

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y PETRÓLEOS

ESTUDIO GEOQUÍMICO Y PETROLÓGICO DEL VOLCÁN EL ALTAR

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
GEÓLOGO**

OPCIÓN: PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

GALÁRRAGA ORTIZ MICHAEL FABRICIO

mikegalarraga@hotmail.com

IGLESIAS FLORES JORGE ANDRÉS

001jorge@hotmail.es

Director : Dra. SILVANA IVONNE HIDALGO TRUJILLO

silvana.hidalgo@epn.edu.ec

Quito, Noviembre 2019

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, Michael Fabricio Galárraga Ortiz y Jorge Andrés Iglesias Flores, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Michael Fabricio Galárraga Ortiz

Jorge Andrés Iglesias Flores

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Michael Fabricio Galárraga Ortiz y Jorge Andrés Iglesias Flores, bajo mi supervisión.

Silvana Hidalgo, PhD.

AGRADECIMIENTOS

A Dios y a nuestras familias por su apoyo en este trayecto.

A Michael Monzier por empezar el estudio del volcán El Altar y todos sus aportes brindados.

A la Dra. Silvana Hidalgo por haber depositado su confianza en nosotros, por el tiempo dedicado, guías, charlas, consejos y enseñanzas acerca del tema, durante la realización de este proyecto.

A Diego Narvárez por haber confiado en nosotros y brindarnos su apoyo incondicional. Por el tiempo y paciencia al resolver dudas acerca de las inquietudes presentadas en el camino. Además, por los conocimientos impartidos durante la carrera y en este trabajo de titulación. Por cada palabra de aliento y regaño cuando fue necesario, pero sobre todo por tu amistad.

Al Ing. Bernardo Beate por las discusiones acerca del volcán El Altar, así como por sus conocimientos acerca de la zona.

A todos los ingenieros de la carrera de Ingeniería Geológica de la Escuela Politécnica Nacional por los conocimientos transmitidos a lo largo de nuestra vida estudiantil.

A nuestros amigos por compartir con nosotros momentos duros y divertidos en las aulas y en las salidas de campo.

Michael Galárraga y Jorge Iglesias

DEDICATORIA

Dedicada especialmente a mi madre y mi padre, mi motivación a lo largo de toda mi vida. Sin ustedes esto no sería posible.

A mis hermanos, Vale y Kleber.

Y a las personas que me acompañaron durante este tiempo de universidad.

Michael Galárraga

DEDICATORIA

A mi mami y mi papi que han sido mis pilares fundamentales durante toda mi vida.

A mis hermanos.

Y a mi abuelita Hildita, mi angelito en el cielo.

Jorge Iglesias

CONTENIDO

DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
CERTIFICACIÓN.....	III
AGRADECIMIENTOS	IV
DEDICATORIA.....	V
DEDICATORIA.....	VI
RESUMEN	XVI
ABSTRACT	XVII
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes y justificativos	1
1.1.1 Justificación teórica.....	1
1.1.2 Justificación metodológica	2
1.1.3 Justificación práctica.....	2
1.2 Objetivos.....	2
1.2.1 Objetivo general.....	2
1.2.2 Objetivos específicos.....	2
1.4 Ubicación	3
1.4.1 Fisiografía e hidrografía.....	4
1.5 Estudios previos	4
CAPÍTULO II.....	7
MARCO TEÓRICO.....	7
2.1 Ambiente Geodinámico actual	7
2.2 Geología Regional.....	9
2.3 Geología Cordillera Real	10
2.3.1 División Guamote	10

2.3.2	División Alao	11
2.3.3	División Loja	12
2.3.4	División Salado	13
2.3.5	División Zamora	14
CAPÍTULO III.....		15
METODOLOGÍA.....		15
3.1	Recopilación Bibliográfica.....	15
3.2	Muestreo.....	15
3.3	Descripción microscópica	16
3.4	Geoquímica de roca total	16
3.5	Microsonda electrónica.....	16
3.6	Geotermobarometría.....	17
3.7	Modelización geoquímica	17
3.8	Análisis e interpretación de resultados	19
CAPÍTULO IV		20
RESULTADOS		20
4.1	Geología del Volcán El Altar.....	20
4.2	Petrografía de las unidades de El Altar.....	21
4.2.1	Unidad Gabro-Diorita	21
4.2.2	Unidad Brechas del Altar	22
4.2.3	Unidad Brechas de Collanes	25
4.2.4	Unidad Riolita de Collanes	27
4.3	Mineralogía	28
4.3.1	Plagioclasa	29
4.3.2	Clinopiroxeno.....	31
4.3.3	Ortopiroxeno	33
4.3.4	Anfíbol.....	34

4.3.5	Biotita	35
4.3.6	Olivino	36
4.3.7	Óxidos	36
4.3.8	Composición del vidrio	39
4.4	Geotermobarometría.....	39
4.4.1	Geotermometría	40
4.4.2	Geobarometría	43
4.5	Caracterización Geoquímica.....	43
4.5.1	Elementos Mayores	43
4.5.2	Elementos Traza	48
4.5.3	Geoquímica Brechas de Collanes	51
4.5.4	Geoquímica Brechas del Altar	51
4.5.5	Geoquímica Domos Riolíticos.....	51
4.6	Modelización.....	55
4.6.1	Modelización Brechas de Collanes y Riolita de Collanes.....	56
4.6.2	Modelización Brechas del Altar	83
4.7	Fuente magmática.....	88
CAPÍTULO V		94
DISCUSIÓN		94
5.1	Cristalización Fraccional.....	94
5.2	Fuente Mágica.....	96
CAPÍTULO VI		100
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		100
6.1	Conclusiones.....	100
6.2	Recomendaciones	101
CAPÍTULO VII		102
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		102

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación del volcán El Altar en la Cordillera Real.	3
Figura 2. Mapa de los Andes Sudamericanos.	7
Figura 3. Marco geodinámico ecuatoriano.	8
Figura 4. Mapa tectónico del Ecuador.....	10
Figura 5. Mapa de ubicación de muestras en el volcán El Altar.....	15
Figura 6. Flujograma de modelización geoquímica.....	18
Figura 7. Esquema de la geología del volcán El Altar	20
Figura 8. Lámina delgada muestra RIO 137.	22
Figura 9. Lámina delgada muestra RIO 31B (Clasto de Brecha).	23
Figura 10. Lámina delgada muestra RIO 33A (clasto de brecha).	23
Figura 11. Lámina delgada muestra RIO 39A (dique).	24
Figura 12. Lámina delgada muestra RIO 40 (Flujo de lava).	24
Figura 13. Lámina delgada muestra RIO 120A (Clasto de Brecha).	25
Figura 14. Lámina delgada muestra RIO 125 (Dique).	26
Figura 15. Lámina delgada muestra RIO 128 (Flujo de Lava).	26
Figura 16. Lámina delgada muestra RIO 52E.....	27
Figura 17. Composición de las plagioclasas de la unidad Brechas de Collanes	29
Figura 18. Composición de las plagioclasas de la unidad Brechas del Altar.....	30
Figura 19. Composición de las plagioclasas de la unidad Riolita de Collanes.....	30
Figura 20. Composición de las plagioclasas de la unidad Gabro-Diorita.....	31
Figura 21. Composición de los piroxenos de la unidad Brechas de Collanes.....	32
Figura 22. Composición de los piroxenos de la unidad Brechas del Altar	32
Figura 23. Composición de los piroxenos de las unidades Gabro-Diorita y Riolita de Collanes.	33
Figura 24. Clasificación de los anfíboles de las unidades del volcán el Altar.....	34
Figura 25. Diagrama TiO ₂ vs. MgO de las biotitas de las unidades Riolita de Collanes y Gabro-Diorita	35
Figura 26. Mineralogía de los cristales de olivino.....	36
Figura 27. Clasificación de los óxidos de Fe-Ti de las unidades del volcán El Altar	37
Figura 28. Mosaico de minerales de las unidades del volcán El Altar.....	38
Figura 29. Test de equilibrio de Bacon & Hirschmann (1988) para ilmenita y titanomagnetita..	42

Figura 30. Diagrama de clasificación de rocas FeOt/MgO vs. SiO ₂ de Miyashiro, (1974).....	44
Figura 31. Composición de las rocas de El Altar dentro del diagrama AFM (A = Na ₂ O + K ₂ O ; F = FeO* ; M = MgO) de Irvine & Baragar, (1971)	44
Figura 32. Diagramas de clasificación de las rocas del volcán El Altar según Peccerillo & Taylor, (1976)	45
Figura 33. Diagrama de clasificación de las rocas del volcán El Altar según Le Bas et al., (1986)	46
Figura 34. Diagramas de Elementos Mayores vs. SiO ₂ (en porcentaje en peso).	47
Figura 35. Diagrama multielemental de las unidades del volcán El Altar.	48
Figura 36. Diagrama de tierras raras normalizado a las condritas de las unidades del volcán El Altar.....	48
Figura 37. Diagramas de elementos traza vs. SiO ₂	49
Figura 38. Diagramas de elementos traza vs. SiO ₂	50
Figura 39. Diagrama A'KF (A' = Al ₂ O ₃ – (Na ₂ O + K ₂ O); K = K ₂ O; F = FeO + MgO + MnO)	53
Figura 40. Diagramas de identificación de procesos de cristalización fraccional (CF) y fusión parcial (FP).....	56
Figura 41. Diagrama de tierras raras normalizado a la composición de la condrita (Sun & McDonough, 1989).	60
Figura 42. Diagrama multielemental normalizado a la composición del manto primitivo (Sun & McDonough, 1989)	61
Figura 43. Diagramas multielementales normalizados a la composición del manto primitivo (Sun & McDonough, 1989).....	61
Figura 44. Curvas de cristalización de las relaciones (a) La/Yb (b) Ba/La vs. La, producidas por el proceso de cristalización fraccional.....	62
Figura 45. Curvas de cristalización de las relaciones (c) Rb/Sr vs. Sr (d) La/Yb vs. Yb, producidas por el proceso de cristalización fraccional.....	63
Figura 46. Diagrama de tierras raras normalizado a la composición de la condrita (Sun & McDonough, 1989).	67
Figura 47. Diagrama multielemental normalizado a la composición del manto primitivo (Sun & McDonough, 1989).	68
Figura 48. Diagramas multielementales normalizados a la composición del manto primitivo (Sun & McDonough, 1989).....	68

Figura 49. Curvas de cristalización de las relaciones (a) Rb/Sr vs. Sr (b) Ni/Rb vs. Ni, producidas por el proceso de cristalización fraccional.....	69
Figura 50. Curvas de cristalización de las relaciones (c) La/Yb vs. La (d) La/Yb vs. Yb, producidas por el proceso de cristalización fraccional.....	70
Figura 51. Diagrama de REE normalizado a la composición de la condrita (Sun & McDonough, 1989).....	74
Figura 52. Diagrama multielemental normalizado a la composición del manto primitivo (Sun & McDonough, 1989).	74
Figura 53. Diagramas multielementales normalizados a la composición del manto primitivo (Sun & McDonough, 1989).....	75
Figura 54. Curvas de cristalización de las relaciones (a) La/Yb vs. La (b) La/Yb vs. Yb (c) Rb/Sr vs. Sr (d) Rb/Cr vs. Rb, producidas por el proceso de cristalización fraccional.....	77
Figura 55. Diagrama de REE normalizado a la composición de la condrita (Sun & McDonough, 1989).....	81
Figura 56. Diagramas multielementales normalizados a la composición del manto primitivo (Sun & McDonough, 1989). Se muestran las composiciones de las rocas padre, hijo y del modelo. .	82
Figura 57. Curvas de cristalización de las relaciones (a) Rb/Sr vs. Sr (b) La/Yb vs. Yb, producidas por el proceso de cristalización fraccional.....	82
Figura 58. Diagrama de REE normalizado a composición de la condrita (Sun & McDonough, 1989).....	86
Figura 59. Diagrama multielemental normalizado a la composición del manto primitivo (Sun & McDonough, 1989).	87
Figura 60. Curvas de cristalización de las relaciones (a) Ba/V vs. Ba (b) La/Yb vs. La, producidas por el proceso de cristalización fraccional.....	88
Figura 61. Mineralogía de los fenocristales de olivino, clinopiroxeno, ortopiroxeno y plagioclasas del Sangay. (Tomado de Monzier et al., 1999).....	89
Figura 62. Gráfico multielemental (Sun & McDonough 1989) y de tierras raras (McDonough & Sun 1995) de las muestras SAN 20B, RIO 35 y RIO 57F.	91
Figura 63. Composición modelada de SAN 20B (Sangay) tomado de Narváez et al., (2018) , y comparación de muestras RIO 35 y RIO 57F con dicho modelo.	93
Figura 64. Diagrama (La/Yb) N normalizado a manto primitivo (Sun & McDonough, 1989) vs. Sr/Th, Ba/Th.....	97
Figura 65. Modelo petrogenético del volcán El Altar.....	99

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Síntesis petrográfica de las unidades del volcán El Altar.	27
Tabla 2. Porcentaje de los minerales presentes en las distintas unidades.	28
Tabla 3. Gama composicional del vidrio de las distintas unidades.	39
Tabla 4. Resumen de temperaturas obtenidas para las unidades del volcán El Altar	40
Tabla 5. Temperaturas obtenidas para la unidad Brechas del Altar.	41
Tabla 6. Resumen de temperaturas y presiones obtenidas para las unidades Brechas del Altar y Brechas de Collanes.	42
Tabla 8. Resumen de P para los anfíboles obtenidos con el geobarómetro de Ridolfi & Renzulli, (2012b)	43
Tabla 9. Composiciones de roca padre, hijo y de los minerales que fraccionan utilizados en el modelo I.....	57
Tabla 10. Resultados del balance de masas realizado para el modelo I.....	57
Tabla 11. Coeficientes de distribución utilizados para el modelo I (Rollinson, 1993; “GERM Partition Coefficient (Kd) Database,” n.d.).....	58
Tabla 12. Composiciones en elementos traza para las rocas padre (Co) e hijo (CI real) de la cristalización fraccional y composiciones teóricas calculadas (CI calculado).....	59
Tabla 13. Composiciones de roca padre, hijo y de los minerales que fraccionan utilizados en el modelo II.....	64
Tabla 14. Resultados del balance de masas realizado para el modelo II.	64
Tabla 15. Coeficientes de distribución utilizados para el modelo II (Rollinson, 1993; “GERM Partition Coefficient (Kd) Database,” n.d.).....	65
Tabla 16. Composiciones en elementos traza para las rocas padre (Co) e hijo (CI real) de la cristalización fraccional y composiciones teóricas calculadas (CI calculado).....	66
Tabla 17. Composiciones de roca padre, hijo y de los minerales que fraccionan utilizados en el modelo III (Collanes).	71
Tabla 18. Resultados del balance de masas realizado para el modelo III (Collanes).	71
Tabla 19. Coeficientes de distribución utilizados para el modelo III (Collanes) (Rollinson, 1993; “GERM Partition Coefficient (Kd) Database,” n.d.).....	72
Tabla 20. Composiciones en elementos traza para las rocas padre (Co) e hijo (CI real) de la cristalización fraccional y composiciones teóricas calculadas (CI calculado).....	73

Tabla 21. Composiciones de roca padre, hijo y de los minerales que fraccionan utilizados en el modelo III (Collanes - Riolitas).....	78
Tabla 22. Resultados del balance de masas realizado para el modelo III (Collanes - Riolitas).	78
Tabla 23. Coeficientes de distribución utilizados para el modelo III (Collanes - Riolitas) (Rollinson, 1993; "GERM Partition Coefficient (Kd) Database," n.d.).....	79
Tabla 24. Composiciones en elementos traza para las rocas padre (Co) e hijo (CI real) de la cristalización fraccional y composiciones teóricas calculadas (CI calculado).....	80
Tabla 25. Composiciones de roca padre, hijo y de los minerales que fraccionan utilizados en el modelo.....	84
Tabla 26. Resultados del balance de masas realizado para el modelo.....	84
Tabla 27. Coeficientes de distribución utilizados para el modelo.....	84
Tabla 28. Composiciones en elementos traza para las rocas padre (Co) e hijo (CI real) de la cristalización fraccional y composiciones teóricas calculadas (CI calculado).....	85
Tabla 29. Características SAN 20B (a= en olivino, b= microlitos). (Tomado de Monzier et al., 1999).....	90
Tabla 30. Comparación de los olivinos y Cr-espinelas pertenecientes a las muestras SAN 20B (Sangay) y RIO 35 (El Altar).....	90

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Análisis de roca total.....	111
Anexo 2. Análisis mineralógico de microsonda electrónica	112
Anexo 3. Mapa geológico del volcán El Altar.....	121

RESUMEN

El Volcán El Altar, ubicado a 25 km al E de Riobamba, se encuentra sobre la Cordillera Real del Ecuador. Este volcán es considerado un estratovolcán extinto y no se ha reportado ningún depósito reciente asociado a su actividad. El objetivo de este estudio es definir la evolución magmática de los depósitos de El Altar mediante una caracterización petrográfica y geoquímica.

Para este trabajo se utilizó muestras de rocas obtenidas durante tres misiones de campo realizadas en los años 1999-2001. Las rocas muestreadas corresponden a lavas, brechas y diques, que varían entre composición basáltica a riolítica. Se definieron cuatro unidades en este volcán: 1) brechas del Altar (plg + cpx + ol + opx), 2) brechas de Collanes (plg + cpx + opx), 3) gabro-diorita (plg + cpx + bt + opx) y 4) riolita de Collanes (plg + anf + bt).

Adicionalmente, en este trabajo se analizaron láminas delgadas, elementos mayores y en traza obtenidos a partir de análisis en roca total y en minerales.

La variación de la composición entre las brechas de Collanes ($\text{SiO}_2 = 57\text{-}68 \text{ wt}\%$) y las riolitas de Collanes ($\text{SiO}_2 = 70\text{-}74 \text{ wt}\%$) junto a un menor contenido de HREE de las riolitas con respecto a las brechas, puede ser explicado por un 60% de cristalización fraccional, cuando el cumulado es de plg + anf + opx + cpx + ti-mt \pm apt.

Finalmente, a partir de la composición de los minerales individuales se definió condiciones pre-eruptivas de las unidades. De esta manera, se obtuvieron los siguientes parámetros: 1043 ° C y 2.78 kbar para muestras de la unidad brechas del Altar; 945 ° C y 3,6 kbar para muestras de la unidad brechas de Collanes y 850 ° C y 2,3 kbar para muestras de la unidad riolitas de Collanes.

Palabras Clave: volcanes cuaternarios, El Altar, petrografía, geotermobarometría, modelamiento geoquímico.

ABSTRACT

The El Altar Volcano located 25 km E of Riobamba is located on the Cordillera Real del Ecuador. This volcano is considered an extinct stratovolcano and no recent deposit associated with its activity has been reported. The objective of this study is to define the magmatic evolution of El Altar deposits through a petrographic and geochemical characterization.

For this work, rock samples obtained during three field missions carried out in the years 1999-2001 were used. Sampled rocks correspond to lavas, gaps and dikes, which vary between basaltic and rhyolitic composition. Four units were defined in this volcano: 1) Altar breccias (plg + cpx + ol + opx), 2) Collanes breccias (plg + cpx + opx), 3) gabro-diorite (plg + cpx + bt + opx) and 4) Collanes rhyolite (plg + anf + bt).

Additionally, in this work, thin sheets, larger and trace elements obtained from total rock and mineral analysis were analyzed.

The variation of the composition between the Collanes breccias ($\text{SiO}_2 = 57\text{-}68 \text{ wt}\%$) and the Collanes rhyolites ($\text{SiO}_2 = 70\text{-}74 \text{ wt}\%$) together with a lower HREE content of the rhyolites with respect to the breccias, can be explained by 60% fractional crystallization, when the cumulate is plg + anf + opx + cpx + ti-mt \pm apt.

Finally, pre-eruptive conditions of the units were defined from the composition of the individual minerals. In this way, the following parameters were obtained: 1043 ° C and 2.78 kbar for samples from the Altar breccias unit; 945 ° C and 3.6 kbar for samples of the unit Collanes breccias and 850 ° C and 2.3 kbar for samples of the unit rhyolites of Collanes.

Keywords: quaternary volcanoes, Altar volcano, petrography, geothermobarometry, geochemical modelling.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes y justificativos

El presente proyecto se lleva a cabo con la finalidad de proponer por primera vez un modelo de evolución magmática para el volcán El Altar, un estratovolcán extinto desde, aproximadamente un millón de años (Ettinger & Eissen, 2001). Este trabajo se lo realiza a través del estudio de la petrografía y geoquímica de las rocas de este volcán y del modelamiento de su composición geoquímica.

Con respecto a la geología y geoquímica de El Altar, 5 grupos geológicos ya han sido definidos para las rocas de este volcán, en base a su química y petrografía (Eissen et al., 2004). Esta clasificación funciona como base y contribuye, en un comienzo, para la elaboración de la historia geológica de El Altar.

El uso de técnicas de modelamiento geoquímico, la aplicación de geotermómetros y geobarómetros, así como el entendimiento de los procesos magmáticos, ayuda a la determinación de la evolución del magma y la génesis de las rocas del volcán El Altar. Los distintos métodos usados requieren del conocimiento sobre las materias de petrología ígnea, procesos magmáticos, geoquímica y petrogénesis de rocas ígneas.

El modelo de evolución propuesto, las condiciones en profundidad del magma y la descripción de la geología y geoquímica de las rocas del volcán El Altar, ayudarán en investigaciones futuras, no solo aquellas enfocadas a la misma zona; sino también aquellas relacionadas con temas asociados a la petrología, ya sea en volcanes del Ecuador, o en aquellos situados en contextos geológicos similares.

