de formas subhedrales, prismáticos y tabulares; ocurren microfracturados, algunos con macla simple y de bordes reabsorbidos por la matriz. Por sectores con textura glomeroporfídica junto con magnetita y plagioclasas. Se encuentran alterados a opacita desde sus bordes. Algunos presentan inclusiones de magnetita. Además, presentan impregnaciones de limonitas y goethita.	≤ 1.90	10
	Accesorios	Moldes de ferromagnesianos , de formas subhedrales, prismáticos, se encuentran completamente reemplazados desde sus bordes por opacita, la parte central por serpentinas y arcillas.	≤ 1.10	-
		Magnetita , cristales de formas anhedrales a subhedrales, ocurren diseminados en toda la muestra. Se encuentran débilmente alterados por lamelas de hematita, algunos por goethita. Algunos como inclusiones en cristales de plagioclasas y anfíboles.	≤ 0.45	1
		Ilmenita , cristales de formas anhedrales, ocurren diseminados y generalmente como relictos alterados por agregados de hematita.	≤ 0.32	1
		Apatito , microcristales de formas subhedrales a euhedrales, se encuentran como inclusiones en algunos cristales de plagioclasas y anfíboles. Por sectores ocurren dispersos en la matriz con tamaños de hasta 0,25 mm.	≤ 0.10	Traza
MATRIZ	Plagioclasas , microcristales con formas subhedrales, microtabulares y aciculares, algunos maclados; presentan diversidad tamaños formando textura seriada. Se encuentran englobados por agregados de vidrio volcánico. Por sectores presentan impregnaciones de limonitas.	≤ 0.15	22	
	Vidrio volcánico , agregados amorfos, se encuentran como constituyente de la matriz, que engloban microcristales de plagioclasas y anfíboles. Se encuentran desvitrificados a arcillas.	-	12	
	Anfíboles , microcristales de formas subhedrales, prismáticos cortos; se encuentran alterados por agregados de opacita. Están englobados por vidrio volcánico.	≤ 0.18	7	
LÍTICOS	No presenta.	-	-	
SECUNDARIOS	Arcillas , agregados criptocristalinos, se encuentran como producto de alteración de cristales de plagioclasas. Principalmente producto de desvitrificación en la matriz. Por sectores relleno de moldes de ferromagnesianos y oquedades en la matriz.	≤ 0.004	7	
	Opacita , agregados criptocristalinos, ocurren como principal producto de alteración de anfíboles, principalmente en la matriz. Por sectores reemplazan moldes de ferromagnesianos.	≤ 0.004	4	
	Hematita , ocurren como pseudomorfos por alteración de cristales de ilmenita, también como agregados lamelares que alteran a magnetita. Además, se encuentran alterados por goethita y limonitas.	≤ 0.05	2	
	Goethita , agregados criptocristalinos, se encuentran como alteración de hematita y algunos cristales de magnetita, por sectores como parches en algunos cristales de anfíboles y plagioclasas.	≤ 0.004	1	
	Serpentinas , agregados microfibrosos, se encuentran como reemplazamiento de moldes de ferromagnesianos, junto con arcillas y opacita.	≤ 0.008	1	
	Limonitas , agregados criptocristalinos, se encuentran como impregnación de toda la matriz, así también de algunos cristales de plagioclasas y anfíboles.	≤ 0.004	1	
	Saponita , agregados criptocristalinos a microfibrosos, ocurren junto con arcillas, relleno de oquedades irregulares en la matriz.	≤ 0.014	1	


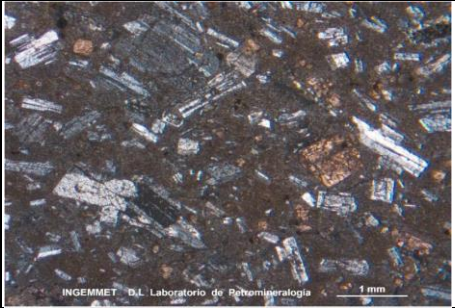
Fuente: INGEMMET (2021).

Cuadro 8. Características Texturales y de Alteración - Descripción de Fotomicrografías para la muestra MGC-14.

		ESTUDIO PETROMINERALÓGICO (CARACTERÍSTICAS TEXTURALES Y DE ALTERACIÓN - DESCRIPCIÓN DE FOTOMICROGRAFÍAS)			
L. CARACTERÍSTICAS TEXTURALES Y DE ALTERACIÓN					
MUESTRA: MGC-14		NXs: Nícoles Cruzados			
Cristales de plagioclasas alteradas a arcillas: PGLs (ARCs), anfíboles alterados a opacita: ANFs(op); distribuidos en una matriz microcristalina conformada por plagioclasas, vidrio volcánico y anfíboles: Matriz: PGLs-vd-ANFs.					
TEXTURAS PRINCIPALES					
Porfirítica					
SECUENCIA DE FORMACIÓN PROBABLE					
Magnetita → Ilmenita → Hematita → Goethita → Limonitas					
GRADO DE ALTERACIÓN					
Desvitrificación y oxidación.	Incipiente (Trazas)	Débil (1% - 11%)	Moderada (12% - 49%)	Intensa (> 50%)	
			X		
II. DESCRIPCIÓN DE FOTOMICROGRAFÍAS					
					
					
					
1. Cristales de anfíboles alterados a opacita: ANFs(op). 2. Cristales de plagioclasas alteradas a arcillas: PGLs (ARCs), con textura glomeroporfidica. 3. Moldes de ferromagnesianos reemplazados por opacita, arcillas y serpentinas: op-ARCs-SPTNs. 4. Detalle de la matriz conformada por cristales de plagioclasas: PGLs, vidrio volcánico: vd (ARCs), y anfíboles alterados a opacita: ANFs(op). Diseminación de magnetita: mt. 5. Cristales de ilmenita: ilm como relictos completamente alterados por hematita: hm. 6. Cristal de magnetita alterado por lamelas de hematita: mt(hm).					
COMENTARIOS / OBSERVACIONES					
Sin observaciones.					


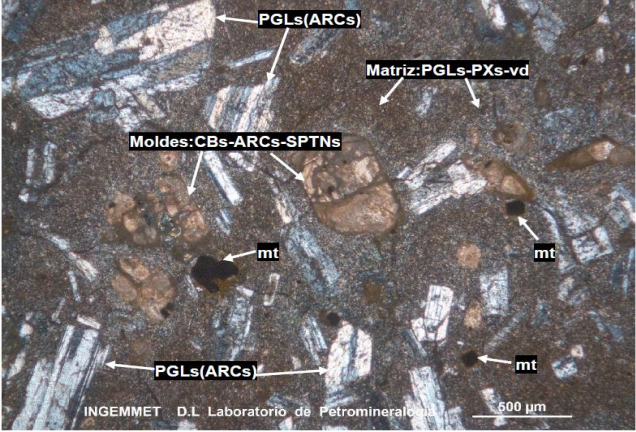

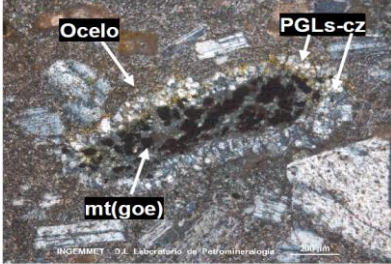
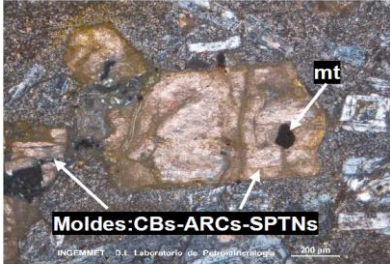

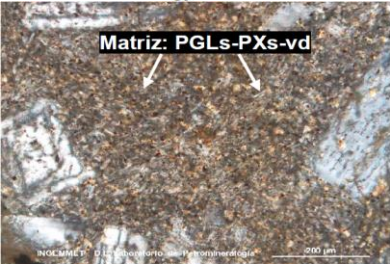

Fuente: INGEMMET (2021).

Cuadro 9. Descripción Microscópica y Mineralógica para la muestra MGC-17.

		ESTUDIO PETROMINERALÓGICO (DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA Y MINERALÓGICA)		
I. DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA				
MUESTRA: MGC-17		NXs: Nícoles Cruzados		
<p>Roca ígnea volcánica de textura porfírica, conformada por cristales de plagioclasas y moldes de ferromagnesianos reemplazados por carbonatos, con diseminación de magnetita. La matriz está constituida por plagioclasas, piroxenos y vidrio volcánico. Como minerales secundarios presenta carbonatos, arcillas, serpentinas y goethita.</p>				
II. DESCRIPCIÓN MINERALÓGICA				
		MINERAL	TAMAÑO (mm)	%
CRISTALES	Esenciales	Plagioclasas , cristales de formas subhedrales a euhedrales, prismáticos y tabulares, ocurren microfracturados, algunos zonados y con bordes reabsorbidos por la matriz. Por sectores como aglomerados junto con moldes de ferromagnesianos mostrando textura glomeroporfídica. Algunos presentan inclusiones de magnetita y otros de vidrio volcánico mostrando textura sieve. Además, presentan diversos tamaños mostrando textura seriada. Con incipiente alteración a arcillas.	≤ 3.95	42
		Moldes de ferromagnesianos , de formas subhedrales, prismáticos, se encuentran reemplazados principalmente por agregados de carbonatos, y en menor proporción por arcillas y serpentinas según sus bordes y fracturas. Algunos ocurren agrupados mostrando textura glomeroporfídica. Con inclusiones de magnetita. Según sus formas pertenecen a posibles piroxenos y/o olivinos.	≤ 1.75	-
	Accesorios	Magnetita , cristales de formas anhedrales a subhedrales, ocurren diseminados en toda la muestra, algunos como inclusiones en cristales de plagioclasas y moldes de ferromagnesianos. Además, se hallan con mayor proporción en la matriz, con tamaños menores a 0,03 mm.	≤ 0.23	3
		Apatito , microcristales de formas euhedrales, prismáticos cortos, como inclusiones en algunos cristales de plagioclasas.	≤ 0.01	Traza
		Cuarzo , agregados microgranulares, se encuentran conformando ocelos, junto con plagioclasas que rodean agregados de magnetita alterada por goethita.	≤ 0.05	Traza
MATRIZ	Plagioclasas , microlitos con formas subhedrales, aciculares; se encuentran ligeramente orientados según la dirección de flujo. De forma intersticial presentan agregados microgranulares de piroxenos y agregados amorfos de vidrio volcánico desvitrificado. Con incipiente alteración a arcillas.	≤ 0.02	24	
	Piroxenos , agregados microgranulares, con formas anhedrales, ocurren en intersticios de plagioclasas mostrando textura intergranular. De forma intersticial presentan agregados de vidrio volcánico.	≤ 0.01	10	
	Vidrio volcánico , agregados amorfos, ocurren como relleno de intersticios de plagioclasas y piroxenos. Se encuentran desvitrificados a arcillas.	-	5	
LÍTICOS	Posible diorita, de formas subangulosas, con sus bordes irregulares corroídos por la matriz, de textura granular hipidiomórfica, conformada por plagioclasas ($\leq 0,04\text{mm}$) anhedrales a subhedrales y moldes de ferromagnesianos ($\leq 0,03\text{mm}$) reemplazados por serpentinas, además con diseminación de magnetita.	≤ 2.13	1	
SECUNDARIOS	Carbonatos , agregados de formas anhedrales, se encuentran como reemplazamiento selectivo de moldes de ferromagnesianos, en ocasiones junto con serpentinas y arcillas. Presentan inclusiones de magnetita. Algunos con impregnaciones de goethita. Ocasionalmente se hallan relleno de fracturas discontinuas en la matriz.	≤ 0.03	13	
	Arcillas , agregados criptocristalinos, ocurren como alteración de plagioclasas, reemplazan moldes de ferromagnesianos junto con serpentinas. Además, son producto de desvitrificación.	≤ 0.004	2	
	Serpentinas , agregados microfibrosos, se encuentran junto con arcillas como producto de alteración en moldes de ferromagnesianos según sus bordes y fracturas.	≤ 0.016	Traza	
	Goethita , agregados de formas irregulares, ocurren como impregnación en algunos moldes de ferromagnesianos. También como producto de alteración de magnetita en ocelos.	≤ 0.004	Traza	



Fuente: INGEMMET (2021).

Cuadro 10. Características Texturales y de Alteración - Descripción de Fotomicrografías para la muestra MGC-17.

 ESTUDIO PETROMINERALÓGICO (CARACTERÍSTICAS TEXTURALES Y DE ALTERACIÓN - DESCRIPCIÓN DE FOTOMICROGRAFÍAS)				
L. CARACTERÍSTICAS TEXTURALES Y DE ALTERACIÓN				
MUESTRA: MGC-17	NXs: Nícoles Cruzados			
Cristales de plagioclasas alteradas a arcillas: PGLs (ARCs), moldes de ferromagnesianos reemplazados por carbonatos, arcillas y serpentinas: Moldes: CBs-ARCs-SPTNs, con diseminación de magnetita: mt; en matriz de plagioclasas, piroxenos y vidrio volcánico: Matriz: PGLs-PXs-vd.				
TEXTURAS PRINCIPALES				
Porfírica, con matriz intergranular e intersecal				
SECUENCIA DE FORMACIÓN PROBABLE				
Magnetita → Goethita				
GRADO DE ALTERACIÓN				
(1) Carbonatización. (2) Argilización. (3) Oxidación.	Incipiente (Trazas)	Débil (1% - 11%)	Moderada (12% - 49%)	Intensa (> 50%)
	(3)	(2)	(1)	
				
II. DESCRIPCIÓN DE FOTOMICROGRAFÍAS				
				
				
				
				
				
				
1. Lítico conformado por plagioclasas, moldes y magnetita: Lítico: PGLs-Moldes-mt. 2. Detalle un oculo conformado por agregados de magnetita alterada a goethita: mt(goe), rodeados por agregados de plagioclasas y cuarzo: PGLs-cz. 3. Detalle de moldes de ferromagnesianos reemplazados por carbonatos, arcillas y serpentinas: Moldes: CBs-ARCs-SPTNs, con inclusión de magnetita: mt. 4. Cristales de plagioclasas alteradas a arcillas: PGLs (ARCs) de textura sieve. Fracturas discontinuas rellenas por carbonatos: CBs. 5. Detalle de la matriz intergranular conformada por plagioclasas, piroxenos y vidrio volcánico: Matriz: PGLs- PXs-vd. 6. Cristales de magnetita diseminados y alterados a goethita: mt(goe).				
COMENTARIOS / OBSERVACIONES				
Sin observaciones.				


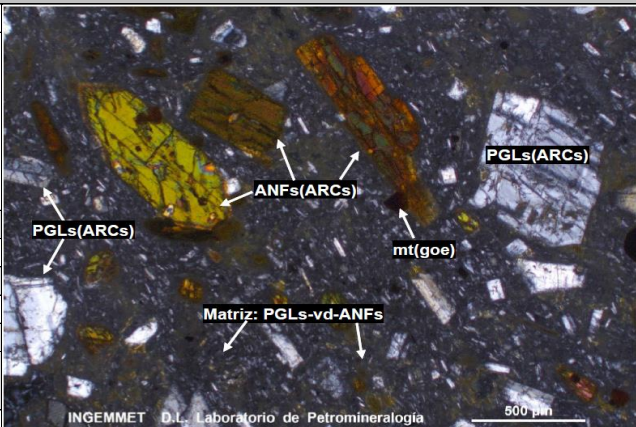
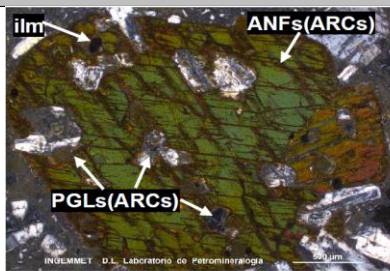
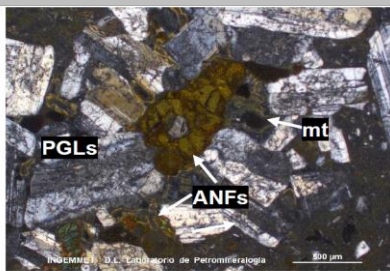
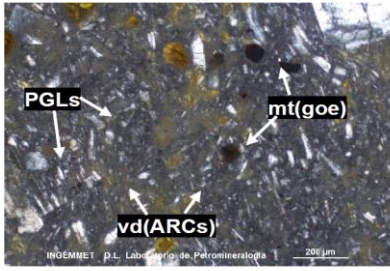
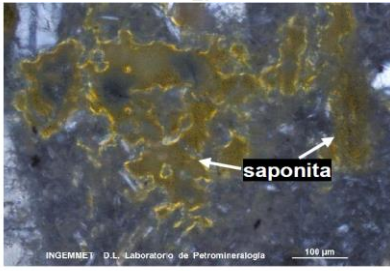


Fuente: INGEMMET (2021).

Cuadro 11. Descripción Microscópica y Mineralógica para la muestra MGC-20.

		ESTUDIO PETROMINERALÓGICO (DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA Y MINERALÓGICA)		
I. DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA				
MUESTRA: MGC-20		NXs: Nícoles Cruzados		
<p>Roca ígnea piroclástica de textura fragmental, conformada por cristales y fragmentos de cristales de plagioclasas, anfíboles y piroxenos, con disseminación de magnetita e ilmenita. La matriz corresponde a ceniza volcánica constituida por fragmentos de cristales de plagioclasas, vidrio volcánico y anfíboles. Como minerales secundarios presenta arcillas, saponita y goethita.</p>				
II. DESCRIPCIÓN MINERALÓGICA				
		MINERAL	TAMAÑO (mm)	%
CRISTALES	Esenciales	Plagioclasas , cristales y fragmentos con formas subhedrales y subangulosas; ocurren con maclas polisintéticas, microfracturas, algunos zonados y con bordes reabsorbidos por la matriz. Presentan incipiente alteración a arcillas. Por sectores están agrupados junto con anfíboles y piroxenos mostrando textura glomeroporfídica. Además, presentan oquedades rellenas por saponita, en ocasiones con inclusiones de ilmenita.	≤ 2.30	30
		Anfíboles , cristales y fragmentos con formas subhedrales y subangulosas; ocurren microfracturados, algunos con macla simple y de bordes reabsorbidos por la matriz, además se encuentran orientados según la dirección de flujo. Presentan incipiente alteración a arcillas según bordes y fracturas. Algunos poseen inclusiones de piroxenos e ilmenita.	≤ 2.13	12
		Piroxenos , cristales y fragmentos con formas subhedrales y subangulosas; ocurren microfracturados. Por sectores junto con plagioclasas y anfíboles mostrando textura glomeroporfídica. Algunos presentan inclusiones de ilmenita.	≤ 1.30	3
	Accesorios	Ilmenita , cristales de formas anhedrales a subhedrales, se encuentran diseminados, algunos como inclusiones de plagioclasas, anfíboles y piroxenos. Algunos están alterados por goethita según sus bordes.	≤ 0.18	0.5
		Magnetita , cristales de formas anhedrales a subhedrales, ocurren diseminados en toda la muestra. Algunos están alterados por goethita según bordes.	≤ 0.30	0.5
		Apatito , microcristales euhedrales, prismáticos, ocurren como inclusiones de algunos cristales de anfíboles.	≤ 0.10	Traza
MATRIZ	Plagioclasas , microcristales y fragmentos de cristales con formas subhedrales y subangulosas, algunos aciculares y maclados, además están ligeramente orientados mostrando textura fluidal. Presentan diversidad de tamaños que pertenecen a ceniza volcánica. Se encuentran englobados por agregados amorfos de vidrio volcánico.	≤ 0.10	24	
	Vidrio volcánico , agregados amorfos, se encuentran como constituyente de la matriz, que engloban a microfragmentos de cristales de plagioclasas y anfíboles. Se encuentran desvitrificados a arcillas.	-	15	
	Anfíboles , fragmentos de cristales de formas subhedrales, prismáticos. Presentan diversidad de tamaños que pertenecen a ceniza volcánica. Se encuentran englobados por agregados amorfos de vidrio volcánico.	≤ 0.15	3	
LÍTICOS	No presenta.	-	-	
SECUNDARIOS	Arcillas , agregados criptocristalinos; producto de desvitrificación en la matriz y por alteración de plagioclasas. Además, están rellenoando oquedades irregulares en la matriz junto con saponita.	≤ 0.004	10	
	Saponita , agregados microfibrosos, se encuentran rellenoando oquedades irregulares y alargadas en la matriz junto con arcillas.	≤ 0.01	2	
	Goethita , agregados criptocristalinos, se encuentran como alteración de magnetita e ilmenita desde sus bordes.	≤ 0.004	Traza	

Fuente: INGEMMET (2021).