1.1.1 Justificación teórica

El Altar es un estratovolcán extinto desde aproximadamente 1 millón de años. Está localizado sobre la Cordillera Real del Ecuador (Ettinger & Eissen, 2001). Las composiciones de las rocas del volcán El Altar varían desde basaltos hasta riolitas principalmente en el límite entre los campos de medio y Alto potasio. La mayoría de las brechas, flujos de lava y diques son andesíticos y pertenecen a la misma serie geoquímica. Algunas de las muestras de la intrusión gabro-diorítica presentan un fuerte enriquecimiento en potasio (Ettinger &

Eissen, 2001). La investigación está dirigida hacia una definición detallada de la mineralogía y afinidad geoquímica de estas rocas con el fin de elaborar el modelamiento geoquímico.

1.1.2 Justificación metodológica

La poca información publicada relacionada con este volcán está enfocada al análisis de sus elementos geomorfológicos y geoquímicos de manera muy general. La falta de detalle en los estudios, en aspectos como la geoquímica del volcán dejó en evidencia la necesidad de realizar un estudio a profundidad. Este estudio pretende corregir este vacío en el conocimiento del volcán El Altar mediante la elaboración de un mapa geológico, descripción de láminas delgadas, análisis químicos de roca total (i.e. elementos mayores y traza) y análisis químicos de minerales. La geoquímica de roca total y minerales fueron utilizados al momento de aplicar geotermobarómetros y realizar el modelamiento geoquímico de las rocas de este volcán. Finalmente, este estudio aporta con nueva información al conocimiento geológico y petrológico de El Altar.

1.1.3 Justificación práctica

La nueva información sobre la mineralogía, petrología, geoquímica permitió entender la evolución geológica del volcán El Altar y modelar su composición geoquímica para entender sus procesos magmáticos. El modelo propuesto será de gran ayuda para investigaciones futuras, dada la poca información de esta índole acerca del objeto de estudio.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

- Determinar un modelo evolutivo del volcán El Altar que permita describir las variaciones composicionales de sus rocas, así como la génesis del magma parental a partir de datos geoquímicos y petrográficos.

1.2.2 Objetivos específicos

- Describir la petrografía de las rocas del volcán El Altar de manera microscópica (láminas delgadas).
- Discriminar los depósitos del volcán El Altar en unidades basados en la composición química de sus rocas.

- Interpretar y modelizar los distintos procesos de evolución del volcán El Altar en base a la composición de elementos mayores y trazas de sus rocas.
- Aplicar geotermómetros y geobarómetros.

1.3 Alcance

- Analizar la composición de roca total en elementos mayores y en trazas para descubrir los procesos magmáticos como cristalización fraccional, mezcla de magmas o asimilación.
- Utilizar datos de microsonda electrónica realizada tanto en minerales, como en matriz para aplicar geotermobarómetros y determinar las condiciones pre-eruptivas de los depósitos volcánicos del volcán El Altar.

1.4 Ubicación

El Altar está localizado en la parte central de la Cordillera Real del Ecuador. Se ubica a 25 km al Este de la ciudad de Riobamba. Sus cumbres incluyen seis picos cubiertos de nieve y hielo que alcanzan alturas sobre los 5 000 m (Eissen et al., 2004). El volcán abarca las hojas topográficas, con escala de 1:50000, de “Palitagua” y “Volcán El Altar”. El área de estudio posee una extensión de aproximadamente 91 km².

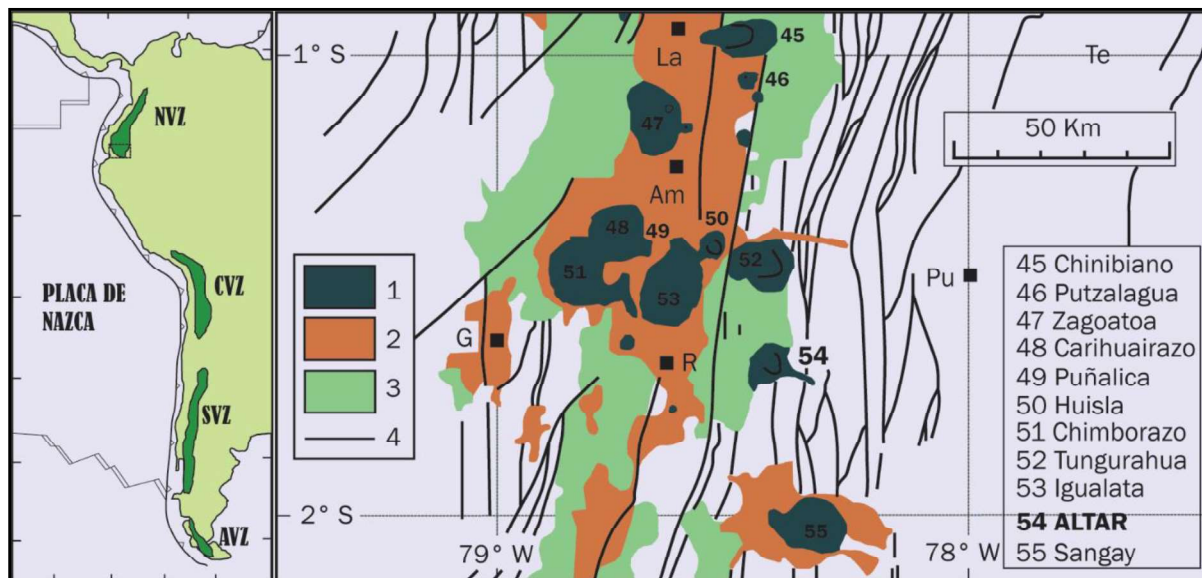


Figura 1. Mapa de ubicación del volcán El Altar en la Cordillera Real.

NVZ, CVZ, SVZ, AVZ: *Northern, Central, Southern, Austral Volcanic Zones*; 1= Volcanes cuaternarios; 2= Depósitos volcánicos distales, 3= Depósitos volcánicos pliocénicos; 4= Fallas; G= Guaranda; R= Riobamba; Te= Tena; Pu= Puyo; Am= Ambato; La= Latacunga. Modificado de Eissen et al., 2004

1.4.1 Fisiografía e hidrografía

La morfología de El Altar es la de un cono volcánico, el cual se encuentra erosionado y abierto hacia la parte occidental, en donde se observa una cicatriz de avalancha en forma de herradura. La morfología de la zona de estudio presenta pendientes fuertes hacia el lado Este del volcán, donde existe la cobertura glacial y alcanza la mayor altitud sobre el nivel del mar. En esta zona se encuentran ubicadas las cumbres que forman la cicatriz de avalancha que son, de Sur a Norte: "El Obispo" (~5330 m), "La Monja Grande" (~5310 m), "La Monja Chica" (~5154 m), "El Tabernáculo" (cumbre Sur 5209 m y cumbre Norte 5182 m), "Los Frailes" (cumbre Sur-Este 5196, central ~5125 m y Nor-Oeste 5245 m), y "El Canónigo" (5259 m) (Eissen et al., 2004). Hacia la parte occidental, pasando por la laguna de Collanes, el rasgo morfológico predominante corresponde a la Quebrada de Collanes, la cual presenta fuertes pendientes. Hacia el sur de la zona de estudio, se encuentra ubicada la Cordillera de Mandur.

La hidrografía de la zona se encuentra representada por un bajo número de cuerpos fluviales. El más relevante es el Río Collanes hacia el occidente. Cabe recalcar la presencia de cuerpos de agua distribuidos en la zona, siendo los principales cuerpos, de N a S, la Laguna de Collanes, la cual se encuentra ubicada al fondo de la caldera, Laguna de Mandur, Laguna Negra Pacha, Laguna Verde y la Laguna La Estrellada. La Laguna de Collanes es una laguna glaciar, de 1.1 km de largo y 574 m de ancho, ubicado a una cota de 4170 msnm (Eissen et al., 2004).

1.5 Estudios previos

Los estudios que se han realizado en el área son los siguientes:

Bonney, (1884). Este trabajo es uno de los más antiguos del cual se tiene registro y describe la morfología del volcán, la cual propone resulta de un colapso del cráter. Además, presenta una breve descripción petrográfica conseguida a través del muestreo de distintas rocas. El autor describe varios grupos de rocas: (1) rocas compactas muy oscuras con escasos feldespatos y que ocasionalmente presentan vesículas, en las cuales microscópicamente se observa que su matriz es compuesta por vidrio principalmente; (2) lava escoriácea de color rojo a café, la cual comúnmente presenta pequeños cristales de feldespatos y a la que se la denomina andesita con augita; (3) roca oscura muy compacta que contiene una gran cantidad de feldespatos con una matriz compuesta por una masa de microlitos de plagioclasa, augita y óxidos, siendo esta roca un miembro del grupo de andesitas con augita; y (4) una traquita de color rojizo grisáceo con

escasos cristales de feldespatos con una matriz principalmente compuesta por vidrio con numerosos cristales de feldespatos.

Baldock, (1982). En este boletín de la explicación del mapa geológico del Ecuador, se explica la geología de la Costa, Sierra y Oriente. Dentro de la geología de la región Sierra se ha definido el Grupo Altar el cual consiste en una agrupación de varios estratovolcanes que en su mayoría han sido erosionados. Estos depósitos se encuentran ubicados en la parte centro y norte del Ecuador. Este grupo se presenta en tres lineamientos ubicados en la Cordillera Real, en el valle Interandino y la Cordillera Occidental. El Volcán El Altar se encuentra en el lineamiento comprendido en la Cordillera Real junto al Quilandaña, Sincholagua, Puntas, Cayambe y otros. La mayoría de estos volcanes presentan una composición andesítica. Para el volcán El Altar se infiere una edad Pleistocénica debido a la falta de evidencia de actividad en el Holoceno.

Lavenu et al., (1992). En este trabajo se describe la recolección de rocas en la base del volcán El Altar, en la Loma Bellavista (13 km SSE de Riobamba). Estas rocas, mediante una datación K/Ar, indican una edad para los volcánicos de El Altar de 3.53 ± 0.94 Ma (plioceno tardío) y se las considera equivalentes a la formación Sicalpa. Los depósitos volcánicos más juveniles, según el autor, son presumiblemente de edad Pleistocénica.

Ettinger & Eissen, (2001). Describe que el contorno del volcán El Altar estuvo y está cubierto por glaciares. También que hacia el E el glaciar alcanza su menor altitud debido a la humedad proveniente de la región oriental y que el retroceso más notable del glaciar se ha dado en el interior de la caldera. Según los autores, en el año 1956, todo el volcán se encontró cubierto de nieve y glaciares. En el año 1977 se evidenció un retroceso dejando gran parte del fondo de la caldera libre de hielo. Una característica que ayuda a corroborar dicho retroceso es que en 1956 la laguna de Mandur y la laguna de Negra Paccha fueron ocupadas totalmente por glaciares; al contrario, en 1977 estuvieron libres de hielo. Los depósitos glaciares en forma de morrenas laterales y frontales se encuentran ubicados en la caldera y al lado S del valle de Collanes. La morrena bajo la salida de la caldera es de material grueso y suelto, a diferencia de las demás.

Eissen et al., (2004). En este estudio se concluye que el flujo de lodo que llegó al río Pastaza ocurrido el 13 de octubre del 2000 fue producido por el desprendimiento de una parte de la cara N del pico Monja Grande. Este desprendimiento de roca, que cayó sobre la Laguna Amarilla, provocó una ola de agua que viajó en forma de flujo de lodo valle abajo por los ríos Collanes, Blanco, Chambo y Pastaza. Se describe al volcán El Altar como un estratovolcán andesítico que

se encuentra sin actividad desde hace 1Ma. El retroceso glaciar ha provocado que restos de los glaciares se encuentran sobre los 4500 m. La parte interior de la caldera está compuesta por una intrusión de gabro diorita hacia el N, la cual se encuentra en contacto hacia el S con un cuerpo riolítico, el cual está en contacto con andesitas vítreas, tipo obsidiana. El cuerpo riolítico es más antiguo que la intrusión de gabro diorita debido a que diques riolíticos cortan a la mencionada intrusión de gabro-diorita. Posteriormente, el cuerpo riolítico es cortado por una serie de diques andesíticos. La parte superior del volcán se encuentra conformada por brechas andesíticas. El final de la actividad volcánica presumiblemente concluyó por el colapso de la estructura hacia el oeste.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Ambiente Geodinámico actual

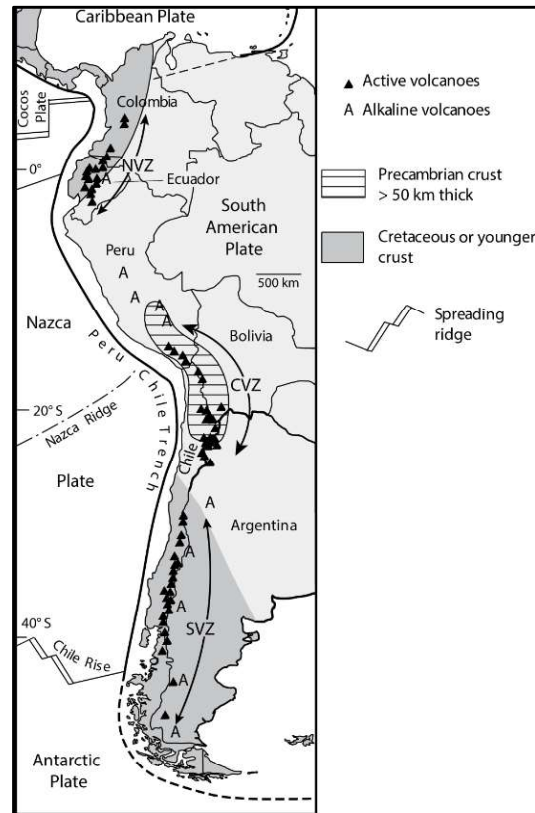


Figura 2. Mapa de los Andes Sudamericanos.

Se muestra el marco tectónico, la distribución volcánica y de los tipos de corteza. Tomado de Winter, (2014). NVZ, CVZ, SVZ= Northern, Central, Southern volcanic zones.

Los andes sudamericanos han sido divididos en cuatro zonas conocidas como zonas volcánicas del Norte, Central, del Sur y Austral (NVZ, CVZ, SVZ, AVZ) por sus siglas en inglés. La zona volcánica del Norte está comprendida entre las latitudes 5°N y 2°S, incluyendo las cordilleras de Colombia y Ecuador (Winter, 2014).

El Ecuador, ubicado en la NVZ que corresponde a un margen convergente activo, está caracterizado por la subducción entre las Placas Nazca y Sudamericana, a una velocidad de 58 mm/año y con una dirección de convergencia N 83° E (Trenkamp et al., 2002; Kendrick et al., 2003). Según Vallejo et al. (2009) este proceso de subducción comienza en el Maastrichtiano

tardío. La placa subductante Nazca, junto con la Placa de Cocos, son dos fragmentos productos de la ruptura de la Placa Farallón. La ruptura sucede en el Oligoceno (~27 Ma) (Lonsdale, 2005).

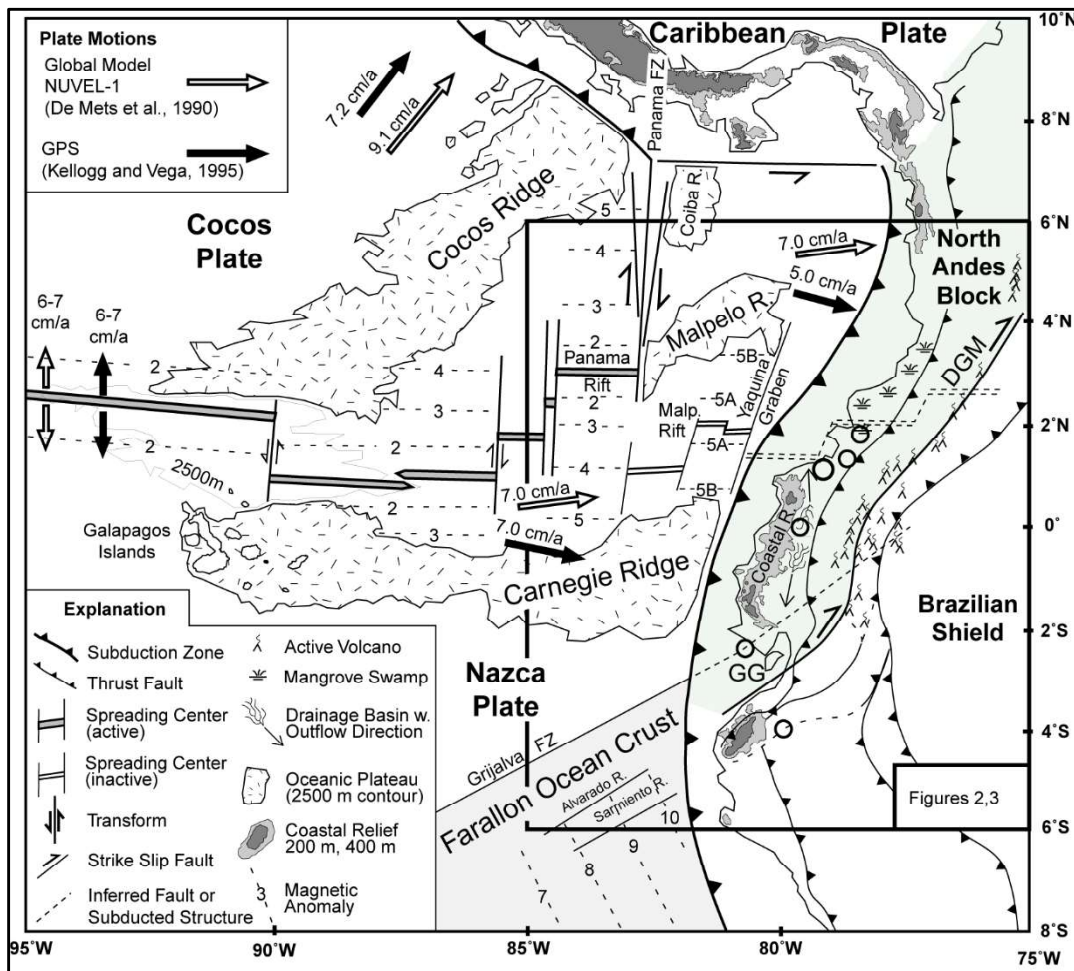


Figura 3. Marco geodinámico ecuatoriano.

Se observa la subducción de la placa Nazca, cordillera de Carnegie y fractura de Grijalva bajo los Andes septentrionales. Tomado de Gutscher et al., (1999)

Los dos fenómenos geológicos mencionados anteriormente, la creación de las Placas de Cocos y Nazca a partir de la Placa Farallón, y la creación de la Cordillera de Carnegie, se deben a la acción del Punto Caliente Galápagos (Lonsdale, 2005; Hall et al., 2008).

El proceso de subducción se complica debido a la presencia de dos elementos topográficos los cuales son: 1) la cordillera asísmica de Carnegie que posee una altura y un ancho de 2 y 200 Km respectivamente, y 2) la fractura de Grijalva, cuyo origen es relacionado al contraste de

densidades entre una corteza más joven y caliente al N (Nazca) y una más antigua y fría al S (Farallón) (Yepes et al., 2016).

Varios autores proponen varias edades para la llegada e inicio de la subducción de la Cordillera de Carnegie en la fosa Sudamericana. Así, 1 Ma (Lonsdale & Klitgord, 1978), 8 Ma (Gutscher et al., 1999), ~ 15 Ma (Spikings et al., 2001), constituyen el rango de edades existente para el comienzo de la interacción entre Carnegie y el margen sudamericano. Además, en el trabajo de Yepes et al., (2016) se propone que tanto la cordillera asísmica de Carnegie y la fractura de Grijalva han estado ingresando a la zona de subducción hace al menos 3-6 Ma y que éstas han penetrado de 300-500 km por debajo del continente.

La llegada de la cordillera asísmica de Carnegie a la zona de subducción ha dado paso a procesos geológicos como el levantamiento de la costa, al desplazamiento del bloque Nor-andino hacia el N (Gutscher et al., 1999), y ha marcado características geoquímicas dando paso a un cambio de magmatismo calco-alcalino a magmas con características adaquíticas (Bourdon et al., 2003a; Samaniego et al., 2005).

2.2 Geología Regional

El bloque Nor-andino es un bloque o porción de litósfera separada del resto de la Placa Sudamericana, por la acción de esfuerzos tectónicos compresionales. Es una de las astillas “slivers” continentales acuñadas entre la Placa Nazca y la Placa estable de Sudamérica. Su formación está asociada a la llegada de la cordillera de Carnegie al margen continental (Gutscher et al., 1999); y su movimiento está relacionada a la componente transcurrente de la subducción (Nocquet et al., 2014). Su movimiento se da hacia el NE a una razón de 9 mm/año. Este bloque está limitado por el sistema de fallas Chingual – Cosanga – Pallatanga - Puná (CCPP), una serie de fallas transpresivas que marcan el límite hacia el O de la placa sudamericana (Alvarado et al., 2016).

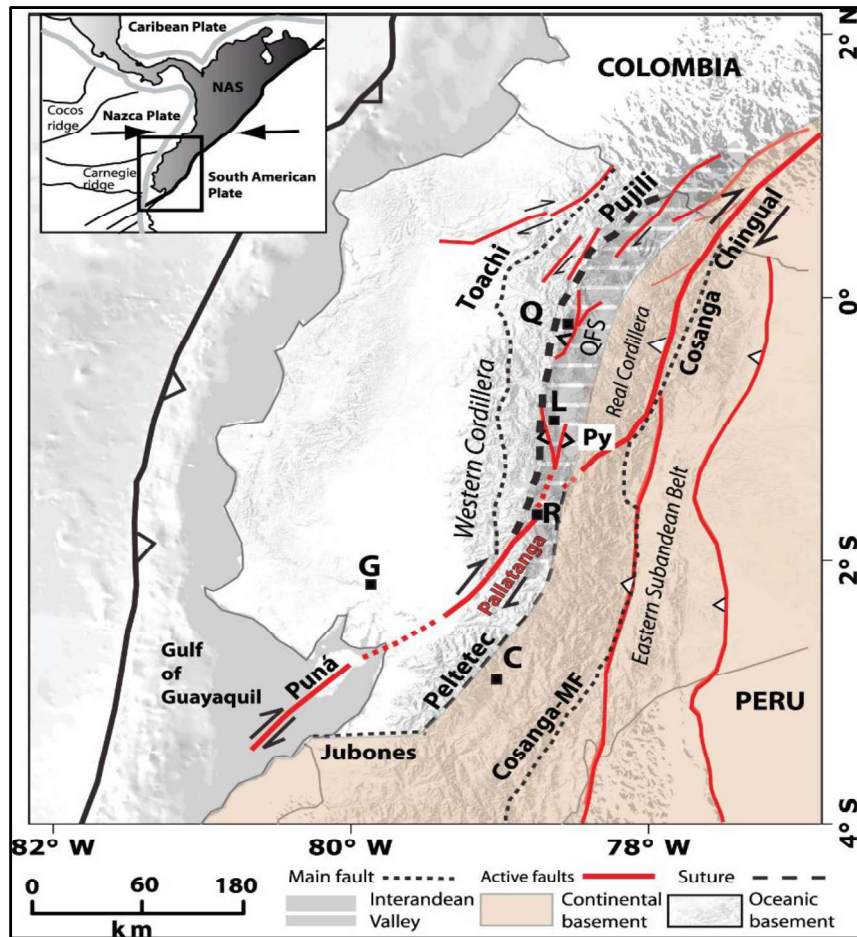


Figura 4. Mapa tectónico del Ecuador.

NAS = *North Andean Sliver*, Cosanga-MF = *Cosanga Méndez Fault*, Py = *Pisayambo zone*, QFS = *Quito active Fault System*. (Tomado de Alvarado et al., 2016)

Los altos relieves de la cordillera de los Andes en Ecuador constan de dos cadenas montañosas paralelas con rumbo NNE, la Cordillera Occidental situada hacia el oeste y la Cordillera Real hacia el este, separadas por una región de morfología planar denominada Depresión Interandina (Aguilera, 1998; tomado de Aguilera et al., 2005).

2.3 Geología Cordillera Real

2.3.1 División Guamote

Esta división se encuentra en la parte occidental central de la Cordillera Real, limitada hacia el este por el Complejo Peltetec y hacia el oeste por la falla de Ingapirca. Litológicamente

comprende ortocuarcitas metamorizadas intercaladas con pizarras. La división Guamote se encuentra conformada por tres unidades (Litherland, Aspden, & Jemielita, 1994):

Unidad Punín: comprende cuarcitas y en menor cantidad filitas de distintas tonalidades.

Unidades Cebada y Guasuntos: comprenden principalmente filitas de color negro y en menor cantidad cuarcitas.

Litherland et al. (1994) ubica a esta división en el Jurásico-Cretácico temprano. Dataciones U-Pb realizadas por Cochrane (2013) en zircones detríticos indican edades que van desde 3 Ga hasta 150 Ma. Su edad máxima de depositación es de 155 Ma (Spikings et al., 2015). Pratt et al. (2005) propone que las rocas de la división Guamote son la continuación estratigráfica de la secuencia volcánica Alao.

2.3.2 División Alao

Esta división comprende rocas metavolcánicas y metasedimentarias. Está limitada hacia al oriente por la falla Baños y hacia el occidente por la falla Peltetec. Esta división está conformada por cuatro unidades (Litherland et al., 1994):

Unidad Peltetec: es un cinturón estrecho de rocas ofiolíticas de 1-2 km de ancho y está delimitado hacia el O por la Unidad Punín y Cebadas de la División Guamote, y hacia el E por la Unidad Maguazo.

Unidad Maguazo: es un cinturón de rocas turbidíticas y volcánicas metamorizadas de aproximadamente unos 5-10 km de ancho. Se encuentra delimitada tectónicamente hacia el occidente por las ofiolitas de Peltetec y hacia el oriente por la unidad Alao - Paute a lo largo de la falla San Antonio. Información palinológica en esta unidad ha permitido establecer una edad Jurásica.

Unidad Alao-Paute: conformada por esquisto verdes con afinidad geoquímica toleítica.

Unidad El Pan: comprende esquistos verdes de cuarzo-calcita-clorita, esquisto grafitosos, filitas cuarzo - sericíticas, esquistos de cuarzo-albita-epidota-clorita y en menor cantidad cuarcitas junto con mármoles negros. Se encuentra como un cinturón de 70 km de largo y 7 km de ancho. Una espora tentativamente identificada como Uvaesporita indicaría una edad Jurásica a Cretácica temprana.

Litherland et al., (1994) reporta edades K/Ar en hornblendas de 115 y 142 Ma. Spikings et al. (2015) presenta edades $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de basaltos de la Unidad Peltetec de 134 Ma, y relaciona a las rocas de la división Alao con un arco del Cretácico temprano.

2.3.3 División Loja

Está limitada hacia el O por el Frente Baños y hacia el E se encuentra en contacto tectónico con la división Salado, de la cual se encuentra separada por la falla Llanganates. Esta división es continua a lo largo de toda la cordillera Real, excepto en la sección del río Paute. Se encuentra configurada por las siguientes unidades (Litherland et al., 1994):

Unidad Chiguinda: comprende principalmente cuarcitas y filitas de color negro consideradas como una secuencia semipelítica. Se presenta como un cinturón de 30 km de ancho en la parte S de la cordillera; mientras que, se acuña hacia el N aflorando sobre el complejo de napas de Cuyuja. Presencia de micro esporas pobremente preservadas con una edad post-silúrico.

Unidad Agoyán: comprende esquistos pelíticos que contienen granate y muscovita, así como paragneises de grano grueso.

Unidad Monte Olivo: comprende las anfibolitas del terreno Loja, presentes como cinturones de 2 km de ancho, así como diques y lentes de menor dimensión. Litológicamente son esquistos anfibolíticos de afinidad máfica metabasáltica con una paragénesis mineral compuesta por hornblenda, cuarzo, calcita, epidota y biotita. También se tiene anfibolitas masivas de grano fino a medio con granate.

Unidad Granito Tres Lagunas: comprendido por granitos de cuarzo azul, presentes como batolitos y lentes. Está asociada a rocas de tipo metasedimentarias de Chiguinda y Agoyán. Esta unidad tiene una textura masiva a esquistosa y contiene feldespato de K, plagioclasas, biotita y cuarzo de una tonalidad azul pálida, que es la característica de dicha unidad y el mineral más abundante 35-39%.

Unidad Sabanilla: comprendida por orto y paragneises de medio a alto grado. Se encuentran en un cinturón de 10 km de ancho al N de la frontera con Perú. En el borde occidental de esta unidad se observan cuarcitas con un buzamiento fuerte a vertical, que contienen silimanita y muscovita, mientras que hacia el E se encuentra ortogneises con muscovita predominantemente.

Análisis radiométricos de K-Ar y Rb-Sr realizados en estas rocas han dado edades de 224 ± 37 Ma (Litherland et al., 1994). Metagranitos y migmatitas de las unidades Tres Lagunas y Sabanilla resultaron en edades U-Pb entre 227 a 247 Ma (Litherland et al., 1994; Cochrane et al., 2014).

Cochrane et al. (2014) interpreta las rocas de la división Loja como productos de un rift triásico al oeste de Pangea.

2.3.4 División Salado

Esta división litotectónica se presenta como una franja angosta de aproximadamente 25 km de ancho a lo largo del flanco oriental de la cordillera Real. Tiende a desaparecer en un contacto tectónico hacia el S cerca de Zamora. Comprende rocas máficas volcánicas metamorizadas o conocidas como piedras verdes (greenstones) y rocas metasedimentarias. El límite hacia el E de esta división es la falla Cosanga-Méndez, y hacia el O se encuentra en contacto tectónico con el terreno Loja. La división ha sido subdividida en cuatro unidades (Litherland et al., 1994):

Unidad Upano: Comprende rocas verdes y rocas metasedimentarias que se presentan a lo largo de una cadena de 15 Km de ancho que se encuentra ubicada en el borde oriental de la cordillera Real. Litológicamente está comprendida por rocas verdes meta andesíticas, esquistos verdes y metagrawacas intercaladas con esquistos del tipo pelítico y grafitoso; sin embargo, el rasgo característico son las meta-andesitas de color verde. Se le atribuye una edad de Jurásico tardío a medio (Litherland et al., 1994).

Unidad Cuyuja: esta subdivisión perteneciente a la división Salado se encuentra al N de la cordillera. Comprende un cinturón de 10 km de ancho aproximadamente dentro del complejo de napas de Cuyuja. Esta unidad forma parte del grupo litoestratigráfico que comprende las unidades de Upano y Cerro Hermoso. Está comprendida por esquistos de grafito y muscovita, los cuales se superponen tectónicamente sobre esquistos muscovíticos. Dataciones radiométricas en cordieritas y sillimanitas han dado como resultado una edad Jurásica (Litherland et al., 1994).

Unidad Cerro Hermoso: referida a la secuencia carbonatada de Cerro Hermoso. Esta unidad al igual que las unidades de Cuyuja y de Upano, ha sido intruída por el plutón de Azafrán.

Unidad Azafrán: son cadenas de aproximadamente 10 km de ancho y con contactos tectónicos con las rocas adyacentes de la división Salado. Consiste en una cadena de granitoides metamorizados.

A la unidad Upano se le atribuye una edad de Jurásico tardío-Cretácico temprano. Además, análisis U-Pb en zircones del granito de Azafrán resultaron en edades de 142.7 ± 1 Ma (Litherland et al., 1994). Cochrane (2013) reporta edades U-Pb de 121 Ma. en una meta-andesita de la unidad Upano, y de 140-143 Ma para el Batolito de Azafrán.

2.3.5 División Zamora

Comprende una serie de tres plutones graníticos que están asociados a las rocas volcánicas atribuidas a la unidad Misahuallí (Litherland et al., 1994).

Plutón Rosa Florida: litológicamente se encuentra comprendido hacia el N por monzonitas cuarzo-biotita de grano grueso y color gris, así como de sienitas de cuarzo-biotita de grano grueso y un color rosa profundo. Un rasgo distintivo es su color rosa, debido al feldespatos de K en las rocas sieníticas. Frecuentemente se encuentra diques autobrechificados y xenolitos de rocas verdes.

Granito de Abitagua: Plutón de forma alargada de aproximadamente 120 km y de 15 km de ancho. Está compuesto por monzogranitos de biotita, de grano medio a grueso y de color rosa. Algunos cambios litológicos son identificados; como por ejemplo hacia el O, el granito de hornblenda y biotita de grano medio es intruido por un granito de biotita y de grandes cristales de feldespatos de K. Es común encontrar diques y xenolitos de composición máfica a félsica.

Batolito de Zamora: comprende un batolito de 200 m de largo y 50 km de ancho segmentado en tres partes por las fallas de La Canela y Nangaritza. Litológicamente está compuesto por granodioritas y dioritas de hornblenda y biotita.

Dataciones radiométricas en los plutones resultan en edades Jurásicas, entre 150-190 Ma (Litherland et al., 1994; Chiaradia et al., 2009; Cochrane, 2013). Spikings et al. (2015) interpreta estos intrusivos como los productos de un arco continental Jurásico que viene migrando hacia occidente, mismo que luego da origen al granito de Azafrán de la Unidad Salado.

CAPÍTULO III METODOLOGÍA

3.1 Recopilación Bibliográfica

Para este trabajo se realizó la búsqueda de tesis, artículos científicos, informes técnicos y de cualquier tipo de investigación realizada en el volcán El Altar. Esta recopilación bibliográfica permitió realizar un breve reconocimiento de características geológicas del volcán, como también de las características petrográficas y geoquímicas de sus rocas. Además, permitió conocer eventos suscitados en el volcán.

3.2 Muestreo

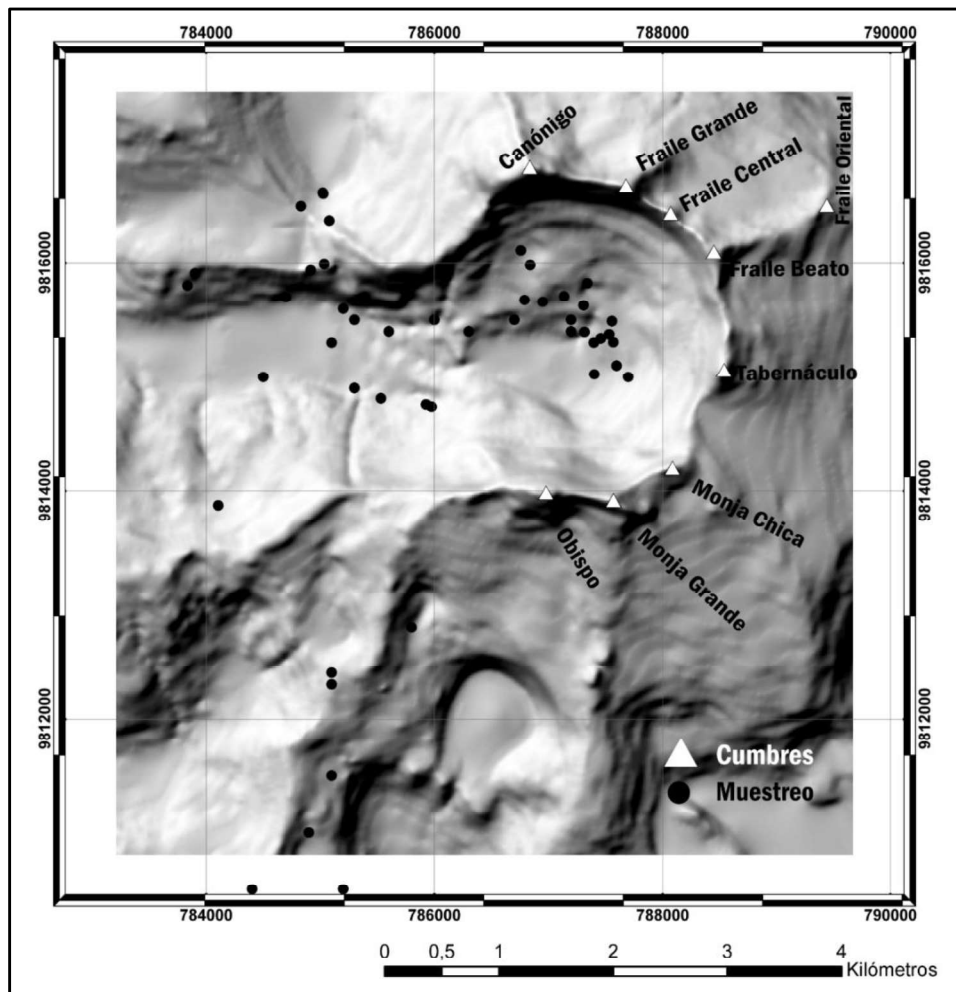


Figura 5. Mapa de ubicación de muestras en el volcán El Altar.

Las muestras fueron recolectadas en 3 misiones llevadas a cabo en El Altar en los años 1999, 2000 y 2001 por: Michael Monzier (Director Misión), Jean-Philippe Eissen, Bernardo Beate, Silvana Hidalgo, Daniel Andrade y Cesar Witt. Se tomó dichas muestras en distintos sitios del volcán El Altar. Las muestras han sido recolectadas dentro de la caldera del volcán, en el valle de Collanes, a lo largo de la Cordillera de Mandur y en la Cordillera Pailacajas. Se trabajó con 61 muestras, las cuales se observan en la Figura 5.

3.3 Descripción microscópica

Para este trabajo se contó con 117 láminas delgadas, en las cuales se realizó la descripción microscópica con la ayuda de un microscopio petrográfico. Dicha descripción permitió identificar la paragénesis mineral de las rocas del volcán El Altar; así como, la identificación de características texturales de los minerales como zonaciones, bordes de reabsorción, maclas, etc. Los resultados de estas descripciones son presentados y resumidos en el capítulo 4 de resultados.

3.4 Geoquímica de roca total

Se realizó análisis de roca total en 61 muestras, en el laboratorio de la Universidad de Bretaña Occidental (UBO). Se obtuvo el contenido en elementos mayores, menores, así como en trazas. Los análisis fueron llevados a cabo bajo estándares internacionales y bajo referencias internas del laboratorio de petrología de la UBO. Se obtuvo las concentraciones de: Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K, P (en forma de óxidos), Sc, V, Cr, Co, Ni, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Ba, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Er, Yb y Th. Los resultados de estos análisis se presentan en el **Anexo 1**.

3.5 Microsonda electrónica

Se contó con el análisis de 22 láminas delgadas en microsonda electrónica, 10 de la unidad *Brechas de Collanes*, 9 de la unidad *Brechas del Altar*, 2 de la unidad *Riolita de Collanes* y 1 de la unidad *Gabro Diorita*. Los análisis fueron realizados por Michael Monzier en el Laboratorio de Magmas y Volcanes de la Universidad Blaise Pascal de Clermont-Ferrand. Se efectuó los análisis con la microsonda CAMECA SX-100, bajo las siguientes condiciones: 15 kV tensión de aceleración, 10 nA corriente, 10 s de conteo para cada elemento analizado. Mediante este proceso se ha podido obtener la composición de los minerales y del vidrio de las rocas del volcán El Altar. Los resultados de la microsonda electrónica son presentados en el **Anexo 2**.

3.6 Geotermobarometría

Los trabajos realizados por Putirka (2008), Pu et al., (2017), Ghiorso & Evans (2008) presentan varios geotermómetros y geobarómetros, los cuales utilizan composiciones de minerales y vidrio volcánico y son empleados para determinar las condiciones de último equilibrio (i.e. condiciones pre-eruptivas) entre las fases minerales o entre las fases minerales y el líquido magmático.

Para empezar, se selecciona la composición de los pares minerales que deben estar en equilibrio al momento de su formación; para así poder determinar de manera correcta los distintos parámetros (presión y temperatura). Para asegurar el equilibrio en la selección de minerales se seleccionó cristales automorfos y minerales que se encuentren cerca uno del otro y se evitó minerales con texturas de desequilibrio (e.g. texturas de exsolución). Finalmente se aplicaron varios tests de equilibrio (e.g. Bacon & Hirschmann, 1988) para confirmar, la existencia del equilibrio de manera cuantitativa.

3.7 Modelización geoquímica

El modelamiento geoquímico consta de dos partes. La primera se basa en el uso de la química de elementos mayores para la determinación del grado de cristalización y composición del cumulato; mientras que para la segunda se utilizan los elementos traza y resultados obtenidos en la primera parte.

Con la química de las rocas en elementos mayores, tanto de los análisis de roca total como de los análisis minerales, se determina la composición del cumulato que debe fraccionar para causar la variación composicional observada en las muestras de cada una de las unidades. A través de un balance de masas, se calcula la composición mineral del cumulato junto con el correspondiente grado de cristalización, que expliquen el paso de una composición inicial a una final, en este caso, de la composición del magma padre a la del magma hijo. Para dicho balance de masas, los datos de entrada necesarios son: análisis de roca total de las rocas y análisis de los minerales que potencialmente formarían el cumulato.

El balance de masas se lo realiza con la ayuda del programa OPTIMASBA (Cabero et al., 2012). Este trabajo consta de un libro de EXCEL, el cual, por medio de la aplicación de conceptos estadísticos y geológicos, optimiza la elección entre las distintas combinaciones de rocas y minerales dentro de un balance de masas. El balance de masas puede ser validado a través de su suma de los cuadrados debido al error (SEE). Mientras el valor del SSE se aproxima más a la unidad, el balance de masas tendrá un mejor ajuste.

Una vez obtenido los minerales y sus porcentajes en el cumulado a fraccionar, se procede a trabajar con la química de los elementos traza. El fundamento de la modelización es el mismo que en la etapa anterior (i.e. modelamiento con elementos mayores), desde una composición inicial, a una final; pero con los elementos trazas. Se obtiene una composición teórica de un magma hijo, a partir de la composición real de la roca escogida como magma padre. Esto se lleva a cabo mediante la aplicación del modelo de cristalización fraccional de Rayleigh (1986):

$$C_l = C_o * f^{(\bar{D}-1)}$$

Donde:

C_l = composición del magma hijo o líquido final.

C_o = composición del magma padre o líquido inicial.

f = fracción del líquido residual ($0 \leq f \leq 1$); tasa de cristalización $X = 1 - f$

D = coeficiente global de distribución, mismo que se define como:

$$\bar{D} = \sum (W_j * D_i^j)$$

Donde:

W_A = fracción en peso del mineral j en la roca, en este caso, en el cumulado; $\sum(W_j) = 1$

D_i^A = coeficiente de distribución para el elemento i en el mineral j .

En la Figura 6 se resume el flujo de trabajo efectuado en el modelamiento geoquímico.