Cuadro 12. Características Texturales y de Alteración - Descripción de Fotomicrografías para la muestra MGC-20.

 ESTUDIO PETROMINERALÓGICO (CARACTERÍSTICAS TEXTURALES Y DE ALTERACIÓN - DESCRIPCIÓN DE FOTOMICROGRAFÍAS)				
I. CARACTERÍSTICAS TEXTURALES Y DE ALTERACIÓN				
MUESTRA: MGC-20	NXs: Nícoles Cruzados			
Cristales de plagioclasas alteradas a arcillas: PGLs (ARCs), anfíboles alterados a arcillas: ANFs (ARCs), magnetita alterada a goethita: mt(goe); en una matriz de microcristales de plagioclasas, vidrio volcánico y anfíboles: Matriz: PGLs-vd-ANFs.				
TEXTURAS PRINCIPALES				
Fragmental				
SECUENCIA DE FORMACIÓN PROBABLE				
Magnetita → Goethita				
GRADO DE ALTERACIÓN				
(1) Argilización. (2) Oxidación.	Incipiente (Trazas)	Débil (1% - 11%)	Moderada (12% - 49%)	Intensa (> 50%)
	(2)	(1)		
				
II. DESCRIPCIÓN DE FOTOMICROGRAFÍAS				
 <p>1.</p>	 <p>2.</p>			
 <p>3.</p>	 <p>4.</p>			
 <p>5.</p>	 <p>6.</p>			
1. Líticos y matriz de brecha con cuarzo II-III: cz II-cz III, cortados y reemplazados por vetilla de cuarzo IV: cz IV. 2. Detalle de textura glomeroporfídica conformado por cúmulos de plagioclasas: PGLs y anfíboles: ANFs, asociado con magnetita: mt. 3. Detalle de la matriz conformada por plagioclasas: PGLs, vidrio alterado por arcillas: vd (ARCs), con diseminación de magnetita a goethita: mt(goe). 4. Oquedades irregulares rellenas por saponita. 5. Cristales de ilmenita alterados a goethita: ilm(goe). 6. Cristales de magnetita alterados a goethita: mt(goe).				
COMENTARIOS / OBSERVACIONES				
Sin observaciones.				

Fuente: INGEMMET (2021).

4.3. CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA

El sustento técnico y especializado al igual que para los análisis Petromineralógicos también se realizaron para los análisis Geoquímicos a través del Laboratorio del INGEMMET (Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico), institución a la cual se le brindó 06 muestras representativas (contramuestras de los análisis Petromineralógicos) del muestreo total realizado: MGC-07, MGC-11, MGC-13, MGC-14, MGC-17, MGC-20; en las siguientes líneas se mostrará los métodos de análisis utilizado para la determinación geoquímica:

El análisis geoquímico de las muestras se ha basado en la técnica denominada Espectroscopía de Emisión Atómica con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-OES), esta es una técnica de análisis multi-elemental capaz de determinar y cuantificar la mayoría de los elementos de la tabla periódica, a excepción de C, N, O, H, F, gases nobles, algunas tierras raras y otros elementos poco frecuentes, en concentraciones que van desde % hasta ppb ($\mu\text{g/L}$). Cabe señalar que de acuerdo al tipo de elemento a determinar (Mayores, Menores, entre otros) se utilizará un tratamiento químico y reactivo específico tal y como se muestra en la Tabla 13:

Tabla 13. Métodos de ensayo empleado en el Análisis Geoquímico de Roca Total (18 Elementos Mayores, Menores, LOI).

Análisis de Roca Total (18 Elementos)			
ICP-OES (Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry / Espectroscopía de Emisión Atómica con Plasma de Acoplamiento Inductivo)			
Método Interno	Tratamiento Químico de Muestras	Tipo de Reactivo	Características del Equipo
Roca Total para Elementos Mayores	Fusión con Metaborato de Litio y Dilución Ácida en Agua Regia Invertida	Fundente Ultrapuro y Ácidos Ultrapuros	
Roca Total para Elementos Menores	Digestión con 4 Ácidos: HCl, HNO ₃ , HF, HClO ₄	Ácidos Suprapur	ICP-OES (Radial): Marca Varian, Modelo 735-ES
Método Aplicado para la Determinación de LOI (Loss On Ignition / Pérdida por Ignición)		Termogravimetría	

Fuente: INGEMMET (2021).

Los resultados obtenidos de la técnica ICP-OES se muestran tanto para **elementos mayores** (porcentaje) como para **elementos menores** (partes por millón), cabe resaltar que los primeros deben ser corregidos a valores que estén exceptos de LOI.

Tabla 14. Valores en porcentaje para Elementos Mayores + LOI (Loss On Ignition) de las 06 muestras para el análisis geoquímico.

Número de Muestra	Código de Muestra	Porcentaje (%) de Elementos Mayores + LOI (Loss On Ignition)										
		Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	TiO ₂	LOI
1	MGC-07	19.7	3.25	5.09	1.93	1.39	0.08	2.81	0.23	55.28	0.58	9.42
2	MGC-11	14.13	1.41	1.64	3.82	0.46	0.04	3.53	0.04	71.06	0.24	3.15
3	MGC-13	15.81	0.95	1.92	3.99	0.45	0.02	2.39	0.02	68.28	0.26	5.4
4	MGC-14	16.86	5.54	6.17	1.53	1.03	0.08	3.35	0.26	59.35	0.57	4.84
5	MGC-17	20.2	7.64	6.34	1.7	0.83	0.06	3.27	0.22	52.42	1.01	6.23
6	MGC-20	17.81	5.77	5.07	2.04	1.94	0.06	2.78	0.28	56.09	0.68	7.33
L.D.M.: Límite de Detección del Método		0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01

Fuente: INGEMMET (2021).

Tabla 15. Valores en porcentaje para Elementos Mayores Corregidos Sin LOI (Loss On Ignition) de las 06 muestras para el análisis geoquímico.

Número de Muestra	Código de Muestra	Porcentaje (%) de Elementos Mayores Corregidos (Sin LOI)										
		Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	TiO ₂	TOTAL
1	MGC-07	21.81	3.60	5.63	2.14	1.54	0.09	3.11	0.25	61.19	0.64	100.00
2	MGC-11	14.66	1.46	1.70	3.96	0.48	0.04	3.66	0.04	73.74	0.25	100.00
3	MGC-13	16.80	1.01	2.04	4.24	0.48	0.02	2.54	0.02	72.57	0.28	100.00
4	MGC-14	17.80	5.85	6.51	1.61	1.09	0.08	3.54	0.27	62.65	0.60	100.00
5	MGC-17	21.56	8.15	6.77	1.81	0.89	0.06	3.49	0.23	55.95	1.08	100.00
6	MGC-20	19.25	6.24	5.48	2.20	2.10	0.06	3.00	0.30	60.62	0.73	100.00
L.D.M.: Límite de Detección del Método		0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	-

Fuente: INGEMMET (2021).

Tabla 16. Valores en partes por millón (ppm) para Elementos Menores de las 06 muestras para el análisis geoquímico.

Número de Muestra	Código de Muestra	Partes Por Millón (PPM) de Elementos Menores							
		Ba	Co	Cr	Ni	Sr	Y	Zn	Zr
1	MGC-07	692	14	29	10	415	16	68	130
2	MGC-11	936	3	5	< 5	115	16	29	129
3	MGC-13	693	2	6	< 5	70	19	32	172
4	MGC-14	508	12	22	6	584	10	63	111
5	MGC-17	396	14	42	11	547	16	60	134
6	MGC-20	514	11	20	7	605	12	104	139
L.D.M.: Límite de Detección del Método		5	1	1	5	10	5	1	5

Fuente: INGEMMET (2021).

4.3.1. Clasificación Geoquímica TAS (Total Alkali Silica) - Le Maitre, 2002

Esta metodología permite definir una roca volcánica sobre la base de la relación entre el contenido de minerales alcalinos (Na_2O y K_2O) y el contenido de silicatos (SiO_2). Estos parámetros químicos son útiles porque la cantidad relativa de minerales alcalinos y silicatos juega un papel determinante para determinar la mineralogía real de la roca.

Cabe señalar que la presente clasificación es de índole composicional y no discrimina el origen de la roca pudiendo ser esta volcánica explosiva o efusiva, para el caso de las 06 muestras analizadas 04 de estas son efusivas y 02 explosivas. La terminología aplicada para la simbología de la figura siguiente ha sido tomada de la Clasificación de Streckeisen realizada para las mismas muestras.

Tabla 17. Valores en porcentaje de SiO₂, Na₂O y K₂O para la clasificación TAS de las 06 muestras analizadas.