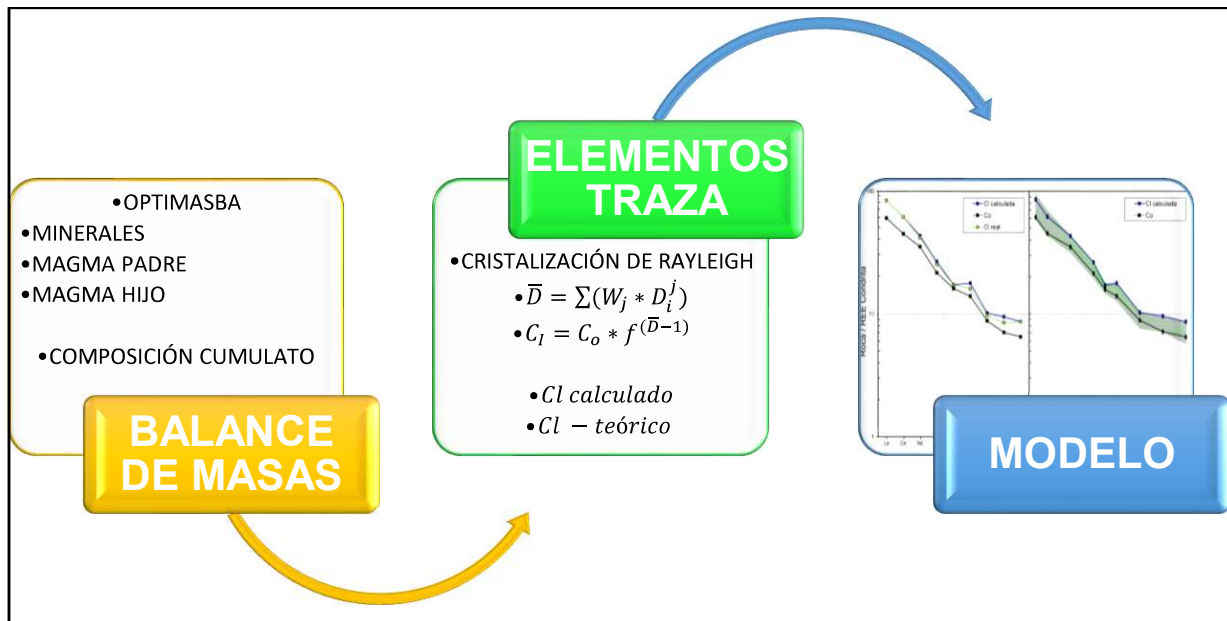


Figura 6. Flujo de trabajo de modelización geoquímica

3.8 Análisis e interpretación de resultados

Una vez efectuadas cada una de las etapas mencionadas anteriormente, se procedió a describir la evolución que han sufrido los magmas del volcán El Altar. Dentro de los resultados expuestos en el Capítulo 4, se muestran los procesos que dieron paso a la formación de las distintas unidades del volcán. Además, se presenta un mapa (**Anexo 3**) de la geología del volcán El Altar y las condiciones P, T obtenidas mediante geotermobarometría. Todos estos resultados han sido utilizados para plantear un modelo de evolución para el volcán, correlacionándose con trabajos realizados en volcanes aledaños.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1 Geología del volcán El Altar

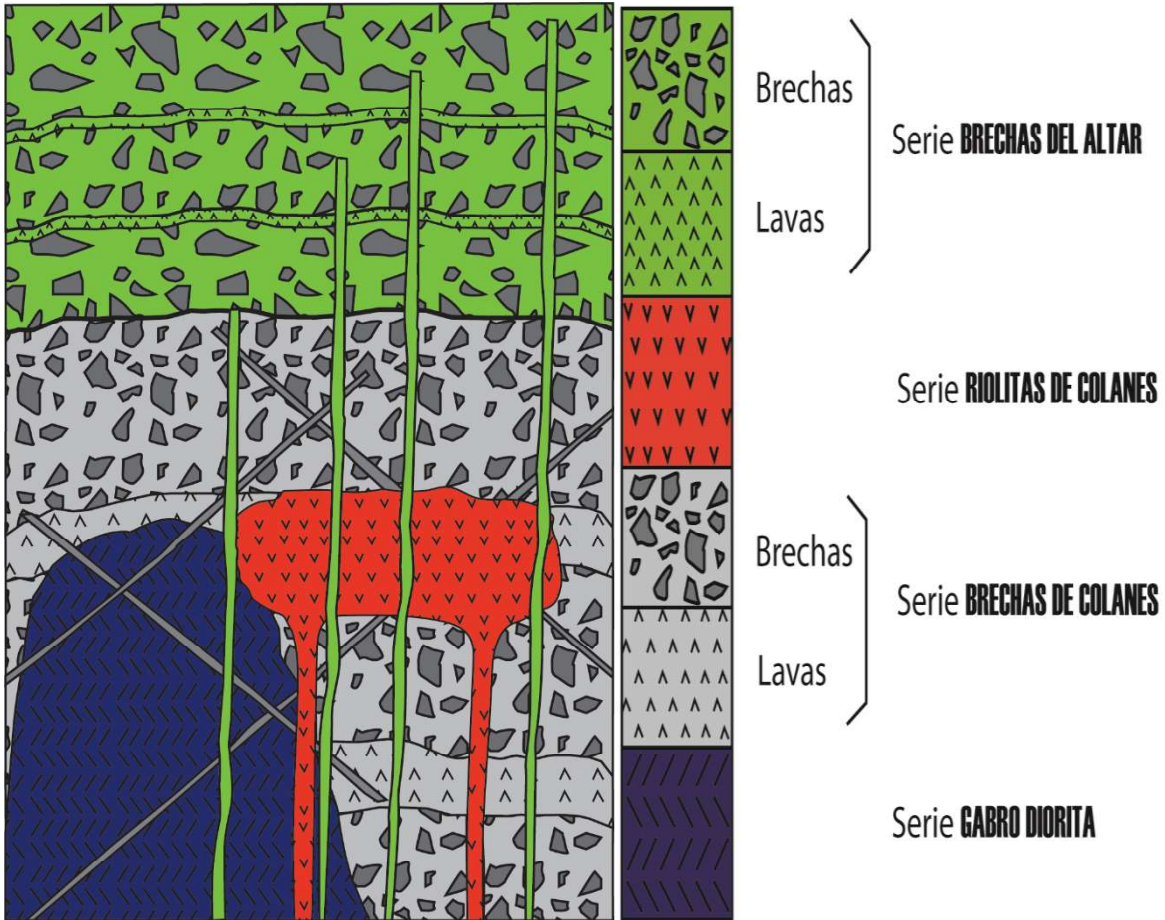


Figura 7. Esquema de la geología del volcán El Altar

En el volcán El Altar se observa varias unidades, siendo las *Brechas de Collanes* y *Brechas del Altar* las más voluminosas. Los depósitos de este volcán han sido generados durante varias etapas eruptivas las cuales se resumen de la siguiente manera:

En primer lugar, y presumiblemente las rocas más antiguas, se encuentra una intrusión de gabro-diorita. Este representaría una cámara magmática, ahora expuesta en la caldera del volcán. El cuerpo intrusivo es denominado como la unidad *Gabro-Diorita*.

Posterior al cuerpo gabrodiorítico se encuentra la unidad comprendida por brechas subglaciares y diques en X, con rumbos y direcciones de $118^{\circ}/52^{\circ}\text{S}$; $65^{\circ}/85^{\circ}\text{N}$. Estos diques cortan a la unidad

Gabro-Diorita. Esta unidad posee ciertos niveles con flujos de lava. Las rocas se encuentran en la parte inferior de la caldera del volcán y se extienden hacia, y por el valle de Collanes. Presentan un contacto marcado con la unidad superior. Este conjunto de rocas se denomina unidad *Brechas de Collanes*.

La unidad *Brechas de Collanes* se encuentra intersecada por diques riolíticos que dan origen a un domo riolítico, intruido en las mismas brechas andesíticas. El conjunto de rocas ácidas se denomina unidad *Riolita de Collanes*, y junto con las *Brechas de Collanes*, son pensadas como un paleo Altar, en donde las *riolitas de Collanes* se forman a partir del magma andesítico que da origen a las *brechas de Collanes*.

Por último, un conjunto de brechas subglaciares intercaladas con escasos flujos de lava conforman el grupo superior de rocas de El Altar. Estos son alimentados por diques que cortan a las unidades mencionadas anteriormente. La unidad denominada *Brechas del Altar* se considera como un nuevo Altar y representaría la parte juvenil de dicho volcán.

4.2 Petrografía de las unidades de El Altar

Las rocas de El Altar han sido clasificadas en cuatro unidades, en base características petrográficas, geoquímicas y a su relación espacial.

4.2.1 Unidad Gabro-Diorita

Esta unidad se la ha definido como un conjunto de rocas gabróicas con textura fanerítica. Sus fenocristales se presentan desde subhedrales a anhedrales. La mineralogía consta, principalmente, de feldespatos (mayormente de plagioclasas;), en tanto que el feldespato de potasio se muestra como mineral accesorio. Además, sus rocas presentan gran cantidad de biotitas, clinopiroxenos y óxidos de Ti y Fe (ilmenita y titanomagnetita). El ortopiroxeno se encuentra en un mínimo porcentaje. Estas rocas poseen cuarzo y apatito como mineral accesorio; estando el apatito presente como inclusiones aisladas dentro del cuarzo.

Estas rocas están bordeando el límite norte de la Laguna de Collanes y se muestran como un macizo rocoso alterado de color gris verdoso de alta consistencia el cual se encuentra fracturado y cortado por vetillas y diques.

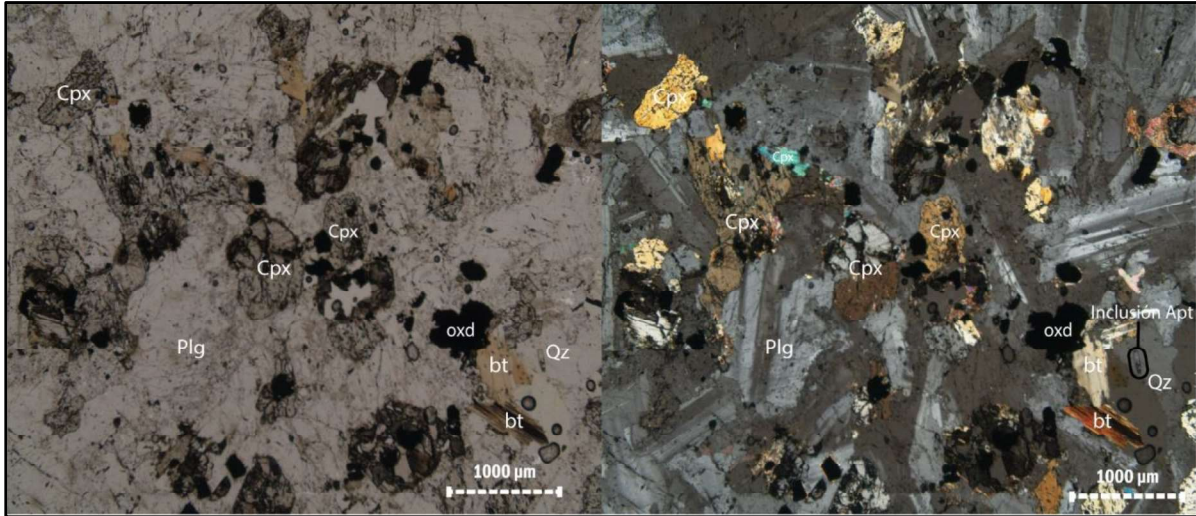


Figura 8. Lámina delgada muestra RIO 137.

Luz natural (izquierda), polarizadores cruzados (derecha). Clinopiroxeno (cpx), cuarzo (qz), biotita (bt), óxidos (oxd)

4.2.2 Unidad Brechas del Altar

Constituida por andesitas en forma de brechas, diques que cortan dichas brechas, y lavas. Presentan una textura porfírica (~40 - 50 %vol. Fenocristales). La mineralogía de la serie está principalmente constituida por plagioclasas, clinopiroxenos y gran cantidad de óxidos de Fe y Ti (titanomagnetita). Otros minerales presentes en menos proporción son olivino, ortopiroxeno y feldespato de potasio. Minerales como espinela y anfíbol se presentan como accesorios. La matriz de esta serie presenta texturas intergranulares, intersticial e hialopílica, con vidrio y microlitos de plagioclasa principalmente, piroxenos, y óxidos en cantidades variables.

Los cristales de plagioclasa y piroxeno presentan zonaciones, inclusiones (principalmente de óxidos) y reabsorción.

La unidad *Brechas del Altar* sobreyace a la unidad *Brechas de Collanes*.

Las *Brechas del Altar* están constituidas por clastos de dos tipos. A los primeros se los define como andesitas con textura porfírica, cuyos fenocristales, euhedrales a subhedrales, son mayoritariamente de plagioclasas (50 %vol) y clinopiroxenos (20 %vol). La matriz de estos clastos es intergranular e intersertal en algunos casos. Los microlitos de plagioclasa crecen y dejan espacios que son ocupados por microlitos de piroxeno y óxidos dando lugar a la textura intergranular. De igual manera, la textura intersertal se presenta cuando estos espacios dejados por las plagioclasas son ocupados también por vidrio (Winter, 2014).

El segundo tipo de clastos se los define como andesitas con textura porfírica, con escasa presencia de fenocristales, los cuales casi en su totalidad son plagioclasas. La matriz es hialopilitica; es decir posee un porcentaje de vidrio mayor al 90 %vol, y cuyos microlitos flotan en el vidrio sin contacto con microlitos contiguos. Esta textura es característica de las obsidianas (Winter, 2014). En dichos clastos se distingue fenocristales de anfíbol (5 %vol), lo cual es un rasgo distintivo de estos clastos con respecto a los clastos de las *Brechas de Collanes*, debido a que estas presentan una mineralogía semejante.

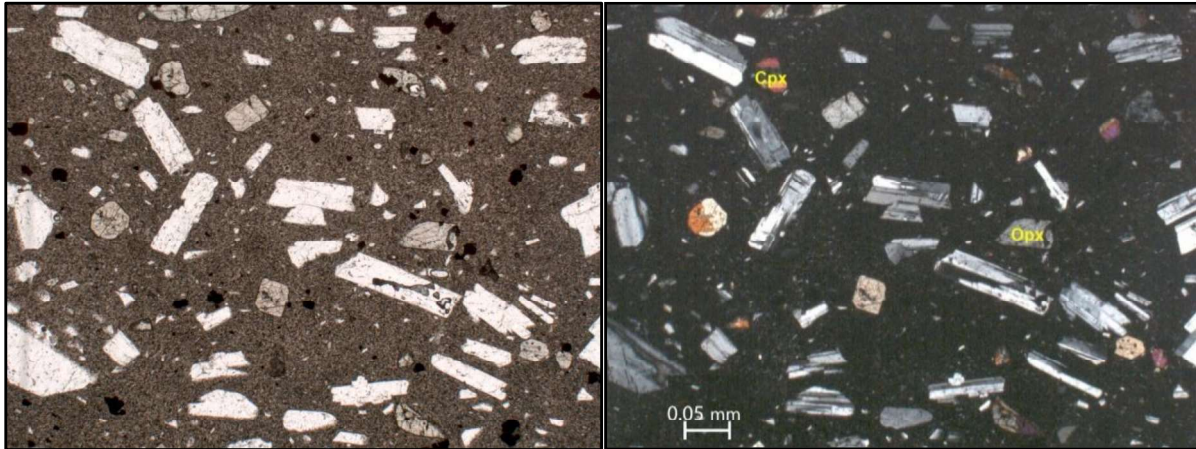


Figura 9. Lámina delgada muestra RIO 31B (Clasto de Brecha).

Luz natural (izquierda), polarizadores cruzados (derecha). Ortopiroxeno (opx), Clinopiroxeno (cpx)

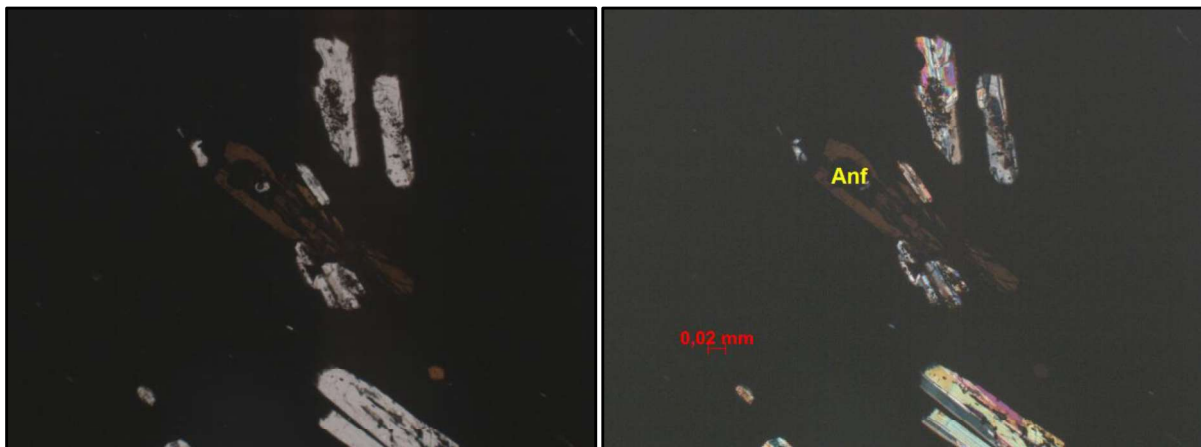


Figura 10. Lámina delgada muestra RIO 33A (clasto de brecha).

Luz natural (izquierda), polarizadores cruzados (derecha). Anfíbol (anf)

Los diques presentan una textura porfírica, la cual consta de fenocristales euhedrales y subhedrales. La paragénesis mineral está compuesta por plagioclasas (40 %vol), clinopiroxeno

(20 %vol) y olivino (25 %vol). Su matriz es intergranular y está compuesta por microlitos de plagioclasa, y piroxenos entre los espacios dejados por estas, con un bajo porcentaje de vidrio.

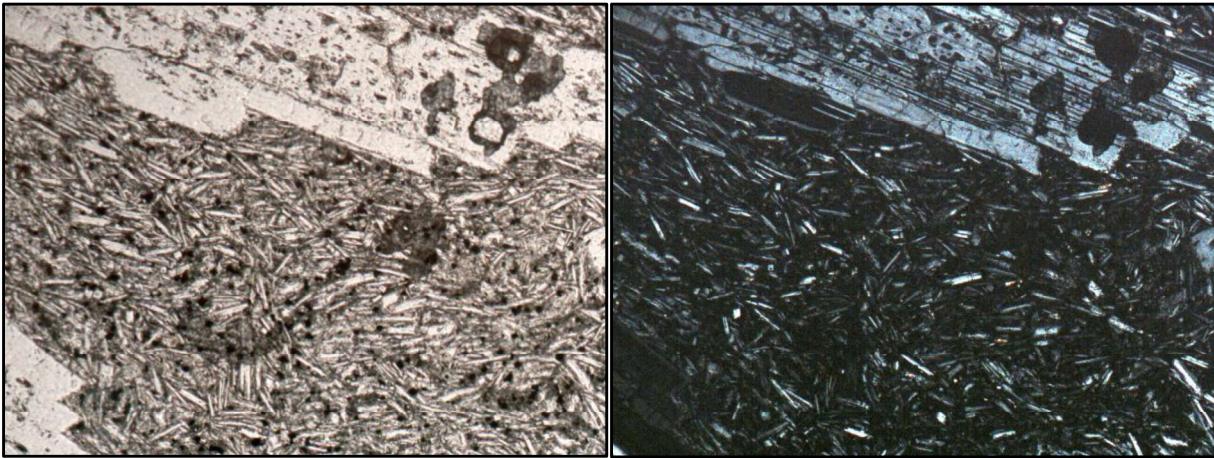


Figura 11. Lámina delgada muestra RIO 39A (dique).

Luz natural (izquierda), polarizadores cruzados (derecha).

Los flujos de lava de las *Brechas del Altar* presentan, así mismo, una textura porfírica, cuyos fenocristales se presentan de manera euhedral y subhedral. La paragénesis mineral comprende plagioclasas y clinopiroxenos como principales constituyentes. Estas rocas poseen una matriz intergranular e intersertal con cierta tendencia pilotaxítica con microlitos de plagioclasa, así como vidrio en distintas proporciones.

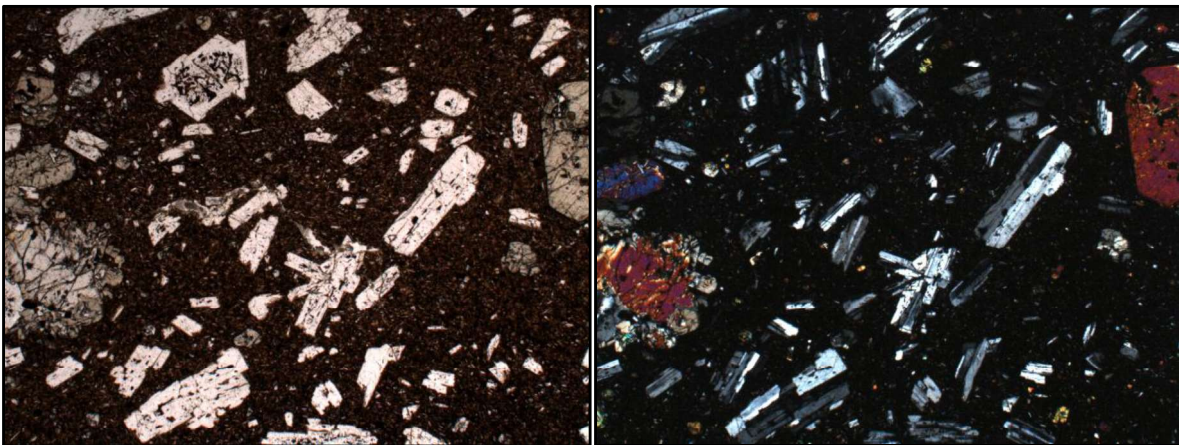


Figura 12. Lámina delgada muestra RIO 40 (Flujo de lava).

Luz natural (izquierda), polarizadores cruzados (derecha).

4.2.3 Unidad Brechas de Collanes

Constituida por andesitas con textura porfírica (55 - 65 %vol. fenocristales), y matriz microcristalina. Su mineralogía está compuesta por plagioclasas, clinopiroxenos, ortopiroxenos, óxidos de Fe y Ti (titanomagnetita). Ilmenita y apatito se presentan como minerales accesorios, este último como inclusiones en ortopiroxenos, en las rocas más evolucionadas de la unidad. En la matriz, los microlitos principalmente son de plagioclasa, clinopiroxeno, ortopiroxeno y óxidos (titanomagnetita). La presencia de vidrio define la textura de la matriz como intergranular; es decir, vidrio y microlitos de piroxenos, olivinos, etc. ocupando los espacios dejados por microlitos de plagioclasa en iguales proporciones. La matriz también se presenta como intersticial; es decir, el contenido de vidrio en ella aumenta en relación a la intergranular (Winter, 2014).

La unidad se encuentra principalmente a lo largo de la Quebrada de Collanes como brechas subglaciares, diques y flujos de lava intercalados; pero también se presenta en menor proporción en la parte inferior de la caldera.

Los clastos de las *Brechas de Collanes* tienen una textura porfírica con fenocristales euhedrales y subhedrales. La paragénesis mineral comprende plagioclasas (30 %vol), clinopiroxeno (15 %vol) y ortopiroxeno (15 %vol), notándose un incremento en el porcentaje de ortopiroxeno respecto a los clastos de las *Brechas del Altar*. La matriz de estos clastos es intersertal y está compuesta en su mayoría por vidrio, y una menor cantidad de microlitos aciculares de plagioclasa y piroxeno.

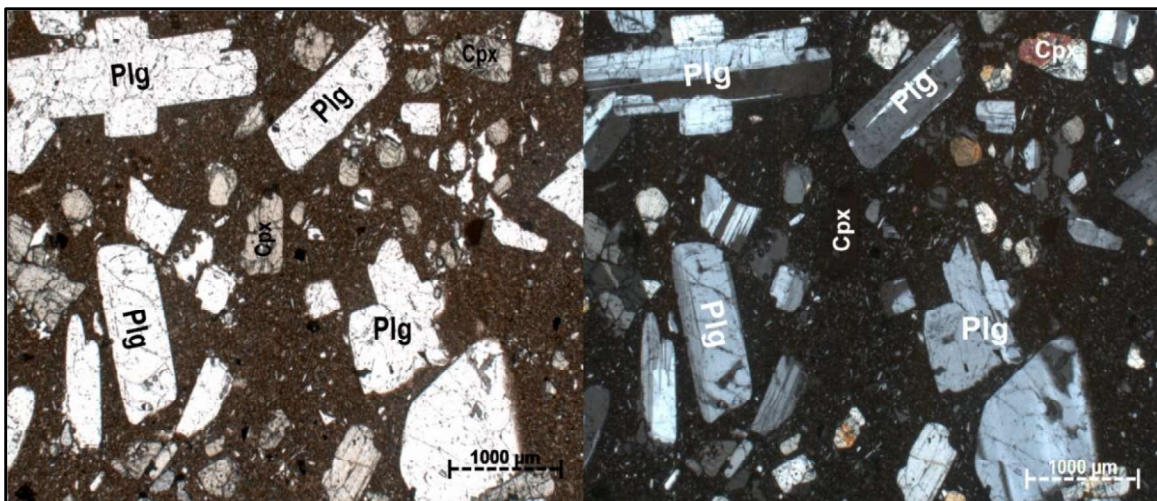


Figura 13. Lámina delgada muestra RIO 120A (Clasto de Brecha).

Luz natural (izquierda), polarizadores cruzados (derecha). Plagioclasas (plg), clinopiroxeno (cpx)

Los diques de Collanes poseen una textura porfírica con una matriz microcristalina. Los fenocristales se presentan de manera subhedral. La paragénesis mineral está compuesta por plagioclasas (35% vol), clinopiroxeno (15% vol) y ortopiroxeno (20% vol). La matriz es intergranular y está compuesta por microlitos tabulares de plagioclasa y opacos, además de vidrio intersticial en distintos porcentajes. Existe, en promedio, una proporción igual de fenocristales y matriz.

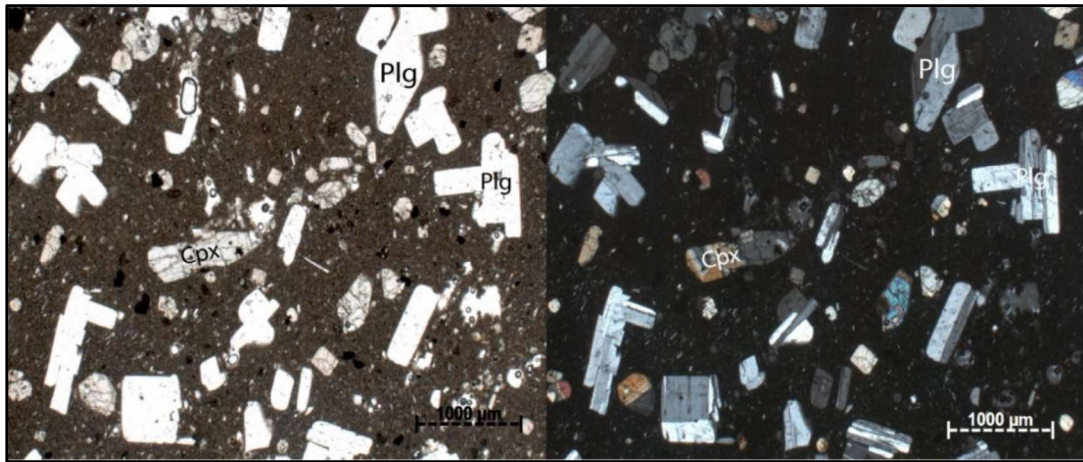


Figura 14. Lámina delgada muestra RIO 125 (Dique).

Luz natural (izquierda), polarizadores cruzados (derecha). Plagioclasas (plg), clinopiroxeno (cpx)

Los flujos de lava de Collanes presentan una textura porfírica con matriz microcristalina. Los fenocristales se presentan de manera euhedral mayoritariamente y de gran tamaño. La paragénesis mineral está compuesta de plagioclasas (30 %vol), clinopiroxeno (15 %vol) y ortopiroxeno (10 %vol). La matriz es intergranular y presenta microlitos de plagioclasa y piroxeno, y vidrio en distintas proporciones.

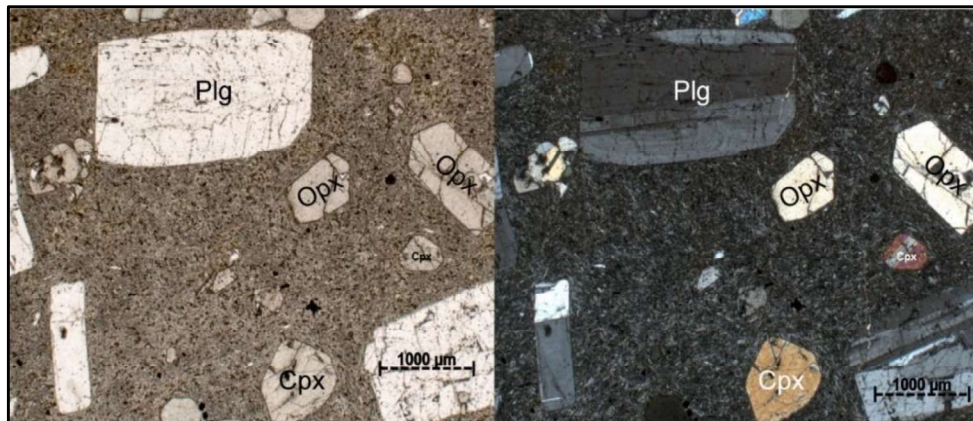


Figura 15. Lámina delgada muestra RIO 128 (Flujo de Lava).

Luz natural (izquierda), polarizadores cruzados (derecha). Plagioclasas (plg), clinopiroxeno (cpx)

4.2.4 Unidad Riolita de Collanes

Caracterizada por rocas, en su mayoría de color blanco, de composición riolítica con textura desde microporfirítica hasta afanítica. Los escasos fenocristales presentes son subhedrales, siendo el anfíbol el mineral característico del grupo. Plagioclasas, óxidos de Fe y Ti, y biotitas también se encuentran en gran cantidad. Existe también una abundante presencia de vidrio.

Dada su composición rica en sílice, estas rocas forman domos. Estos domos están cortados por diques de andesita basáltica y se encuentran hacia el extremo noreste de la caldera del volcán.

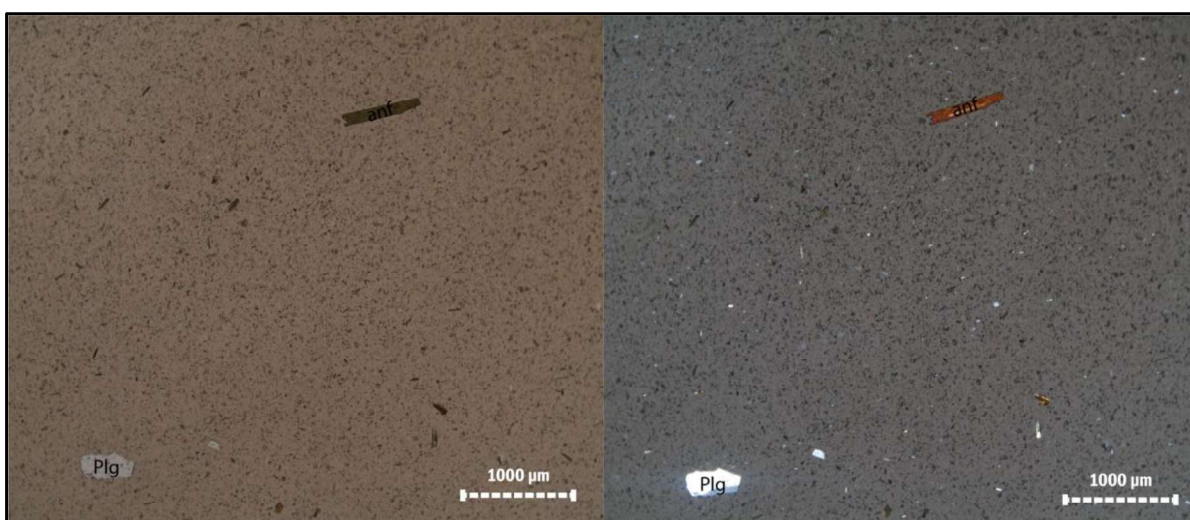


Figura 16. Lámina delgada muestra RIO 52E.

Luz natural (izquierda), polarizadores cruzados (derecha). Plagioclasas (plg), anfíbol (anf)

Tabla 1. Síntesis petrográfica de las unidades del volcán El Altar.

UNIDAD	TEXTURA	%SiO ₂	%FENOCRISTALES	PARAGÉNESIS MINERAL
<i>Brecha de Collanes</i>	Porfirítica	57,20-68,10 %	55-65 %	<i>cpx + plg + opx + Ti-mt ± ilm</i>
<i>Brechas del Altar</i>	Porfirítica	52-59 %	40-50 %	<i>ol + cpx + plg + opx ± anf ± Ti-mt ± Cr-esp</i>
<i>Riolita de Collanes</i>	Porfirítica con matriz vítrea	70,50-74 %	10-20 %	<i>plg + anf + bt + Ti-mt</i>
<i>Gabro - Diorita</i>	Fanerítico	54 %	-----	<i>cpx + plg + Ti-mt + bt + opx ± ilm ± fdK</i>

4.3 Mineralogía

En la caracterización mineralógica se clasifican las fases minerales en base a su composición. Además, se pone en evidencia las características texturales observadas en lámina delgada. Las composiciones minerales de cada unidad del volcán El Altar se resumen en la Tabla 2. También, se indica el porcentaje cada fase mineral presente en cada unidad.

Tabla 2. Porcentaje de los minerales presentes en las distintas unidades. Mg# corresponde a $100 \times \text{molar} (\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}))$

UNIDAD	Plg	Cpx	Opx	Anf	OI	Óxidos	Bt
Brechas del Altar	30-55 % An ₇₉₋₄₂ An ₆₄₋₄₄	10-20 % Wo ₄₆₋₄₂ , En ₄₇₋₄₄ , Fs ₁₀₋₁₄ Mg#0.71-0.84 Wo ₄₅₋₃₆ , En ₄₆₋₄₃ , Fs ₁₈₋₁₁ Mg#0.66-0.80	<5 % En ₇₄₋₆₄ Fs ₂₃₋₃₂ Mg#0.67-0.76	<1% Mg#0.61-0.71 Al ₂ O ₃ (13.3-11.5%)	6-15 % Fo ₈₈₋₆₈ Fo ₇₀₋₅₈	<3 % Mt ₆₈₋₈₈	-----
Brechas de Collanes	35-40 % An ₆₈₋₃₉ An ₅₄₋₂₇	15-20 % Wo ₄₅₋₃₅ , En ₅₀₋₄₃ , Fs ₆₋₁₇ Mg#0.69-0.86 Wo ₄₃₋₂₃ , En ₅₀₋₄₃ , Fs ₁₄₋₂₇ Mg#0.65-0.72	15-20 % En ₈₁₋₆₇ Fs ₁₆₋₂₉ Mg#0.67-0.86 En ₆₉₋₅₈ Fs ₂₄₋₃₇ Mg#0.61-0.74	-----	-----	<3 % Mt ₄₂₋₈₅ Ilm ₄₆₋₅₀	-----
Riolita de Collanes	5-10 % An ₄₂	-----	<1 % En ₅₄ Fs ₄₄ Mg#0.55	5-10 % Mg#0.55-0.71 Al ₂ O ₃ (13.1-11%)	-----	<1 % Mt ₉₁₋₉₂	<2 % Mg#0.64-0.66 K ₂ O(8.5-8.7%)
Gabro - Diorita	50-60 % An ₅₈₋₂₅	20-25 % Wo ₄₉₋₄₂ En ₄₆₋₄₃ Fs ₇₋₁₄ Mg#0.74-0.81	5 % En ₆₇ Fs ₂₉ Mg#0.69-0.70	-----	-----	10 % Mt ₉₇₋₉₈ Ilm ₄₁₋₇₄	<3 % Mg#0.83-0.84 K ₂ O(9.6-10%)

4.3.1 Plagioclasas

Las plagioclasas de la unidad *Brechas de Collanes* son del tipo *Labradorita* y *Andesina*. Los fenocristales presentan zonaciones, principalmente del tipo normal. También se encuentran cristales con zonaciones inversas y oscilatorias. En la Figura 17 se observa el rango composicional de (An_{61-39}) en los centros, y de (An_{68-45}) en los bordes de los fenocristales. Para los microlitos, las composiciones oscilan entre (An_{54-27}) . Existe la presencia esporádica de maclas. Las plagioclasas de esta unidad se evidencian en su mayor parte como euhedrales.

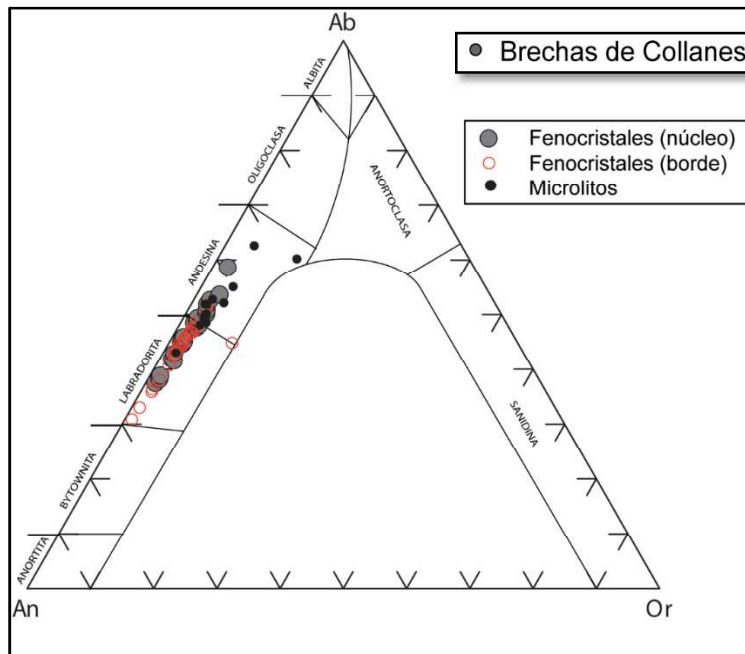


Figura 17. Composición de las plagioclasas de la unidad Brechas de Collanes

Los fenocristales de plagioclasa de la unidad *Brechas del Altar* se muestran euhedrales y subhedrales. Como se puede observar en la Figura 18, los fenocristales de plagioclasa, casi en su totalidad, presentan composiciones de (An_{79-42}) . Los microlitos son restringidos a las composiciones con mayor contenido del Na, (An_{64-44}) ; llegando incluso a composiciones de An_{27} . Los cristales presentan zonaciones e inclusiones de vidrio en los centros, los cuales se muestran con textura "sieve" (en tamiz), y los bordes de sobrecrecimiento con composiciones más pobres en An que envuelven estos centros, son características muy comunes en los cristales, tanto en las muestras más básicas, como en las más diferenciadas. Esta zonación composicional es mucho más marcada en los miembros más básicos de la unidad, en donde se pasa de composiciones de (An_{79}) a (An_{62}) . Los microlitos son relativamente más sódicos que los fenocristales. Las maclas no son muy comunes.

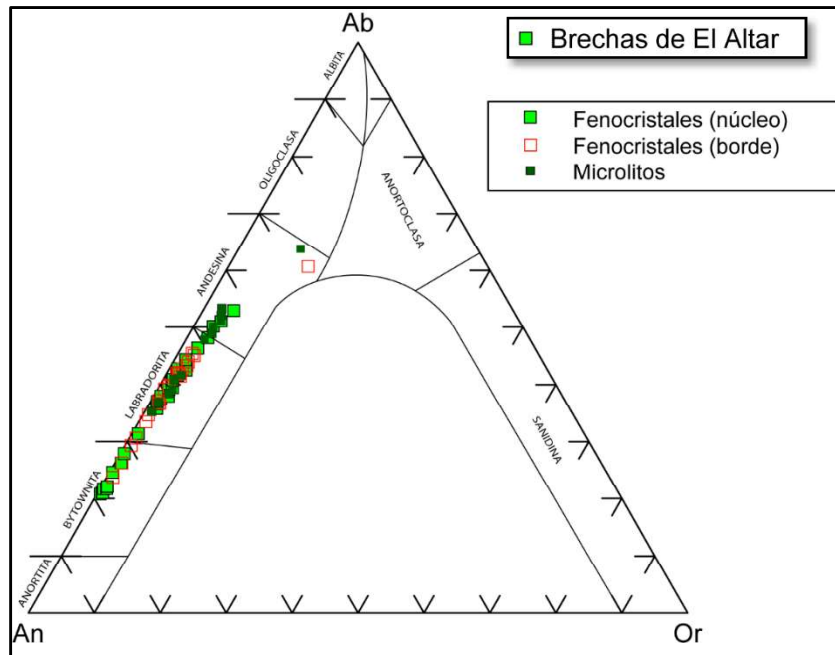


Figura 18. Composición de las plagioclasas de la unidad Brechas del Altar

Las plagioclasas de la unidad *Riolita de Collanes* poseen una composición sin mucha variación, intermedia, del tipo *Andesina* (An_{~42}); pero pudiendo llegar a (An₅₂), composición hallada en un solo cristal. Se presentan como microfenocristales y microlitos, subhedrales y anhedrales, y no muestran zonaciones.

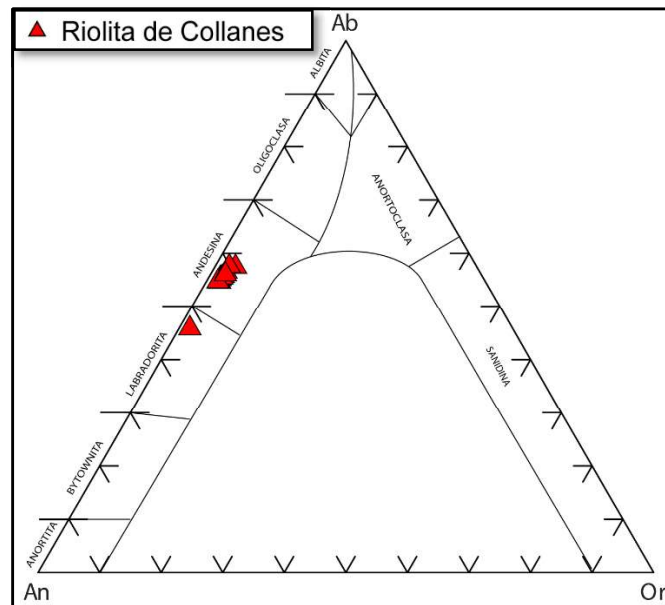


Figura 19. Composición de las plagioclasas de la unidad Riolita de Collanes

Las plagioclasas de la unidad *Gabro Diorítica* presentan composiciones entre *labradorita* y *oligoclasa*. La variación composicional de esta unidad es de An_{58-25} . Los fenocristales se presentan de manera subhedral y anhedral, y presentan zonaciones.

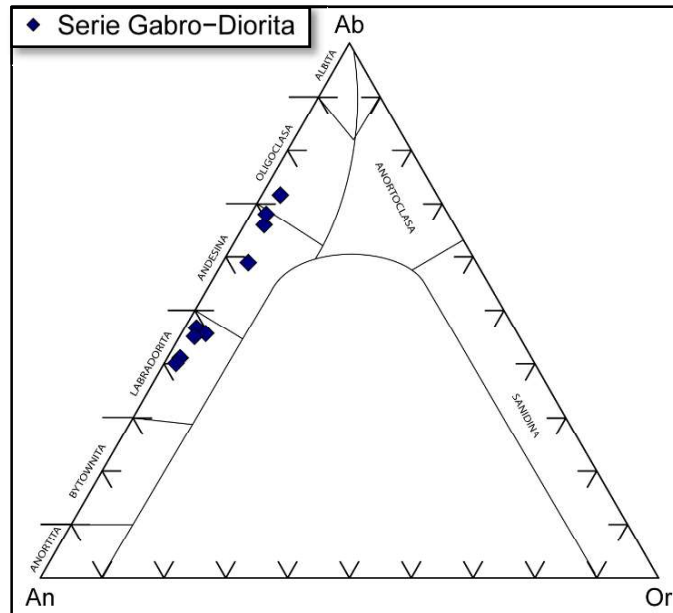


Figura 20. Composición de las plagioclasas de la unidad Gabro-Diorita

4.3.2 Clinopiroxeno

Los piroxenos (clinopiroxenos y ortopiroxenos) de las rocas del volcán El Altar pertenecen al grupo de piroxenos calco-ferro-magnesianos (Morimoto, 1988).