Elemento Mayor	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	Eje X = SiO ₂	Eje Y = Na ₂ O + K ₂ O
MGC-07	61.19	3.11	2.14	61.19	5.25
MGC-11	73.74	3.66	3.96	73.74	7.63
MGC-13	72.57	2.54	4.24	72.57	6.78
MGC-14	62.65	3.54	1.61	62.65	5.15
MGC-17	55.95	3.49	1.81	55.95	5.30
MGC-20	60.62	3.00	2.20	60.62	5.21

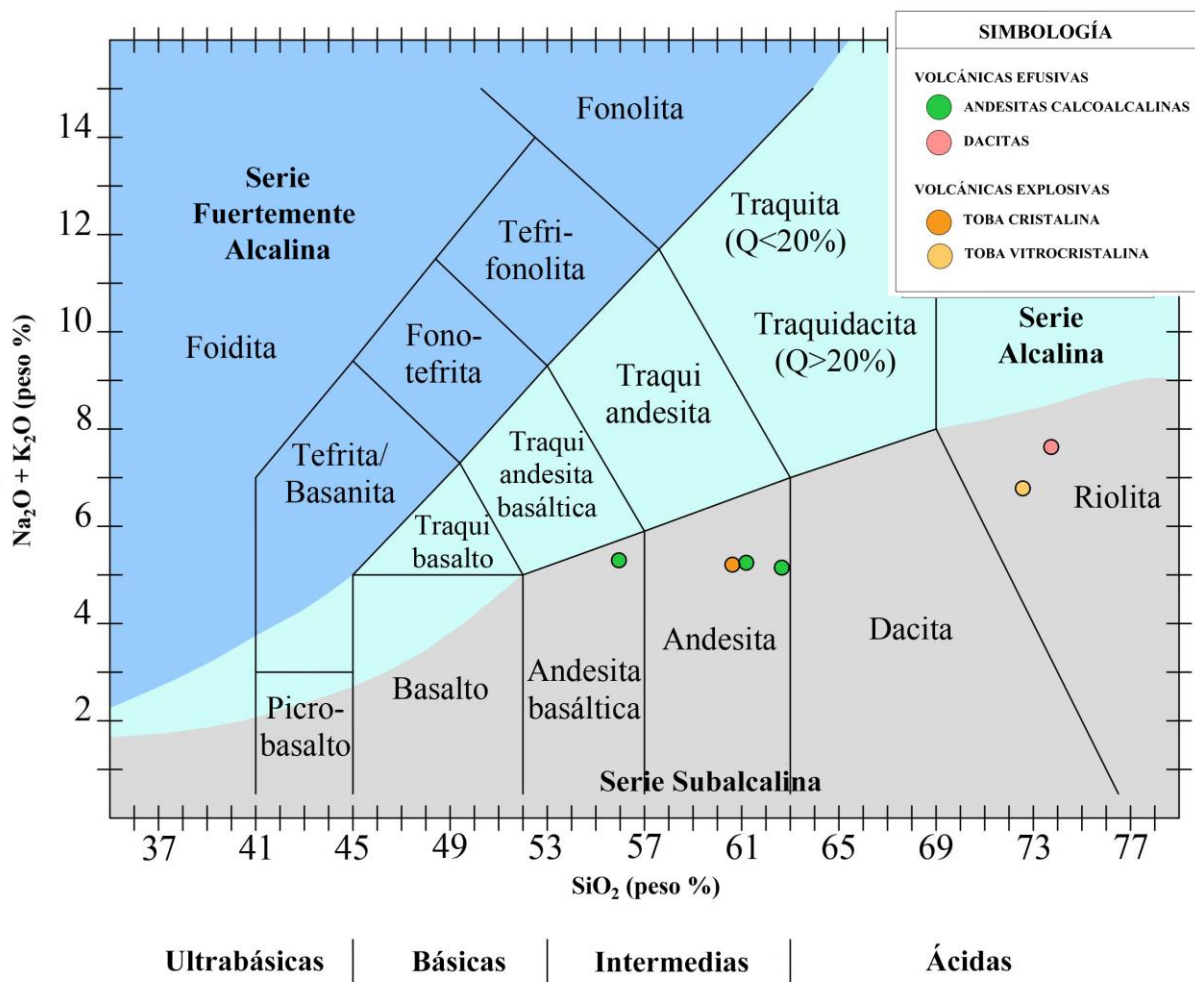


Figura 27. Clasificación TAS (Total Alkali Silica) para la clasificación de rocas volcánicas para las 06 muestras del Análisis Geoquímico (Le Maitre, 2002).

4.3.2. Clasificación Geoquímica para la Saturación de Alúmina en la Roca – Shand, 1943

Este diagrama compara la razón molar entre $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = (\text{A/NK})$ versus la razón molar entre $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{Ca}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = (\text{A/CNK})$, para clasificar las rocas plutónicas y volcánicas como **Peraluminosas**, **Metaluminosas** o **Peralcalinas**. Se utiliza esta clasificación ya que permite establecer en parte, el ambiente tectónico en que se formaron las rocas como indican Petro y otros autores (1979) que en ambientes compresionales son características las rocas peraluminosas, en ambientes extensionales las rocas peralcalinas y en ambos, son comunes las composiciones metaluminosas.

Tabla 18. Valores en porcentaje de Al_2O_3 , Ca_2O , Na_2O y K_2O para la clasificación por Saturación de Alúmina de las 06 muestras analizadas.

Elemento Mayor	Al_2O_3	CaO	Na_2O	K_2O	A/CNK = $\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$	A/NK = $\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$	
Peso Molecular del Compuesto	101.96	56.08	61.98	94.20			
CÓDIGO DE MUESTRA	MGC-07	21.81	3.60	3.11	2.14	3.73	5.64
	MGC-11	14.66	1.46	3.66	3.96	2.19	2.49
	MGC-13	16.80	1.01	2.54	4.24	2.79	3.08
	MGC-14	17.80	5.85	3.54	1.61	2.60	4.89
	MGC-17	21.56	8.15	3.49	1.81	2.60	5.68
	MGC-20	19.25	6.24	3.00	2.20	2.64	4.98

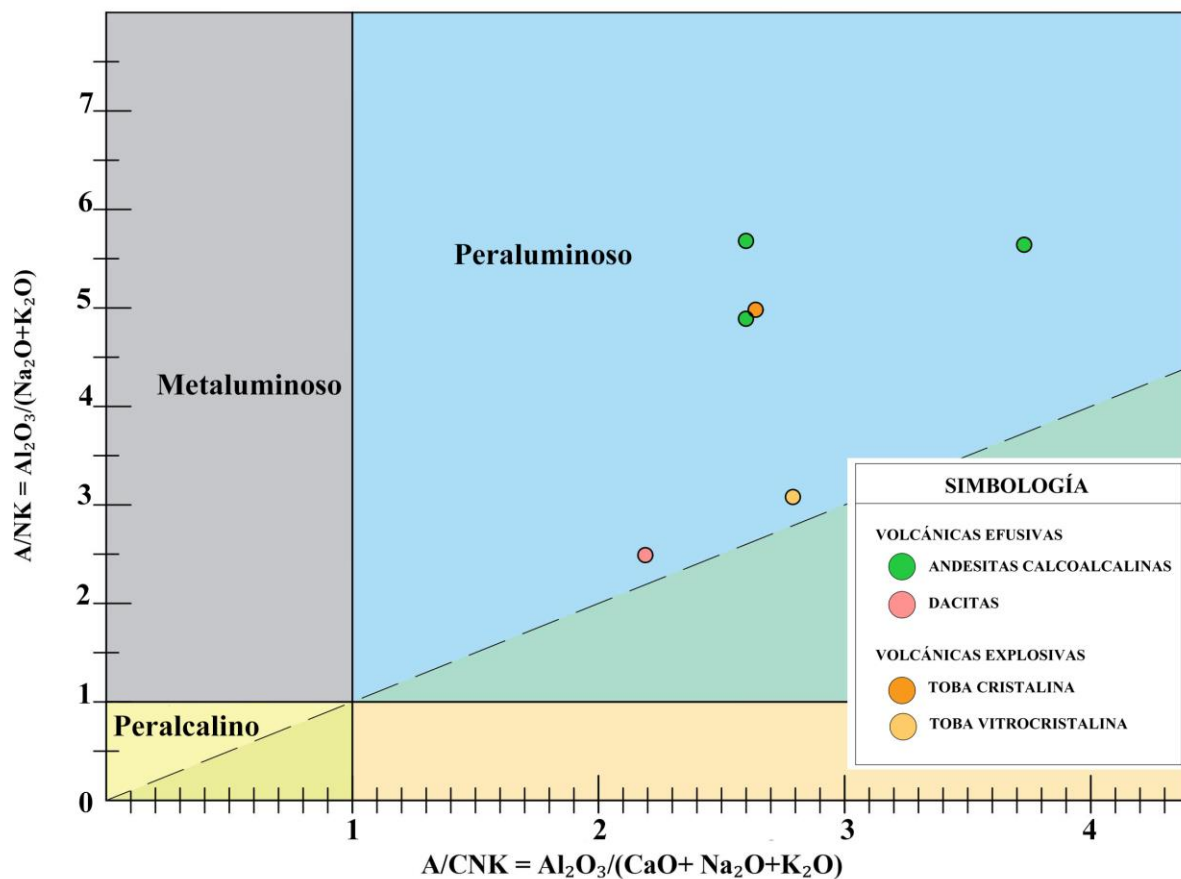


Figura 28. Clasificación Geoquímica para la Saturación de Alúmina $A/NK = Al_2O_3 / (Na_2O+K_2O)$ versus $A/CNK = Al_2O_3 / (CaO+Na_2O+K_2O)$, para las 06 muestras del Análisis Geoquímico (Shand, 1943).

4.3.3. Clasificación Geoquímica para la diferenciación de la Series Magmáticas – Kuno, 1968 y Irvine & Baragar, 1971

El diagrama AFM es un diagrama ternario que se utiliza para mostrar las proporciones relativas de los óxidos de álcalis (A), hierro (F) y magnesio (M) en rocas ígneas. Los componentes del diagrama son: $K_2O+Na_2O = (A)$, $FeO_{(total)} = (F)$ y $MgO = (M)$. Este diagrama incluye los límites entre los campos toleítico y calcoalcalino esta línea divisoria puede es relativamente variable para autores como Kuno y Irvine & Baragar.

Para el caso de las 06 muestras en análisis se puede discriminar que todas las muestras están dentro de la serie calcoalcalina, sin embargo, las rocas efusivas (andesitas) están al límite de la curva divisoria, esto debido a su composición rica en minerales ferromagnesianos y minerales secundarios de óxidos de hierro.

Tabla 19. Valores en porcentaje de K₂O, Na₂O, FeO_(t) y MgO para la clasificación discriminando la Serie Magmática de la que se originan las 06 muestras analizadas.

Elemento Mayor	K ₂ O	Na ₂ O	FeO(t)	MgO	Cálculo de elementos para el diagrama triangular AFM			
					A = K ₂ O + Na ₂ O	F = FeO(t)	M = MgO	
CÓDIGO DE MUESTRA	MGC-07	2.14	3.11	5.63	1.54	42.25	45.37	12.39
	MGC-11	3.96	3.66	1.70	0.48	77.78	17.35	4.87
	MGC-13	4.24	2.54	2.04	0.48	72.91	21.94	5.14
	MGC-14	1.61	3.54	6.51	1.09	40.40	51.08	8.53
	MGC-17	1.81	3.49	6.77	0.89	40.94	52.22	6.84
	MGC-20	2.20	3.00	5.48	2.10	40.74	42.86	16.40

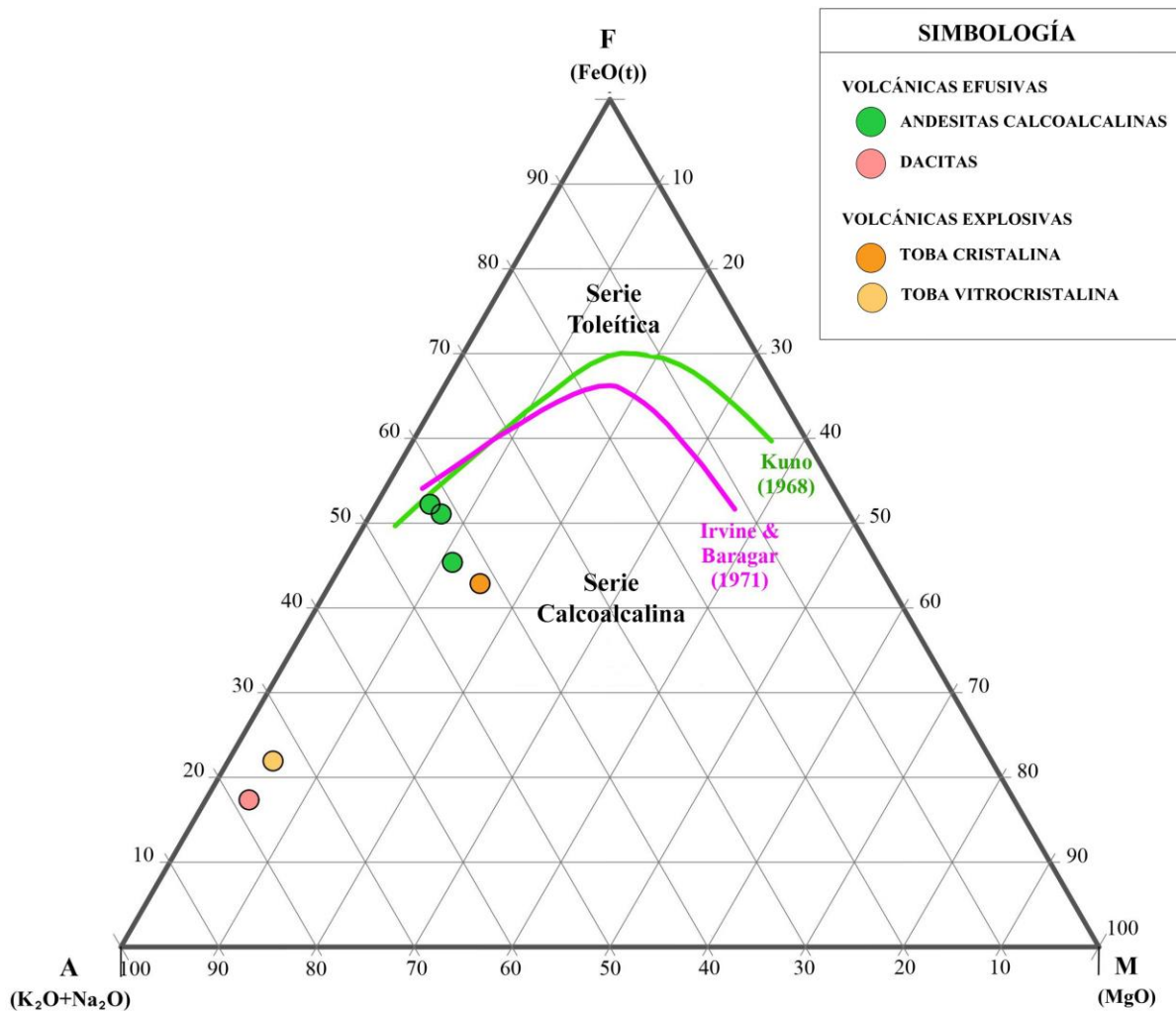


Figura 29. Clasificación Geoquímica para la diferenciación de la Series Magmáticas AFM: K_2O+Na_2O = (A), $FeO_{(total)}$ = (F) y MgO = (M), para las 06 muestras del Análisis Geoquímico (Kuno, 1968 y Irvine & Baragar, 1971).

4.3.4. Clasificación Geoquímica para determinar el Ambiente Tectónico – Pearce, 1980

Este diagrama compara un elemento mayor (TiO_2) con un elemento traza (Zr) los cuales pueden discriminar el ambiente tectónico para la formación de rocas ígneas en especial las rocas básicas e intermedias. El Ti y Zr son elementos de escasa movilidad e inalterables al sistema en que se formaron. Pearce en 1980 luego de haber realizado distintos estudios para la determinación de la configuración tectónica a las cuales está asociado las rocas ígneas propone un diagrama logarítmico que compara los componentes antes mencionados y que posteriormente ha sido valido y aplicado por otros autores.

Tabla 20. Valores en porcentaje para TiO₂ y en ppm para Zr en la clasificación geoquímica para determinar el Ambiente Tectónico

	Elemento Mayor y Elemento Menor	TiO₂ (%)	Zr (ppm)
CÓDIGO DE MUESTRA	MGC-07	0.64	130.00
	MGC-11	0.25	129.00
	MGC-13	0.28	172.00
	MGC-14	0.60	111.00
	MGC-17	1.08	134.00
	MGC-20	0.73	139.00

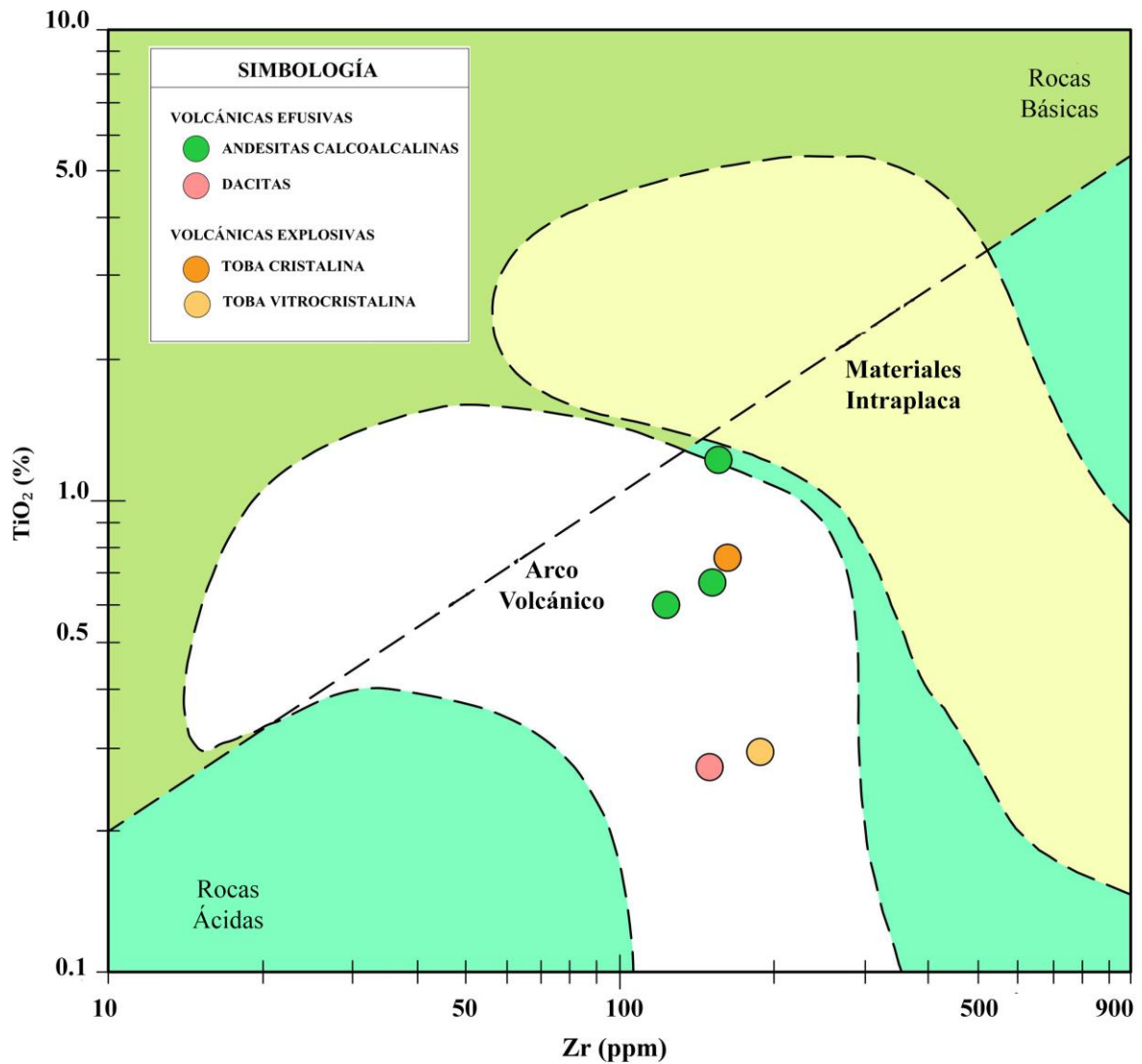


Figura 30. Clasificación Geoquímica para la determinación del Ambiente Tectónico formacional utilizando TiO₂ % vs Zr ppm (Pearce, 1980).