La fase de clinopiroxeno se ha podido identificar en 3 de las 4 unidades definidas, la unidad *Brechas de Collanes*, unidad *Brechas del Altar* y en la unidad *Gabro Diorítica*.

En las rocas correspondientes a la unidad *Brechas de Collanes*, los clinopiroxenos se presentan de manera subhedral en su mayor parte. Existen zonaciones, mayormente inversas, y algunas normales y oscilatorias. Se observa un rango composicional relativamente homogéneo que oscila entre (Wo_{45-42} , En_{50-43} , Fs_{6-13}) en los núcleos, y (Wo_{45-35} , En_{50-43} , Fs_{6-17}) en los bordes de los cristales. Los microlitos de esta fase muestran composiciones menos cálcicas (Wo_{43-23} , En_{50-43} , Fs_{14-27}). El grupo de las *Brechas de Collanes* es aquel que contiene la fase de clinopiroxeno en mayor cantidad (~20%vol.).

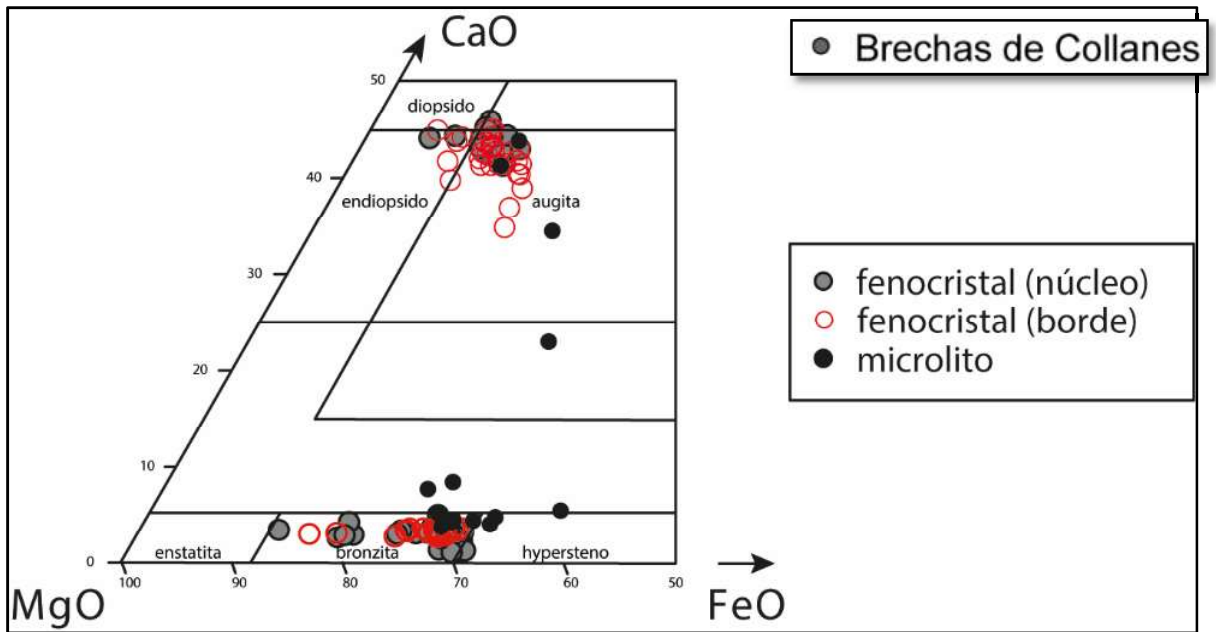


Figura 21. Composición de los piroxenos de la unidad Brechas de Collanes

Esta fase, en la unidad *Brechas del Altar*, se encuentra como fenocristales euhedrales y subhedrales. Los cristales poseen una composición dominante en el rango de (Wo_{46-42} , En_{47-44} , Fs_{10-14}). No existe una zonación composicional marcada en estos minerales. La fase también se encuentra formando la matriz, como microlitos (Wo_{45-36} , En_{46-43} , Fs_{18-11}) que llegan incluso a composiciones de (Wo_9 , En_{61} , Fs_{30}). Esta fase se encuentra en menor cantidad (~15%vol.) que en la unidad *Brecha de Collanes*.

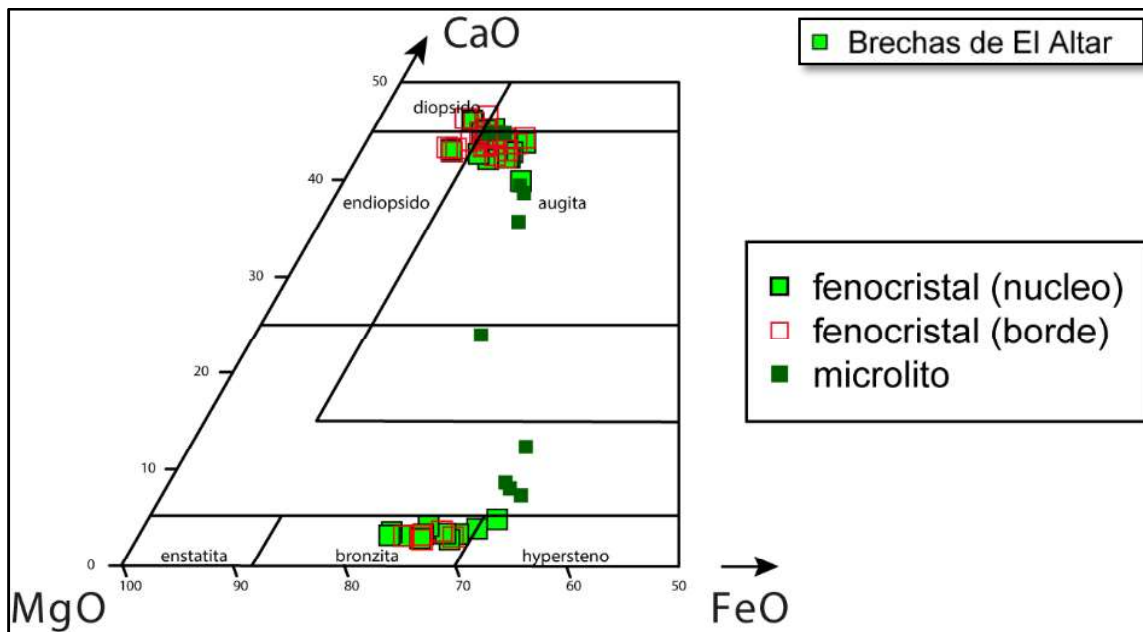


Figura 22. Composición de los piroxenos de la unidad Brechas del Altar

La unidad *Gabro-Diorita* presenta esta fase como fenocristales subhedrales con composiciones restringidas a un rango composicional de $(Wo_{49-42}En_{46-43}Fs_{7-14})$. En esta unidad, esta fase mineral es abundante ($\approx 20-25\%vol.$).

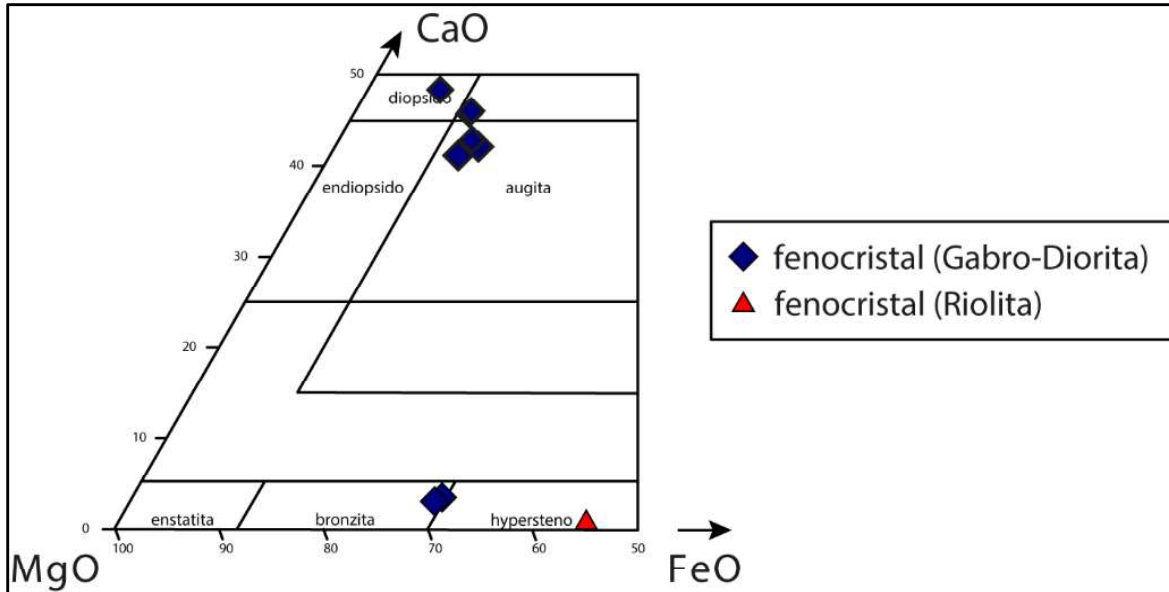


Figura 23. Composición de los piroxenos de las unidades Gabro-Diorita y Riolita de Collanes.

4.3.3 Ortopiroxeno

Esta fase mineral está presente en los cuatro grupos de las rocas del volcán El Altar. Las rocas de composición riolítica contienen a esta fase como mineral accesorio.

En las rocas correspondientes a la unidad *Brechas de Collanes*, la fase del ortopiroxeno se presenta como fenocristales, principalmente subhedrales, con composiciones del tipo *Bronzita* ($En_{81-67}Fs_{16-29}$). Existen inclusiones de clinopiroxenos y óxidos de Fe-Ti dentro de la fase de ortopiroxeno; además de zonaciones, mayormente inversas. Con respecto a los microlitos, las composiciones ($En_{69-58}Fs_{24-37}$) no llegan a las composiciones más ricas en MgO, existentes en los fenocristales. La unidad *Brechas de Collanes* es la que contiene la fase de ortopiroxeno ($\approx 15-20\%vol.$).

En las *Brechas del Altar*, esta fase se encuentra como fenocristales subhedrales con composiciones de *Bronzita* ($En_{74-64}Fs_{23-32}$). También están presentes como inclusiones en fases como plagioclasas y clinopiroxenos. No se contó con análisis químicos de microlitos de ortopiroxeno en esta unidad. La fase se encuentra en menor cantidad ($\approx 2-5\%vol.$) que en las *Brechas de Collanes*.

Las rocas de la unidad *Riolita de Collanes* contienen esta fase en muy poca cantidad. El fenocristal de ortopiroxeno muestreado posee una composición de *Hipersteno* (En₅₄-Fs₄₄), que ciertamente difiere de aquellos pertenecientes a las otras tres unidades.

La unidad *Gabro-Diorita* presenta esta fase como fenocristales subautomorfos. Su composición cae en el límite *Bronzita-Hipersteno* (En₆₇-Fs₂₉).

4.3.4 Anfíbol

El anfíbol se presenta exclusivamente; ya sea de forma considerable, en las rocas de la unidad *Riolita de Collanes*; o en menor cantidad, en las rocas más evolucionadas de la unidad *Brechas del Altar* (SiO₂ > 59 wt%). Según su clasificación (Leake et al., 1997), la fase se presenta como anfíbol cálcico ($(Ca + Na)_B \geq 1.00$; $Na < 0.50$; y $Ca > 1.5$) del tipo *pargasita* (Figura 24).

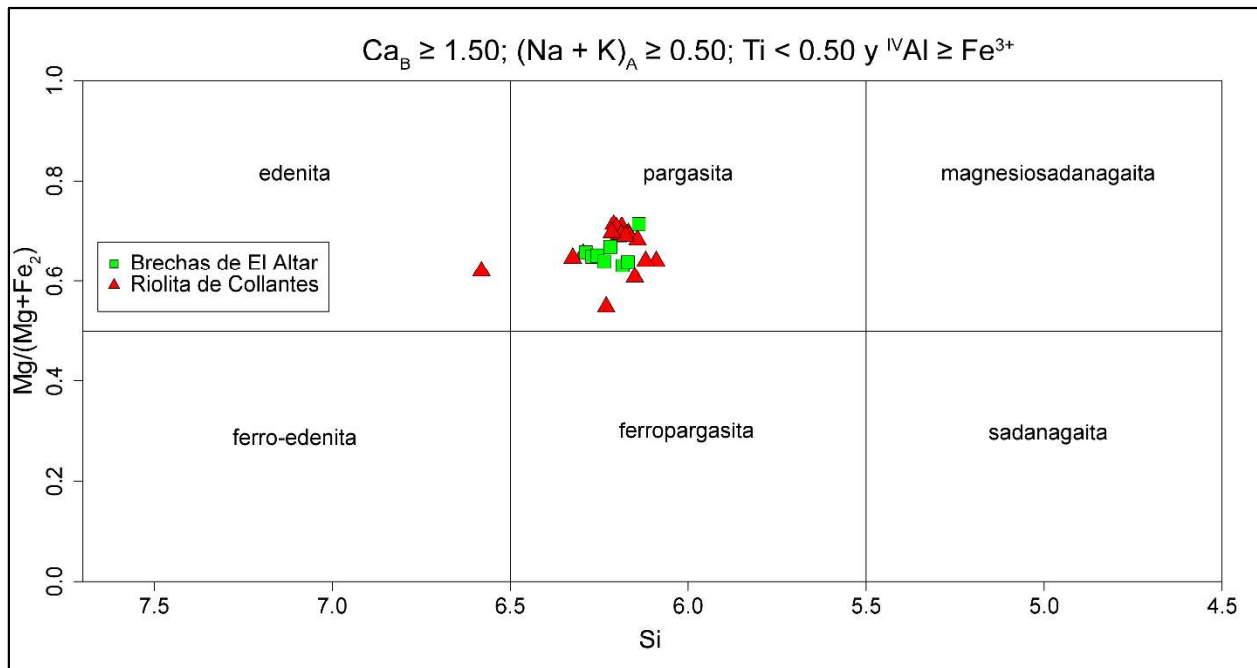


Figura 24. Clasificación de los anfíboles de las unidades del volcán el Altar

En las *Brechas del Altar*, esta fase hidratada se encuentra en pequeñas proporciones. En lo que respecta a su composición, el Mg# es de 63 a 66. Destacan las coronas de oxidación alrededor de los cristales de esta fase; siendo gruesas, en los fenocristales relacionados con matriz microcristalina; o finas, en aquellos en las rocas con matriz vítrea de la unidad.

Dentro de las rocas de la unidad *Riolita de Collanes*, la fase está presente como fenocristales euhedrales y subhedrales, con composiciones de Mg# de 60 a 71, similares a las de la unidad *Brechas del Altar*. Algunos presentan núcleos de reacción.

4.3.5 Biotita

La fase está presente en las rocas de las unidades *Gabro-Diorita* y *Riolita de Collanes*. En porcentajes muy pequeños, la fase se encuentra como fenocristales subhedrales alargados. La composición de dichos cristales en el gabro se caracteriza por ser mucho más rica en magnesio, lo cual está relacionado a la composición de la roca. Mientras que el Ti se mantiene relativamente constante en el rango de 3 – 4 wt% para ambas unidades.

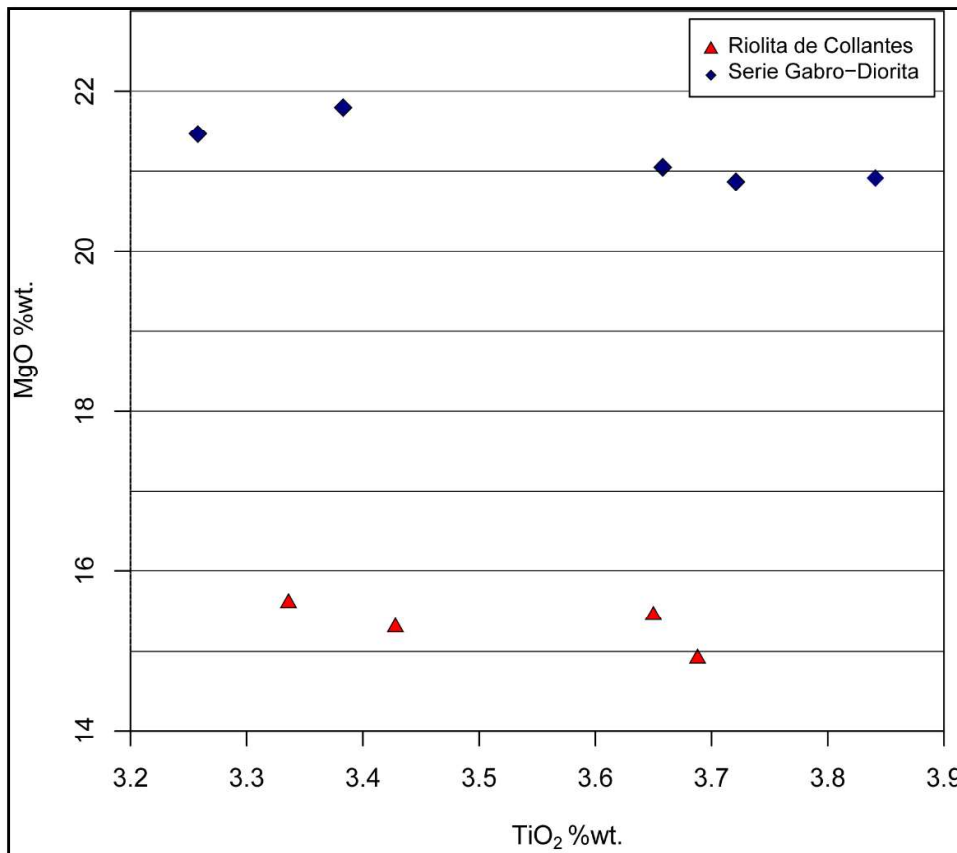


Figura 25. Diagrama TiO₂ vs. MgO de las biotitas de las unidades Riolita de Collanes y Gabro-Diorita

4.3.6 Olivino

Esta fase mineral se encuentra presente dentro de la unidad *Brechas del Altar* en bajos porcentajes (<3%vol.). Los cristales se muestran desde euhedrales a subhedrales, y fracturados. El rango composicional dominante a lo largo de la unidad es Fo₆₈₋₇₄. Una característica importante es el cambio de composición en varios cristales; entre los núcleos, que presentan composiciones muy ricas en Mg, llegando a Fo₈₈; y los bordes, con composiciones bastante más férricas (Fo₇₀), en las rocas más básicas de la unitad. El olivino también se encuentra en forma de microlitos, con composiciones aproximadas de Fo₆₀, llegando a Fo₇₀. En las *Brechas de Collanes*, la fase posee un estado lejano al equilibrio. Los pocos restos de cristales de olivino hallados han sido denominados “*fantasmas de olivino*”.

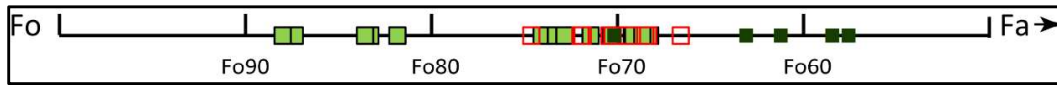


Figura 26. Mineralogía de los cristales de olivino.

4.3.7 Óxidos

Los óxidos son uno de los productos más frecuentes en todas las unidades; estando presentes, ya sea como inclusiones en los distintos fenocristales, o como microlitos en la matriz. Los óxidos son subhedrales y pequeños. En ciertas muestras, forman bordes de reacción que rodean a los anfíboles de la unidad *Brechas del Altar*. Dentro de las unidades *Brechas de Collanes* y *Gabro-Diorita*, se contó con la química de dos tipos de óxidos, titanomagnetitas mayoritariamente, e ilmenitas. En las unidades restantes, *Brechas del Altar* y *Riolita de Collanes*, se contó únicamente con la química de la fase de Ti-mt. Esto no significa que la fase de ilmenita esté completamente ausente en estas dos últimas unidades. Además, cristales de espinelas se presentan, únicamente, como inclusiones en los olivinos más básicos de las rocas más básicas de la unidad *Brechas del Altar*. La titanomagnetita es un óxido común que está presente en todas las unidades; siendo en la unidad *Gabro-Diorita* en la que se encuentra en mayor porcentaje de volumen; mientras que, la ilmenita es poco frecuente.