4.3.5. Clasificación Geoquímica para caracterizar la Madurez del Arco Volcánico – Brown, 1982

El arco maduro se define como un arco volcánico donde su basamento se encuentra más alejado de la fosa generada por la subducción; es por ello que los materiales del arco maduro se enriquecen en K, Si, y escaso Fe, por lo tanto, su composición y características serán muy similares a la de la corteza continental. Estas condiciones de arco coexisten con la deshidratación del magma donde la clorita o el anfíbol liberan agua en condiciones cercanas al solidus. Esta deshidratación se puede notar en la hornblenda cuando sus cristales sufren una opacitización (formación de minerales opacos alrededor de la hornblenda) visto mediante análisis petrográficos.

Tabla 21. Valores en porcentaje para CaO, Na₂O, K₂O y SiO₂ en la caracterización de la Madurez del Arco Volcánico.

Elemento Mayor	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	SiO ₂	Cálculo de elementos para el diagrama		
					CaO / (Na ₂ O+K ₂ O)	SiO ₂	
CÓDIGO DE MUESTRA	MGC-07	3.60	3.11	2.14	61.19	0.69	61.19
	MGC-11	1.46	3.66	3.96	73.74	0.19	73.74
	MGC-13	1.01	2.54	4.24	72.57	0.15	72.57
	MGC-14	5.85	3.54	1.61	62.65	1.14	62.65
	MGC-17	8.15	3.49	1.81	55.95	1.54	55.95
	MGC-20	6.24	3.00	2.20	60.62	1.20	60.62

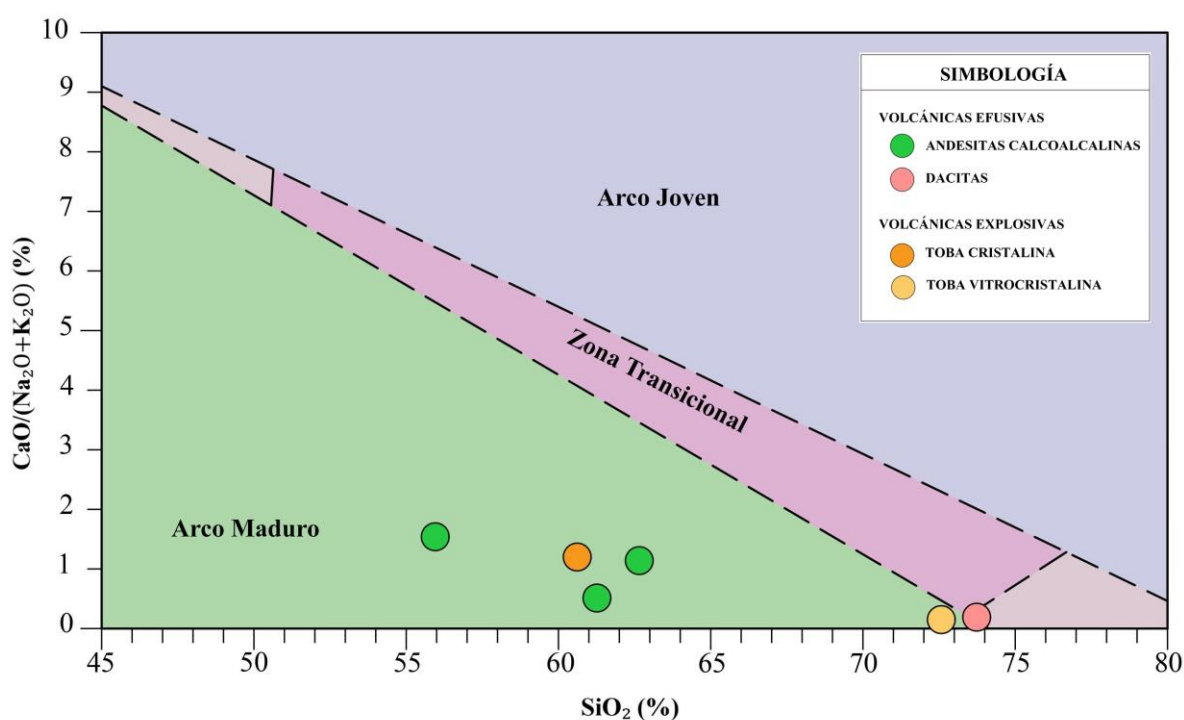


Figura 31. Clasificación Geoquímica para caracterizar la Madurez del Arco Volcánico (Brown, 1982).

4.3.6. Clasificación Geoquímica para discriminar el Ambiente Formacional – Pearce et al., 1975

El diagrama ternario TiO₂, K₂O y P₂O₅ se propone como un método para discriminar preferentemente basaltos oceánicos y no oceánicos (continentales), pero también es aplicable a

rocas intermedias y ácidas. Es preciso señalar que aquellas rocas que han sufrido distintos estados de fraccionamiento mineral pueden ser mal clasificadas. Los análisis adecuados se ajustan para aquellas rocas que tienen álcalis totales $\leq 20\%$ en $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$. La alteración y el metamorfismo de las rocas ígneas de preferencia básicas de origen oceánico generalmente ocasionan un enriquecimiento de K_2O en relación con TiO_2 y P_2O_5 .

Tabla 22. Valores en porcentaje para TiO_2 , K_2O y P_2O_5 para discriminar el ambiente formacional de las rocas ígneas.

Elemento Mayor	TiO_2	K_2O	P_2O_5	Valores Normalizados (Recalculo al 100%)			
				TiO_2	K_2O	P_2O_5	
CÓDIGO DE MUESTRA	MGC-07	0.64	2.14	0.25	21.17	70.44	8.39
	MGC-11	0.25	3.96	0.04	5.85	93.17	0.98
	MGC-13	0.28	4.24	0.02	6.09	93.44	0.47
	MGC-14	0.60	1.61	0.27	24.15	64.83	11.02
	MGC-17	1.08	1.81	0.23	34.47	58.02	7.51
	MGC-20	0.73	2.20	0.30	22.67	68.00	9.33

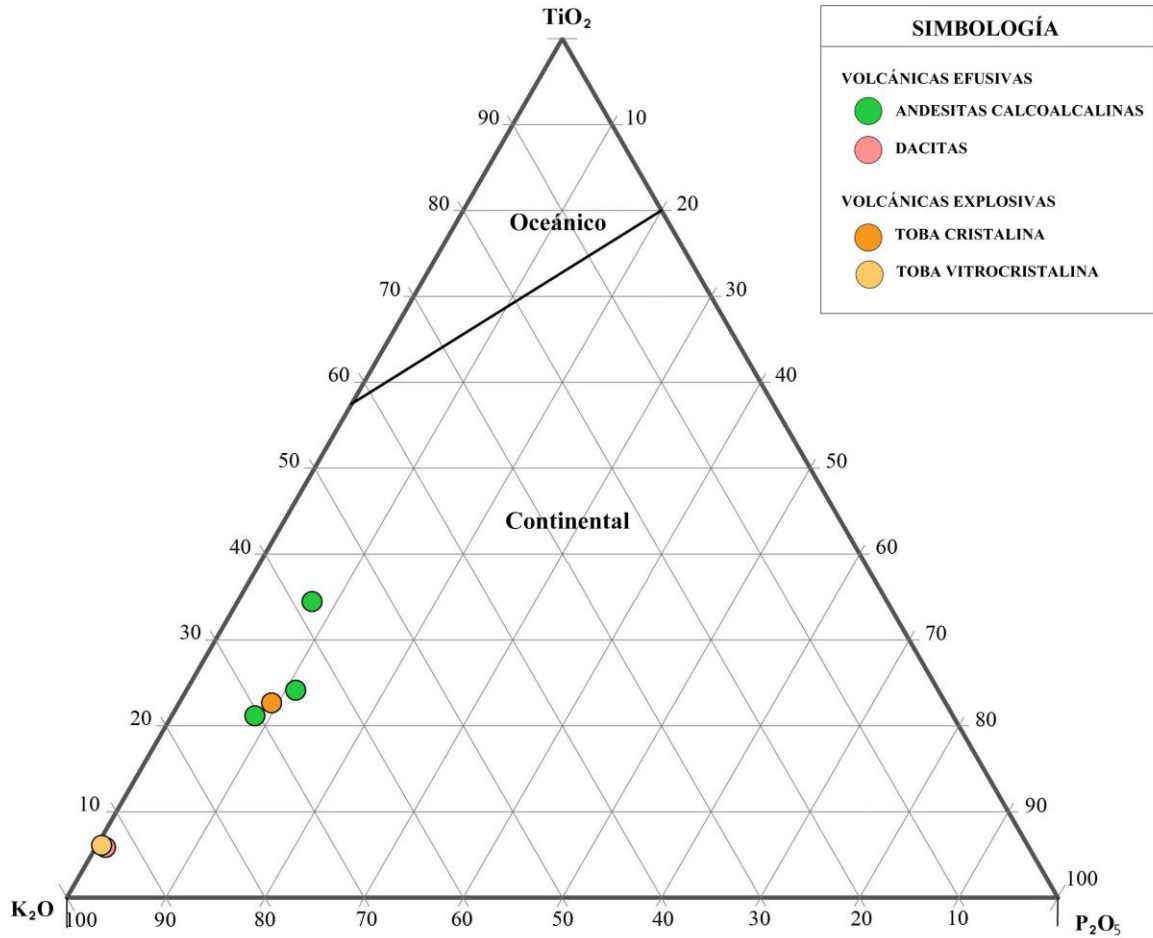


Figura 32. Clasificación geoquímica para discriminar el ambiente formacional de las rocas ígneas (Pearce et al., 1975).

4.4. CONSIDERACIONES PETROGENÉTICAS

Los arcos magmáticos que involucran la formación del Grupo Calipuy y por ende la Secuencia Volcánica Tantachual (Po-tch) están relacionados a estadios de alto esfuerzo en los márgenes convergentes de placas tectónicas. Estos arcos tienen diferentes denominaciones acordes al tiempo geológico en el que se dieron sus eventos y a las características individuales como son: composición magmática, periodos e historia eruptiva, basamento y evolución tectónica; estando el Grupo Calipuy, principalmente enmarcado en tres arcos magmáticos: Pativilca (42 - 30 M.a), Calamarca (30 - 24 M.a) y Calipuy (24 - 10 M.a), (Mamani, 2010).

Las rocas del Grupo Calipuy consisten en espesas y extensas secuencias volcánicas y volcanoclásticas que conforman parte de la Cordillera Occidental de los Andes, y son el resultado de un arco magmático generado entre 54 a 8 M.a (Rivera et al., 2006); posibilitando

el emplazamiento de varios centros de emisión, los cuales produjeron diversos depósitos volcánicos luego de intensas e intermitentes actividades efusivas, explosivas y extrusivas.

En base a los estudios de investigación realizados por en INGEMMET se plantea la existencia de por lo menos cinco periodos eruptivos, que han desarrollado un campo volcánico que tiene una amplitud máxima de ~110 km comprendida entre Tembladera (al Este de Pacasmayo) y Combayo (al noreste de Cajamarca). Dichos periodos ocurrieron durante un lapso de ~ 47 Ma, a partir del Eoceno inferior (~ 54 M.a) al Mioceno superior (~ 8 M.a). El volcanismo Eoceno se localiza más próximo a la zona costera, mientras que el Miocénico está al este del primero, atestiguando una migración del arco volcánico de Oeste a Este.

Estos 5 periodos de actividad han sido corroborados por dataciones radiométricas recopiladas de la bibliografía y por discordancias angulares y erosivas, de modo tal que ocurrieron en el Eoceno inferior (54 – 43 M.a), Eoceno superior (43 – 33 M.a), Oligoceno (33 – 24 M.a), Mioceno inferior (24 – 12 M.a) y Mioceno superior (12 – 8 M.a), (Navarro, 2008). A estos procesos se le suma las fases tectónicas Andinas, las cuales guardan relación con los periodos de alta actividad volcánica. Así se tiene que para el Grupo Calipuy previo a todo su sistema volcánico se dio la Fase Tectónica Inca II (43 – 42 M.a) estando esta relacionada con la Formación Llama; la Fase Inca III (30 – 27 M.a) enmarca una de las épocas de máxima actividad volcánica en la que se encuentra inmerso gran parte de la Secuencia Volcánica Tantachual la cual es el objetivo de la presente investigación, posteriormente se da la Fase Inca IV (22 M.a) que marca la separación entre la actividad volcánica dada para Secuencia en Investigación e inicio de otro episodio de actividad volcánica como lo es el Centro Volcánico Chicche-Hueco Grande.

Los estudios realizados por el INGEMMET para caracterizar el volcanismo Cenozoico en el Norte del Perú (Segmento Cajamarca), han determinado distintos centros eruptivos enmarcados en los 5 episodios de actividad volcánica, como se mencionó anteriormente. En los casos en los que no se logró determinar dichos centros, pero que estas unidades guardan cierta diferencia litológica, geoquímica y morfológica se les llamó “Secuencias Volcánicas”. Es por ello que uno de los objetivos de esta presente investigación ha sido interpretar la ubicación del Centro de Emisión Volcánica, este es posible gracias a los trabajos auxiliares que han sido básicos para la presente investigación tales como el Cartografiado Geológico (1:20000) y la descripción de las características macroscópicas de las rocas recolectadas.

Cabe señalar que la bibliografía en la que tuvo soporte la presente investigación ya nombra las características generales de cada evento que conforma la Secuencia Volcánica Tantachual, es por ello que en base a dichas características se realizó los estudios específicos (descripción macroscópica, microscópica, geoquímica) para confirmar y complementar los estudios previos. Compilando toda la información previa y la de la investigación se propone ciertos criterios básicos para dar tentativamente la ubicación del Centro de Emisión Volcánica:

- **Superposición de Estratos:** Este principio ayudó a delimitar las secuencias más jóvenes de las más antiguas basándose en que las primeras sobreyacen a las segundas; y que para las unidades volcánicas aplica, sin embargo, se ha tenido en cuenta el sistema estructural al que está sometido el área de investigación ya que pudo haber jugado un papel importante y modificado el orden de la secuencia. Es así que las secuencias más jóvenes se encuentran al Norte de la zona de investigación y las más antiguas al Sur-Este.
- **Dirección de Flujo:** Este parámetro se ha podido evidenciar de manera puntual en los pseudo-estratos y estratos de algunas secuencias marcando una ligera tendencia NO-SE. De igual manera en el cartografiado de la zona investigación a escala 1:20000 y en el que muestra en INGEMMET a 1:50000 se repite la misma dirección andina NO-SE.
- **Dataciones Geocronológicas:** Las dataciones Geocronológicas corroboran y confirman la edad de las secuencias volcánicas, tomándose como referencia trabajos de Beas, 2015; tenemos que el Evento 2 (Po-tch/2) data una edad 30.51 M.a (en lavas andesíticas dentro de la secuencia); y para el Evento 1 (Po-tch/1) data una edad 34.26 M.a (en tobas e ignimbritas). Por otro lado, las dataciones del INGEMMET (Navarro, 2014), muestran edades de 42.39 M.a y 41.01 M.a para las zonas que se encuentran aproximadamente a 8km al Sur-Este del área de investigación.

Por lo mencionado anteriormente y los criterios basados, se propone que el Centro Eruptivo que dio origen a Secuencia Volcánica Tantachual se encuentra aproximadamente a 6 km al Sur-Este del área en investigación, a pesar de que el presente estudio no abarca dicho límite, el cartografiado regional del INGEMMET a escala 1:50000 corrobora los márgenes de la secuencia y los contactos litológicos con las formaciones infrayacentes (Grupo Pulluicana, Ks-pu) y suprayacentes (Centro Volcánico Chicche-Hueco Grande, Nm-chg).

Los resultados macroscópicos y microscópicos de las secuencias volcánicas descritas, muestran una actividad volcánica intermitente con cortos tiempos de cese tal como se muestran en los

contactos entre los eventos de la Secuencia Tantachual, de igual forma los componentes de estos eventos están formados básicamente por material de pómez y cenizas, y la geoquímica muestra que las rocas son de composición félsica a intermedias, por lo que estas características se asocian al tipo de erupción volcánica denominada Pliniana. La forma en la que se depositaron las secuencias, también suponen este tipo de erupción volcánica, ya que en ciertas zonas se observa depósitos piroclásticos de caída asociado a una columna eruptiva bien pronunciada (>25 km) y otras zonas se evidencia depósitos de oleadas piroclásticas caracterizadas por rellenar paleo-superficies y tener una buena gradación.

4.5. CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS

La Secuencia Volcánica Tantachual en las zonas de Pabellón Chico y Espina Amarilla se caracteriza por presentar eventos volcánicos, diferenciándose en el área de investigación 6 eventos principales (Po-tch/2, Po-tch/3, Po-tch/4, Po-tch/5, Po-tch/6 y Po-tch/8) de los 9 propuestos por INGEMMET; estos eventos se distinguen unos de otros por el tamaño de los componentes que conforman cada secuencia identificándose cenizas, lapilli y bloques y por el contenido litológico identificándose pómez, lavas andesíticas y clastos porfiríticos andesíticos y dacíticos. La geoquímica muestra que la composición química de las muestras analizadas guarda relación en toda la secuencia volcánica, clasificándolas principalmente como rocas de composición andesítica de origen calco-alcálido (Serie Subalcalina según Clasificación TAS) y para los clastos porfiríticos muestra una composición riolítica y andesítica. Además, la forma en que se han depositado dichas secuencias (depósito de caída y depósitos de oleada piroclástica) y la composición principal de pómez y ceniza valida que los eventos están asociados a erupciones de tipo Pliniano y que su probable centro eruptivo este al Sur-Este. Con esta investigación se complementa, corrobora y confirma la hipótesis plateada inicialmente.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

La Secuencia Volcánica Tantachual (Po-tch) se caracteriza por presentar depósitos piroclásticos conformados por cenizas, pómez, lapilli y bloques con clastos porfiríticos andesíticos y dacíticos que combinados y conjugados, permiten diferenciar distintos eventos volcánicos, identificándose en el área de estudio 06 eventos (Po-tch/2, Po-tch/3, Po-tch/4, Po-tch/5, Po-tch/6 y Po-tch/8) de los 09 propuestos por el INGEMMET.

Las características petrológicas de la Secuencia Volcánica Tantachual (Po-tch) se definieron en base a 45 muestras de campo: 31 muestras piroclásticas y que según la clasificación de Schmid, 07 son tobas cristalinas, 14 tobas cristalovítreas y 10 tobas vitrocristalinas; y 14 muestras volcánicas-efusivas, que según la clasificación de Streckeisen: 13 son andesitas calcoalcalinas y 01 dacita; cabe señalar que para el caso de las rocas piroclásticas adicionalmente fueron clasificadas según Fisher, denominándolas a todo el conjunto como tobas cineríticas.

Las Rocas Volcánicas Extrusivas-Efusivas (MGC-07, MGC-11, MGC-14, MGC-17) según los análisis petromineralógicos se caracterizan por tener una textura porfirítica, con fenocristales de plagioclasas, anfíboles, cuarzo y ferromagnesianos (minerales esenciales); biotita, hematita, goethita ± ferromagnesianos (minerales accesorios); la matriz básicamente constituida por vidrio volcánico y microcristales de los minerales accesorios y esenciales; arcillas, limonitas, opacita, serpentinas, saponitas y óxidos de hierro (minerales secundarios).

Rocas Volcánicas Extrusivas-Piroclásticas (MGC-13, MGC-20) según los análisis petromineralógicos se caracterizan por tener una textura fragmental, conformada por cristales rotos de plagioclasas, cuarzo, anfíboles y piroxenos (minerales esenciales); ferromagnesianos, anfíboles, moldes de ferromagnesianos reemplazados por óxidos de hierro (minerales accesorios); la matriz básicamente constituida por ceniza volcánica y por microcristales de feldespato potásico; sílice, anfíboles; arcillas, limonitas, saponitas (minerales secundarios).