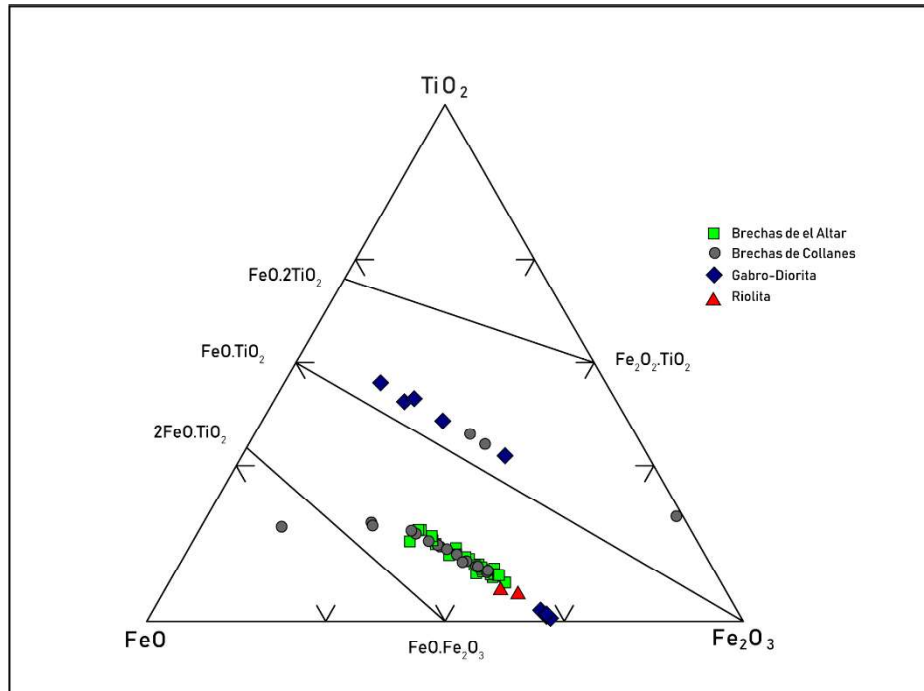


Figura 27. Clasificación de los óxidos de Fe-Ti de las unidades del volcán El Altar

En la unidad *Brechas de Collanes*, existe la presencia de titanomagnetita y de ilmenita (3%vol.). Se presentan como cristales euhedrales y subhedrales de poco tamaño. En esta unidad, el contenido de óxidos es levemente mayor respecto a la unidad *Brechas del Altar*. Su química está caracterizada por contenidos de $TiO_2 = 12-8$ wt% en las inclusiones, y de $TiO_2 = 19-8$ wt% en los microlitos. Por el lado de las ilmenitas, los contenidos son de $TiO_2 \sim 34$ wt%.

En la unidad *Brechas del Altar*, la titanomagnetita (2-3 %vol.) se presenta como cristales anhedrales de tamaño pequeño. Se presentan como inclusiones ($TiO_2=11 - 7$ wt%), y como microlitos ($TiO_2=17 - 12$ wt%) en la matriz. No se detectó la presencia de ilmenita.

En la unidad *Gabro-Diorita*, los óxidos (10 %vol.) se presentan mayoritariamente como cristales euhedrales, de poco tamaño, y distribuidos alrededor de toda la roca.

En la unidad *Riolita de Collanes*, los óxidos (1 %vol.) se presentan como cristales subhedrales de poco tamaño. Dichos óxidos corresponden a *Ti-mt* con contenidos de $TiO_2 \sim 5$ wt%.

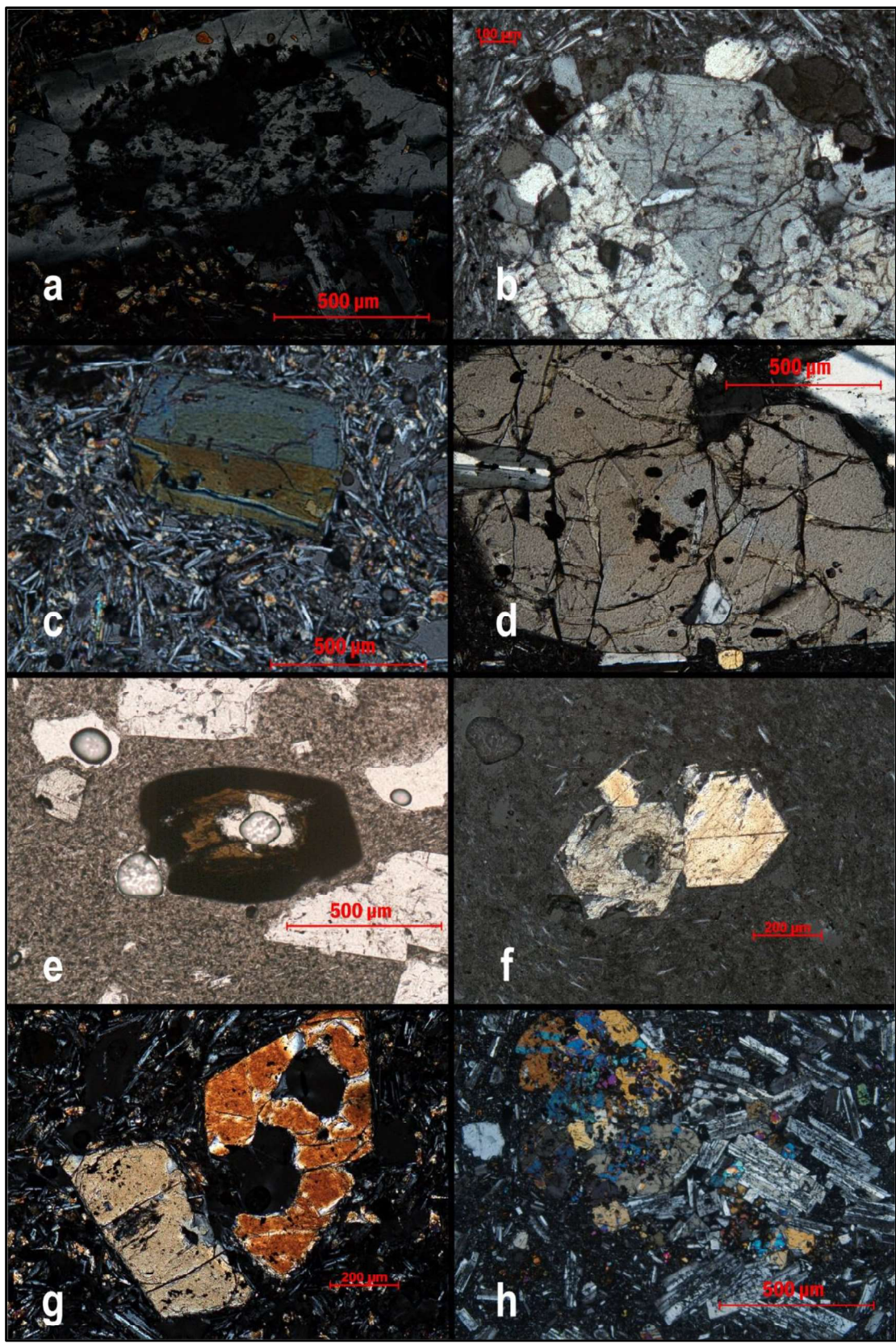


Figura 28. Mosaico de minerales de las unidades del volcán El Altar

(A) Cristal de plagioclasa con textura “sieve” en tamiz, (B) cristal de clinopiroxeno con inclusiones de plagioclasas y borde de ortopiroxeno, (C) cristal de clinopiroxeno zonado, (D) cristal de ortopiroxeno con inclusión de apatito, (E) cristal de anfíbol con corona de óxidos, (F) cristales euédricos de anfíbol, (G) cristal de olivino, (H) textura cumulativa.

4.3.8 Composición del vidrio

Los análisis del vidrio de las rocas de El Altar se han realizado en el Laboratorio de Magmas y Volcanes, con la microsonda CAMECA SX-100. Se trabajó con 15 kV de tensión de aceleración, 8 nA de corriente y 10 s de tiempo de conteo. El análisis se realiza en las matrices respectivas, y en ciertas inclusiones en los cristales de las unidades *Brechas del Altar*, *Brechas de Collanes* y *Riolita de Collanes*. En general, la composición del vidrio en las rocas es rica en Na₂O y K₂O. Existe similitud entre las composiciones de los vidrios de las unidades *Brechas de Collanes* y *Brechas del Altar*; mientras que la composición en las riolitas difiere de estas. Los valores de SiO₂ y K₂O son mayores; en tanto que el CaO y Na₂O se presenta en menores porcentajes para la *Riolita de Collanes* con respecto a las unidades andesíticas. Vale la pena mencionar que, a pesar de la composición andesítica de las brechas, estas contienen mayores porcentajes de Na₂O con respecto a la *Riolita*.

Tabla 3. Gama composicional del vidrio de las distintas unidades. Elementos mayores expresados en porcentaje de peso total.

	SiO ₂	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
Brechas del Altar	64,63 ± 2,78	2,52 ± 1,13	5,01 ± 0,51	4,69 ± 4,69
Brechas de Collanes	66,18 ± 4,40	2,31 ± 1,59	4,23 ± 0,97	4,84 ± 2,81
Riolita de Collanes	72,00	0,90	2,45	5,95

4.4 Geotermobarometría

Se ha seleccionado información petrológica experimental con el fin de delimitar de una manera óptima las condiciones pre-eruptivas en las distintas unidades. Los trabajos con los que se ha establecido una analogía a El Altar son aquellos realizados en los volcanes: Tungurahua (Andújar et al., 2017), en el caso de los productos andesíticos; y Cotopaxi (Martel et al., 2018), para el caso de las riolitas. La disponibilidad de la química respectiva para las fases de titanomagnetita e ilmenita en equilibrio (Bacon & Hirschmann, 1988), en una muestra (RIO 125) de la unidad *Brechas de Collanes*, permite determinar el parámetro fO_2 (NNO+1.27; según Ghiorso & Evans, 2008). Los valores de H₂O_{vidrio} (contenidos de agua en el líquido; expresado en wt%), resultados

en trabajos ya mencionados, fueron utilizados como contenidos guías en los geotermómetros en los cuales este dato es requerido.

4.4.1 Geotermometría

La presencia de plagioclasas en las unidades *Brechas del Altar*, *Brechas de Collanes* y *Riolita de Collanes* ha permitido el uso del geotermómetro **plagioclasa (plg) - vidrio (v)** de Putirka (2008), para estimar las condiciones de temperatura pre-eruptiva. El equilibrio en los pares plg-v ha sido verificado mediante el coeficiente de intercambio K_D entre anortita y albita, el cual debe tener un valor de 0.1 ± 0.05 para $T < 1050$ °C y de 0.28 ± 0.11 para $T > 1050$ °C (Putirka, 2008). En todos los análisis realizados se han obtenido temperaturas menores a 1050 °C. Para las *Brechas del Altar* se trabajó con 2 pares, para las *Brechas de Collanes* con 75 pares y para la *Riolita* con 9 pares. Dichos pares cumplieron el test de equilibrio mencionado anteriormente. El cálculo se realizó mediante la ecuación 24a de Putirka (2008). En las *Brechas del Altar* se obtuvo temperaturas desde 906 ± 8 °C (n=60) en sus miembros básicos ($\text{SiO}_2 = 56.57$ wt%), hasta 839 ± 0.3 °C (n=2) en sus rocas más ácidas ($\text{SiO}_2 = 61.68$ wt%). En las *Brechas de Collanes* se obtuvo una temperatura de 964 ± 13 °C (n=14; $\text{SiO}_2 = 59$ wt%), hasta 898 ± 10 °C (n=30; $\text{SiO}_2 = 59.5$ wt%). Para la *Riolita de Collanes* se obtuvo una temperatura de 752 ± 3 °C (n=11). Para estimar estos valores se ha trabajado con una presión de 430-320 MPa, 430MPa y 350MPa, y con un contenido de $\text{H}_2\text{O}_{\text{vidrio}}$ de 6-5 wt%, 3 wt% y 8 wt%, para las unidades *Brechas del Altar*, para las *Brechas de Collanes* y para la *Riolita de Collanes* respectivamente, apoyado en los resultados para los volcanes ecuatorianos antes mencionados (Andújar et al., 2017; Martel et al., 2018).

$$\frac{10^4}{T(K)} = 6.4706 + 0.3128 \ln \left(\frac{X_{An}^{pl}}{X_{CaO}^{liq} (X_{AlO_{1.5}}^{liq})^2 (X_{SiO_2}^{liq})^2} \right) - 8.103 (X_{SiO_2}^{liq}) + 4.872 (X_{K_{0.5}}^{liq}) \\ + 1.5346 (X_{Ab}^{pl})^2 + 8.661 (X_{SiO_2}^{liq})^2 - 3.341 * 10^{-2} (P(kbar)) + 0.18047 (H_2O^{liq})$$

Tabla 4. Resumen de temperaturas obtenidas para las unidades del volcán El Altar

UNIDAD	T (°C)	1σ
<i>Brechas del Altar</i>	839-906	0.3-8
<i>Brechas de Collanes</i>	898-964	10-13
<i>Riolita</i>	752.1	3

En las *Brechas del Altar*, la disponibilidad de análisis de olivino ha permitido el uso del geotermómetro de **olivino (ol) – vidrio (v)** de Pu et al. (2017), fundamentado en la partición del

Mg entre el olivino y el líquido. Para conocer si los pares *ol-v* se encuentran en equilibrio, se calculó los respectivos $K_D(\text{Fe-Mg})^{ol-v}$; los cuales, en su gran mayoría, no cumplieron con el valor de equilibrio de 0.37 ± 0.04 (Pu et al., 2017). Dicho valor se obtiene comparando el Mg# del olivino con el Mg# del líquido; para lo cual la razón $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ fue requerida, y calculada a través del trabajo de Kress & Carmichael (1991). Utilizando el test ya mencionado, los únicos pares *ol-v* en equilibrio fueron aquellos en los cuales la fase de olivino es un microlito (Fo_{-60}). De esta manera, para los miembros más básicos de las *Brechas del Altar*, se obtuvo temperaturas de 1043 ± 46 (n=10).

$$\ln D_i^{ol/melt} = a + \frac{b}{T} + c \ln(X_{NM}^{liq}) + d \ln(X_{SiO_2}^{liq}) + e(NF)$$

Tabla 5. Temperaturas obtenidas para la unidad Brechas del Altar.

UNIDAD	T (°C)	1σ
<i>Brechas del Altar</i>	1043	46

Por medio de las composiciones de las fases de **clinopiroxeno (cpx)** y **ortopiroxeno (opx)** presentes en las rocas del volcán El Altar, se pudo determinar las condiciones pre-eruptivas (presión y temperatura) de las mismas. Los pares cpx-opx fueron evaluados mediante el criterio de equilibrio, también propuesto en Putirka (2008). Este equilibrio se basa en el intercambio de Fe-Mg entre las fases de ortopiroxeno y clinopiroxeno. Así, el coeficiente de distribución K_d de un par clinopiroxeno-ortopiroxeno en equilibrio entrará en el rango de 1.09 ± 0.14 . Alrededor de la mitad de los pares formados inicialmente no cumplieron con el criterio de equilibrio; por ende, alrededor de la mitad de los pares no fueron tomados en cuenta. Como resultado, se obtuvieron temperaturas de 992 ± 25 °C (n=21) para las rocas más básicas de las *Brechas del Altar*, pudiendo llegar hasta valores de 948 ± 20 °C (n=4) en sus miembros intermedios (RIO 31B, $\text{SiO}_2 = 59.88$ wt%). Para las *Brechas de Collanes*, las temperaturas más altas son de 999 ± 26 °C (n=20), pudiendo llegar a 971 ± 15 °C (n=5) en su muestra más evolucionada. Con respecto a las condiciones de presión, valores de 3.3 ± 1.76 kbar (n=21) han resultado para las *Brechas del Altar*. En las *Brechas de Collanes* se obtienen resultados desde 4.5 kbar (n=1) hasta 3.3 kbar (n=1). A diferencia del geotermómetro plg-liq, los valores de P y H_2O en el líquido, no necesitan ser preestablecidos para este geotermómetro de fases anhidras. Debido a la ausencia de pares cpx-opx en equilibrio en la unidad *Gabro-Diorita*, y a la ausencia de estas fases en las rocas de la *Riolita de Collanes*, este método no pudo ser utilizado en estos grupos. Las temperaturas

obtenidas con este método, *termómetros y barómetros de dos piroxenos* concuerdan con aquellas obtenidas con las fases de plagioclasa y líquido.

Tabla 6. Resumen de temperaturas y presiones obtenidas para las unidades Brechas del Altar y Brechas de Collanes.

UNIDAD	T (°C)	1σ	P (kbar)	1σ
<i>Brechas del Altar</i>	948-992	20-25	3.3	1.76
<i>Brechas de Collanes</i>	971-999	15-26	3.3-4.5	-----

La presencia de óxidos, **titanomagnetitas (Ti-mt) e ilmenitas (il)**, en las *Brechas de Collanes*, permite la aplicación del geotermómetro de Ghiorso & Evans (2008), el cual trabaja con pares *Ti-mt-il* en equilibrio. Como indica la Figura 29, siete fueron los pares en equilibrio según el trabajo de Bacon & Hirschmann (1988), cuyo test se fundamenta en las razones de Mg/Mn presentes entre las fases de magnetita e ilmenita. Cuatro de estos pares en equilibrio corresponden a las *Brechas de Collanes*, y los tres restantes corresponden a la unidad *Gabrodiorítica*.

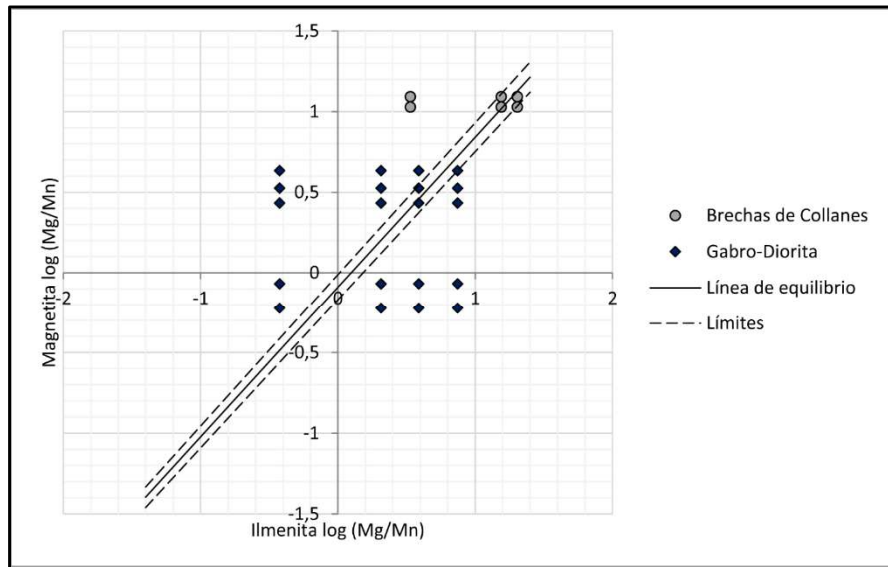


Figura 29. Test de equilibrio de Bacon & Hirschmann (1988) para ilmenita y titanomagnetita

Una vez aplicado el geotermómetro ya mencionado, se obtuvo un valor de 990.75 ± 7.5 °C (n=4) como temperatura para las rocas de las *Brechas de Collanes*.

A pesar de la existencia de pares *Ti-mt - il* en equilibrio en las rocas de la unidad *Gabro-Diorita*; dado el rango composicional utilizado en la calibración de este geotermómetro, no es posible su uso en esta unidad. No existen análisis de *il* en las unidades *Brechas del Altar*, ni *Riolita de Collanes*.

4.4.2 Geobarometría

En una amplia variedad de productos ígneos relacionados a zonas de subducción, desde rocas de composición básicas hasta rocas ácidas, la paragénesis mineral está caracterizada por la presencia de la fase del **anfíbol** (Ridolfi et al., 2010; Ridolfi & Renzulli, 2012). Este es el caso de las rocas estudiadas en el presente trabajo. Ya que el anfíbol se presenta en las *Brechas del Altar* y en las rocas de la unidad *Riolita del Collanes*, se ha recurrido a la geobarometría únicamente en estos dos grupos. Trabajos, como los presentados en (Johnson & Rutherford, 1989; Hidalgo et al., 2006), y aquellos con objetos de estudio en el mismo contexto geológico al de El Altar (e.g. Samaniego et al., 2011), se ayudan de alguna herramienta geobarométrica basada en esta fase para la caracterización de las condiciones magmáticas respectivas. Así, habiendo determinado la clase de anfíboles existentes en los productos de El Altar (i.e. calco alcalina; Figura 24), se trabaja con el geobarómetro de Ridolfi et al. (2010).; en donde se necesitan únicamente los wt% de los óxidos mayores en el anfíbol, contrastando con los métodos anteriores, en los cuales se necesita la química de un par de fases. Los valores obtenidos de presión son de 3.68 ± 0.22 kbar (n=6), en dos muestras hyalofílicas, y 4.67 kbar (n=2), en una de las muestras más evolucionada y porfírica, de la unidad *Brechas del Altar*. En la *Riolita de Collanes*, la presión es de 4.38 ± 0.43 kbar (n=17).

Tabla 7. Resumen de P para los anfíboles obtenidos con el geobarómetro de Ridolfi & Renzulli, (2012)

UNIDAD	P (kbar)	1 σ
<i>Brechas del Altar</i>	3.68-4.67	0.22-0
<i>Riolita de Collanes</i>	4.38	0.43

4.5 Caracterización Geoquímica

4.5.1 Elementos Mayores

Los análisis en elementos mayores fueron recalculados al 100% en base anhidra, y el hierro está representado como FeO_t.

La clasificación de las rocas, como se observa en los diagramas de Miyashiro (1974) y de Irvine & Baragar (1971), siguen una tendencia calco alcalina.

Las rocas de las distintas unidades: *Brechas de Collanes*, *Brechas del Altar*, *Riolita de Collanes* y *Gabrodiorita* se clasificaron mediante los diagramas de Peccerillo & Taylor (1976) y de Le Bas et al. 1986, en los cuales se plotea K₂O vs SiO₂ y (K₂O+Na₂O) vs SiO₂, respectivamente.

En las Figura 30, 31 y Figura 32 se puede observar que las cuatro unidades son calco alcalinas. Las *Brechas del Altar* y *Riolita de Collanes* se encuentran en el campo alto K; mientras que las *Brechas de Collanes* están en el límite entre los campos de alto y medio K.