El análisis geoquímico mediante el método de Espectroscopía de Emisión Atómica con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-OES) determinó 10 elementos mayores, 08 elementos menores y el porcentaje de LOI (pérdida por ignición); estos resultados para las 06 muestras representativas (MGC-07, MGC-11, MGC-13, MGC-14, MGC-17, MGC-20) del muestreo total realizado, y que según la clasificación TAS (Total Alkali Silica) se determinó que las muestras recaen en la Serie Subalcalina con composición andesítica y riolítica.

Otras clasificaciones que utilizaron los resultados geoquímicos determinaron que las 06 muestras recaen en el campo de Peraluminosas, además están bajo la curva de Serie Calcoalcalina, el Ambiente Tectónico en la que se formaron fue de Arco Volcánico Maduro a excepción de las muestras MGC-11 y MGC-13 que recaen en la zona transicional probablemente porque estén relacionadas a los últimos estadios de volcanismo; y el ambiente formacional determina que todas las rocas pertenecen a un ambiente Continental.

El cartografiado geológico a escala 1:20000 permitió la identificación de los diferentes eventos que conforman la Secuencia Volcánica Tantachual (Po-tch), siendo los principales criterios para diferenciarlos: continuidad de la depositación, tipo y tamaño de los componentes que conforman la secuencia y cambios morfogenéticos. Además, se ha identificado las principales estructuras como fallas determinadas, fallas inferidas, lineamientos estructurales y un sinclinal, cabe señalar que estas estructuras tienen en su mayoría una dirección andina NO-SE y en su minoría conjugadas con dirección E-O.

Las dataciones de los trabajos de Beas, 2015; determinaron una edad de 30.51 M.a para los componentes andesíticos del Evento 2 (Po-tch/2) y para el Evento 1 (Po-tch/1) una edad de 34.26 M.a para las tobas e ignimbritas; confirmando así la relación de actividad volcánica con el tectonismo andino.

La actividad volcánica suscitada en el Oligoceno-Mioceno forma gran parte del Grupo Calipuy en el cual se encuentra enmarcado la Secuencia Volcánica Tantachual (Po-tch) caracterizada por tener materiales de pómez y ceniza, y que morfológicamente los eventos están emplazados como depósitos piroclásticos de caída y de oleada, además la geoquímica determinó que las rocas son de composición Subalcalina; todas estas características se asocian a un vulcanismo del tipo Pliniano. Asimismo, las características de flujo y geocronología ayudaron a proponer un centro de emisión volcánica, estando este a 6 km al Sur-Este del área de investigación.

5.2. RECOMENDACIONES

Realizar una malla reducida de 1km x 1km de dataciones Geocronológicas para la discriminación y orden de los eventos volcánicos lo que permitirá actualizar con datos fiables la carta geológica 1:50000 propuesta por INGEMMET.

Realizar estudios complementarios de TerraSpec para determinar la existencia de actividad hidrotermal, ya que la litología y el marco estructural (rocas volcánicas piroclásticas y estructuras de orientación andina y componente trasandino) son propicios para el emplazamiento magmático hidrotermal, pudiendo ser una zona prospectiva para las empresas con fines exploratorios.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdissa, S. 2018. Petrography and Geochemistry of Basement Rocks from Abay (blue Nile) River Gorge, around Agemsa, Etiopía.
- Alfaro, A. 2017. Caracterización Petrográfica y Geoquímica de las Rocas Ígneas en el Sector Pacífico de la Cordillera de Talamanca, Costa Rica.
- Arcos, F. 2016. Caracterización Petrográfica-Geoquímica del Grupo Barroso Relacionada a la Mineralización entre los Paralelos 16°30' y 17°30' Latitud Sur, Moquegua, Puno y Tacna, Perú.
- Arnosio, M. Caffé, Pablo. 2009. Cartilla de Texturas de Rocas Volcánicas. Salta, Argentina. Instituto de Geociencias USP.
- Beas, B. 2015. Volcanic stratigraphy at La Zanja Mining District in the northern Peruvian Andes, Cajamarca, Perú.
- Castro, A. 2015. Petrografía de Rocas Ígneas y Metamórficas. Madrid, España: Paraninfo.
- Chávez, L. et al. 2010. Variaciones Geoquímicas y las Clasificación por Arcos Magmáticos de las Rocas Volcánicas del Grupo Calipuy en la Zonas de Cajamarca, La Libertad y Ancash. Lima, Perú: INGEMMET.
- Chavez, L. et al. 2013. Características Geoquímicas del Volcanismo Cenozoico (Grupo Calipuy) en el Cuadrángulo Santiago de Chuco, Perú: INGEMMET.
- Chira, J. et al. 2007. Prospección Geoquímica Regional en la Cuenca del Río Jequetepeque en las Regiones de Lambayeque y Cajamarca, Perú: INGEMMET.
- Dávila, J. 2011. Diccionario Geológico, Lima, Perú: INGEMMET.
- Echavarria, L. 2002. Mapeo en Terreno Volcánicos. Colorado, EE.UU: School Mines.

- Fuentes, K. 2018. Petrología de Rocas Extrusivas en el Complejo Turístico Sillustani, Puno, Perú.
- González, P. 2016. Texturas de los Cuerpos Ígneos. Antioquia, Colombia: CONICET.
- Haldar, S. 2014. Introduction to Mineralogy and Petrology. Oxfordshire, Reino Unido: ELSEVIER.
- Lagos, A. Quispe, Z. et. al. 2011. Análisis Estructural y su Relación con los Intrusivos Miocénicos, Zona Urubamba y Alrededores, Cajamarca, Perú.
- Llinares, M. et al. 2004. Riesgo Volcánico, Madrid, España: Dirección General de Protección Civil y Emergencias.
- López, J. et al. 2006. Texturas y Estructuras de las Rocas Ígneas: Significado Petrológico e Implicancias en las Condiciones de Formación de la Rocas. Tucumán, Argentina: INSUGEO.
- López, J. et al. 2010. Clasificación y Nomenclatura de las Rocas Ígneas. Tucumán, Argentina: INSUGEO.
- Lucchi, F. 2013. Stratigraphic Methodology for the Geological Mapping of Volcanic areas: Insights from the Aeolian Archipelago (Southern Italy), Bolonia, Italia.
- Macías, J. 2017. Storage Conditions and Magma Processes Triggering the 1818CE Plinian Eruption of Volcan de Colima. Colima-Jalisco, México.
- Mackenzie, W. 1996. Atlas de Rocas Ígneas y sus Texturas. Barcelona, España: MASSON S.A.
- Mamani, M. et al. 2013. Características Litológicas y Geoquímicas más Resaltantes de los Arcos Magmáticos del Perú del el Ordovícico. Perú: INGEMMET.
- Martí, J. et al. 2012. El Vulcanismo. Guía de Campo de la Zona Volcánica de La Garrotxa. Girona, España: PNZVG.

- Navarro, P. 2013. Nuevas Dataciones en el Segmento Sur de Cajamarca, Perú: INGEMMET.
- Navarro, P. 2014. Correlación Espacial, Temporal y Metalogenética del Magmatismo Cenozoico del Grupo Calipuy del Norte del Perú en Base a Nuevas Dataciones, Perú: INGEMMET.
- Navarro, P. y Monge, R. 2008. Periodos Eruptivos del Volcanismo Cenozoico (Grupo Calipuy) en la Cordillera Occidental del Norte del Perú: Segmento Cajamarca, Cajamarca, Perú.
- Ordoñez, E. et al. 2013. Relación Geoquímica y las Anomalías Bouguer para el Volcanismo Cenozoico (Grupo Calipuy) y el Batolito de la Cordillera Blanca, Perú: INGEMMET.
- Pajuelo, D. 2015. Magmatismo, Petrografía y Estratigrafía de los Depósitos Volcánicos Cenozoicos (Grupo Calipuy), en el Segmento Cordillera Negra, Sector Sur-Ancash, Perú.
- Quiceno, J. et al. 2016. Petrografía y Geoquímica del Stock de Payandé y su Posible Relación con el Magmatismo Jurásico al Sur Colombia, Tolima, Colombia.
- Rodríguez, C. 2019. Caracterización Petrológica del Volcánico Huambos en las Zonas de Tual y Porcón Bajo, Cajamarca, Perú.
- Spelucín, J. 2017. Caracterización Petrológica de la Formación Porculla (Grupo Calipuy), Cumbemayo, Cajamarca, Perú.
- Supo, J. 2015. Como Empezar una Tesis, Arequipa, Perú: BIOESTADÍSTICO EIRL.
- Wilson, J. 1984. Boletín N° 38. Geología de los Cuadrángulos de Jayanca (13-d), Incahuasi (13-e), Cutervo (13-f), Chiclayo (14-d), Chongoyape (14-e), Chota (14-f), Celendín (14-g), Pacasmayo (15-d) y Chepén (15-e), Perú: INGEMMET.
- Winter, J. 2001. An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology. Nueva Jersey, EE.UU: Prentice-Hall Inc.

ANEXOS

A. FORMATOS DE CLASIFICACIÓN DE ROCAS

45 Formatos Descriptivos: Caracterización Petrográfica Macroscópica de Muestras de Mano
- Volcánicas y Subvolcánicas.

B. PLANOS TEMÁTICOS

Plano N° 01: Ubicación

Plano N° 02: Satelital

Plano N° 03: Modelo Digital de Elevación

Plano N° 04: Modelo Digital Altitudinal

Plano N° 05: Unidades Morfogenéticas

Plano N° 06: Geológico

C. COLUMNA ESTRATIGRÁFICA

Columna Estratigráfica a Escala 1:5000 (Plano N° 07).

D. MAPAS GEOLÓGICOS DEL CUADRÁNGULO DE CHOTA PROPUESTOS POR EL INGEMMET (CARTOGRAFIADO 1:50000).

Mapa Geológico del Cuadrángulo de Chota – Hoja 14-f-II

Leyenda: Mapa Geológico del Cuadrángulo de Chota – Hoja 14-f-II

Mapa Geológico del Cuadrángulo de Chota – Hoja 14-f-III

Leyenda: Mapa Geológico del Cuadrángulo de Chota – Hoja 14-f-III