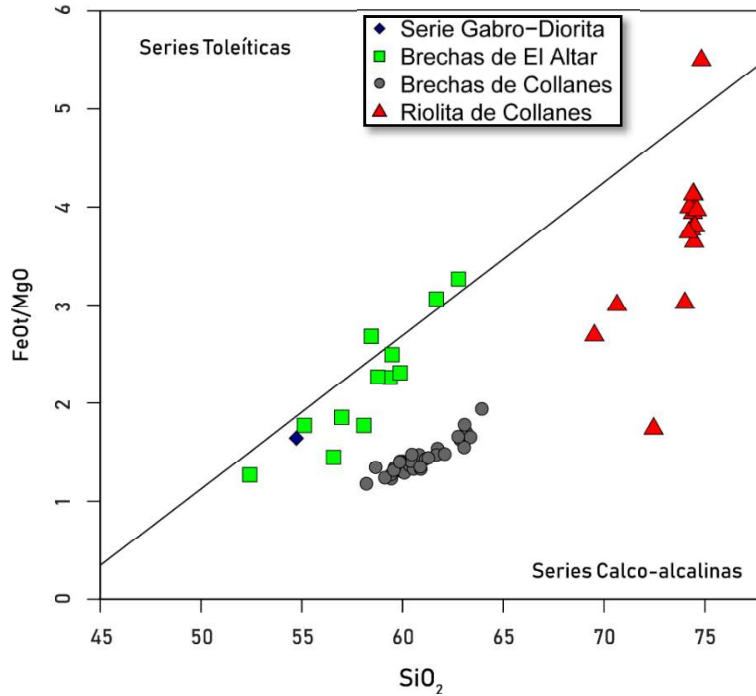


Figura 30. Diagrama de clasificación de rocas $FeOt/MgO$ vs. SiO_2 de Miyashiro, (1974)

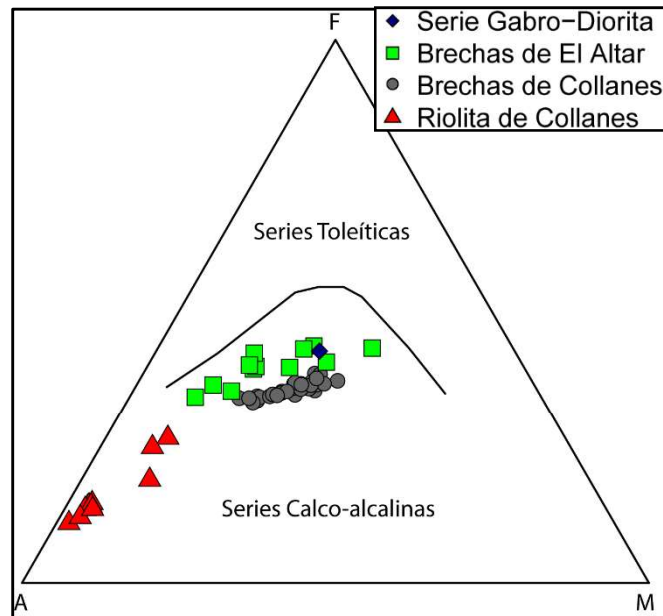


Figura 31. Composición de las rocas de El Altar dentro del diagrama AFM (A = $Na_2O + K_2O$; F = FeO^* ; M = MgO) de Irvine & Baragar, (1971)

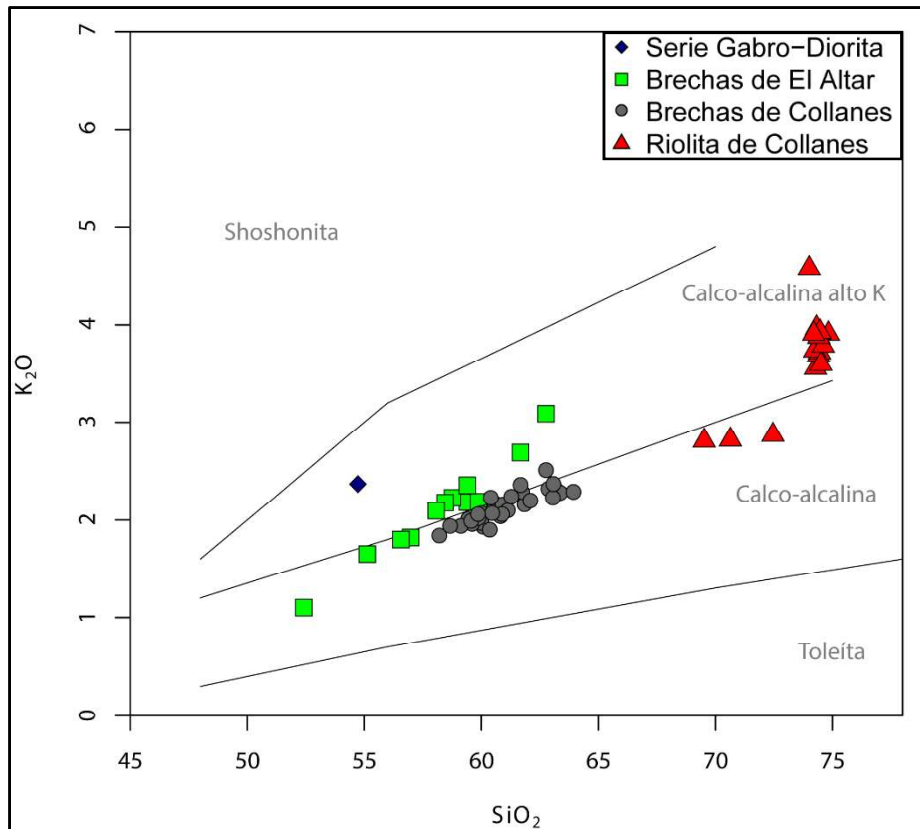


Figura 32. Diagramas de clasificación de las rocas del volcán El Altar según Peccerillo & Taylor, (1976)

El diagrama TAS ha permitido la clasificación de las rocas de las distintas unidades, siendo la unidad de *Brechas de Collanes* rocas del tipo **andesitas** (59.13 wt% - 63.37 wt% SiO_2 ; 1.84 wt% - 2.51 wt% K_2O). La unidad *Brechas del Altar* son rocas del tipo **andesitas basálticas a traquiandesitas** (52.42 wt% - 59.88 wt% SiO_2 ; 1.10 wt% - 2.23 wt% K_2O). La unidad *Riolita de Collanes* está constituida, como su nombre lo indica, por rocas del tipo **riolitas** (69.52 wt% - 74.83 wt% SiO_2 ; 2.81 wt% - 4.58 wt% K_2O)

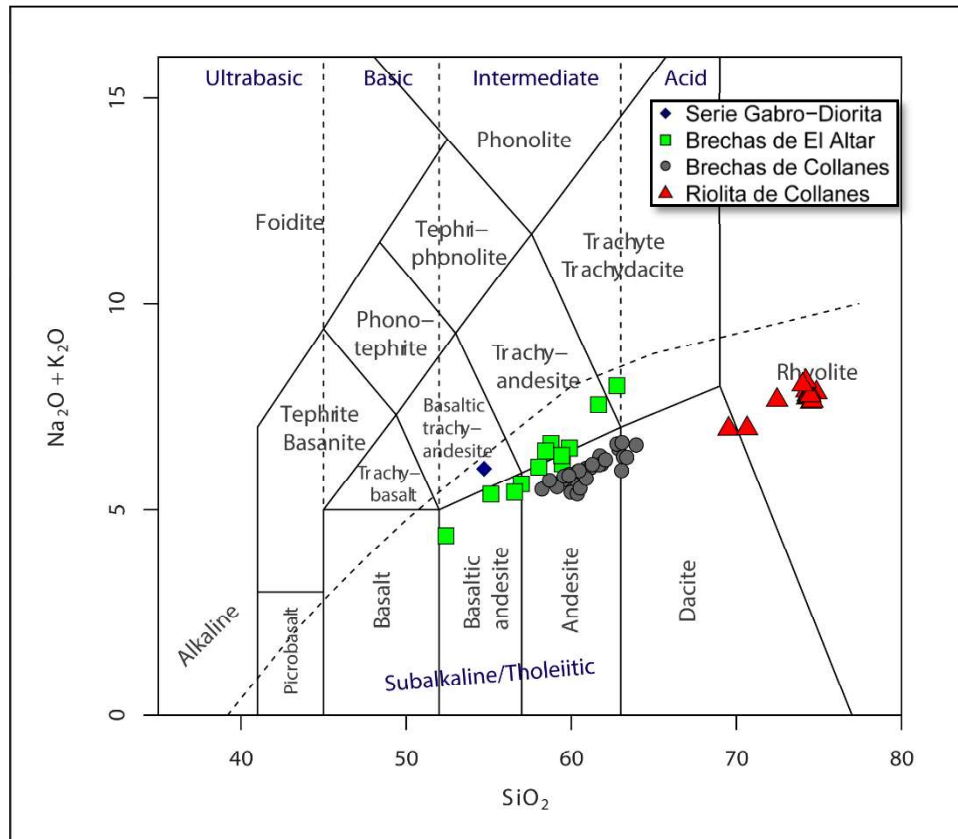


Figura 33. Diagrama de clasificación de las rocas del volcán El Altar según Le Bas et al., (1986)

4.5.1.1 Diagramas Harker

Los diagramas propuestos por Harker (1909) permiten la discriminación entre los posibles magmas originarios o parentales y los magmas más evolucionados o magmas hijos de una serie magmática. Harker (1909) relaciona el incremento de sílice a la evolución magmática; así, los diagramas Harker permiten definir la extensión de la evolución magmática en base a los contenidos de sílice. Además, los diagramas Harker permiten evidenciar los minerales que han fraccionado debido a las tendencias que estos presentan en los elementos mayores durante la evolución de un magma.

Las unidades *Brechas de Collanes*, *Brechas del Altar*, *Riolita de Collanes* y *Gabrodiorita* presentan una tendencia negativa para los óxidos TiO_2 , CaO , FeO , MgO . En los óxidos de Na y K las unidades *Brechas del Altar* y *Brechas de Collanes* presentan una correlación positiva con la sílice. La unidad riolítica presenta una variación en el contenido en estos óxidos a un valor

constante de sílice. Por último, el Al_2O_3 en las unidades *Brechas de Collanes* y *Brechas del Altar* sigue la tendencia característica de las series calco alcalinas.

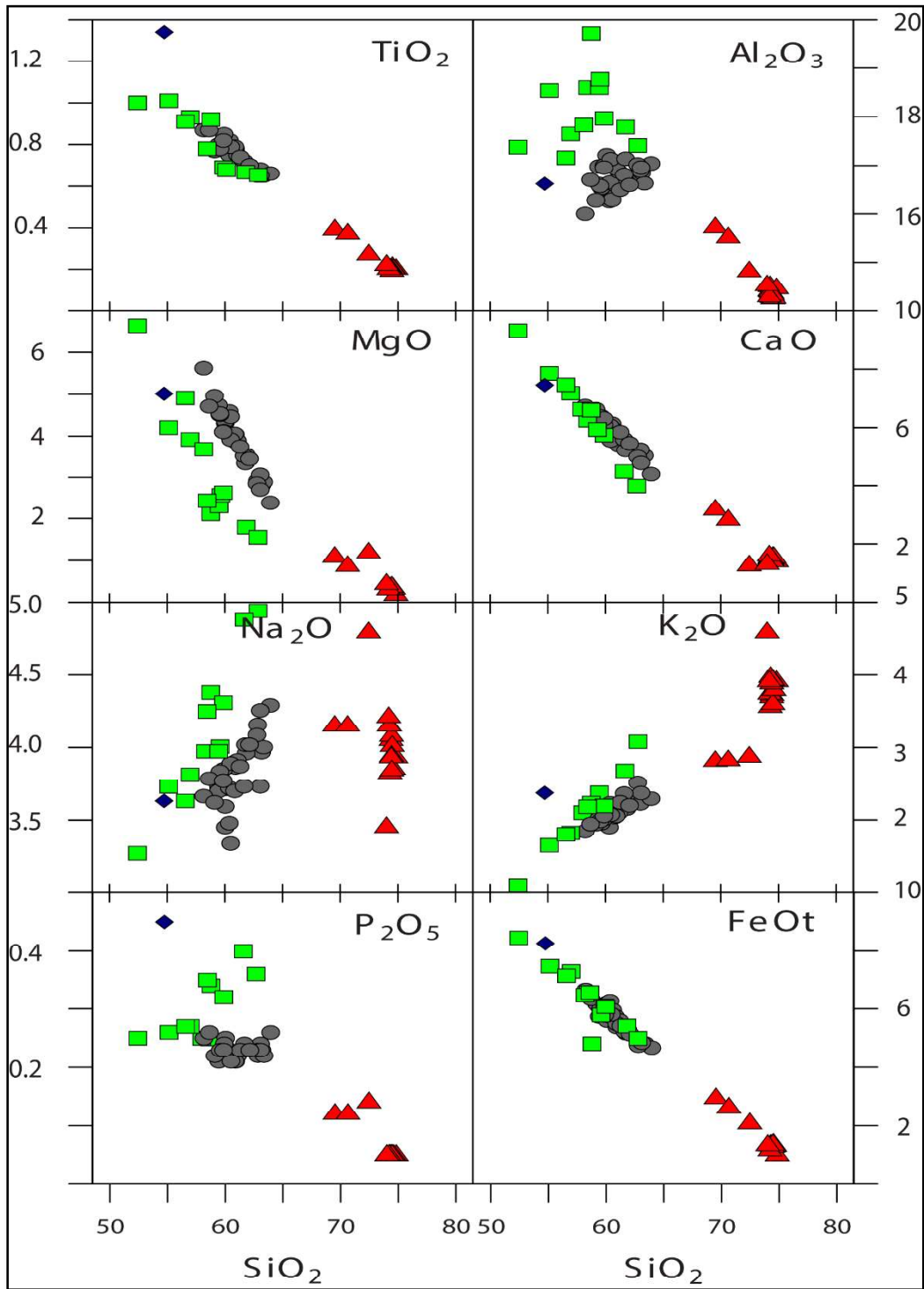


Figura 34. Diagramas de Elementos Mayores vs. SiO_2 (en porcentaje en peso). Para descripción de símbolos ver Fig. 33.

4.5.2 Elementos Trazas

Las composiciones de elementos en trazas, expresadas en ppm, de las rocas de El Altar son representadas en los distintos diagramas multielementales, de tierras raras y pseudoharker (Figura 37, 35, 36, Figura 37. Diagramas de elementos traza vs. SiO₂. Concentración de elementos trazas están expresados en ppm y sílice en wt% Para descripción de símbolos ver Fig.33). El índice de diferenciación utilizado en los diagramas pseudoharker es el SiO₂.

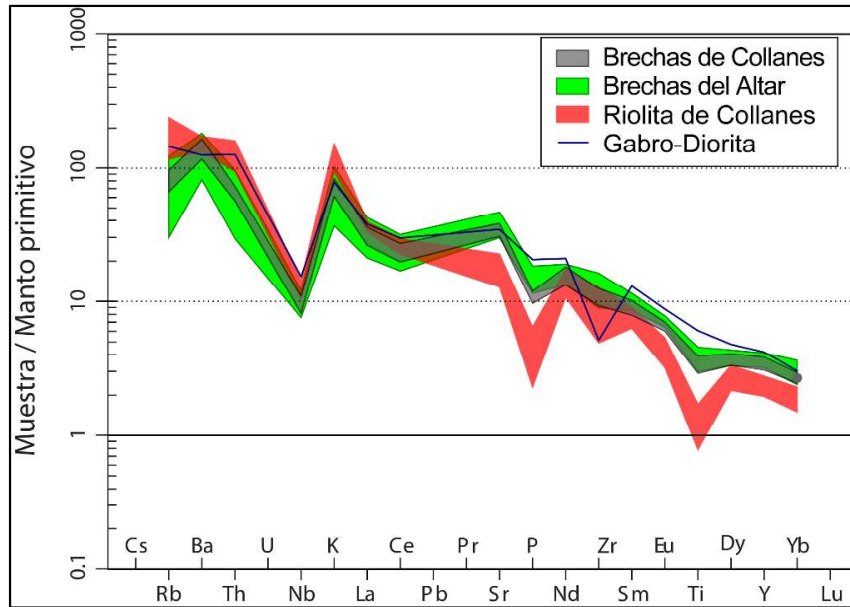


Figura 35. Diagrama multielemental de las unidades del volcán El Altar.

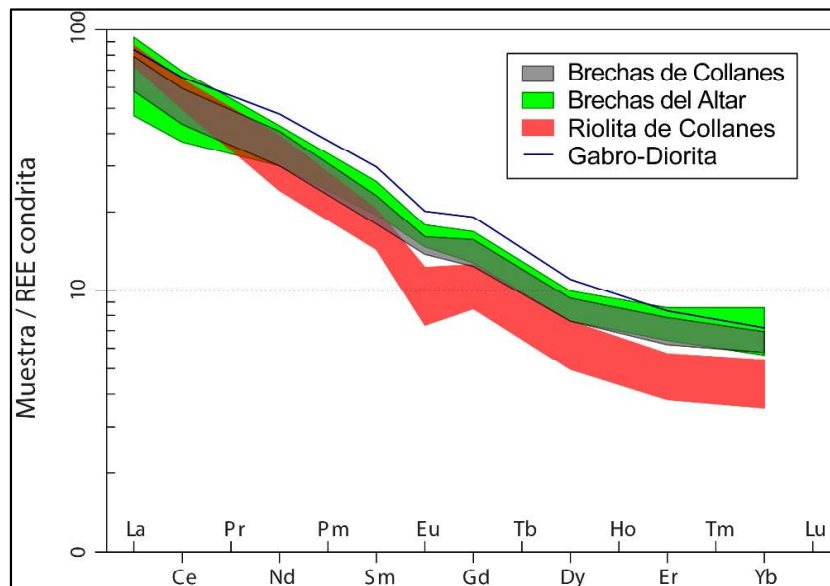


Figura 36. Diagrama de tierras raras normalizado a las condritas de las unidades del volcán El Altar.

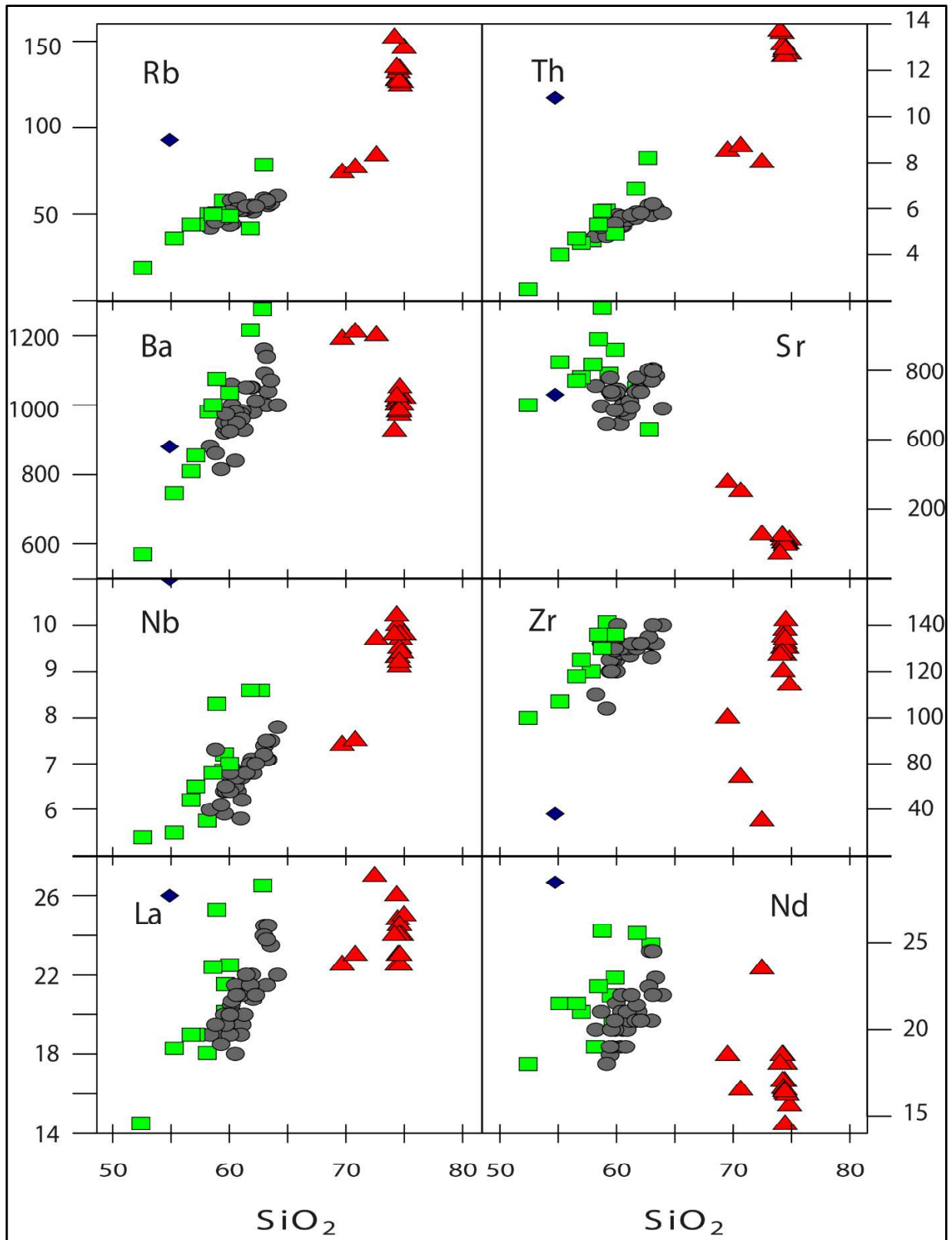


Figura 37. Diagramas de elementos traza vs. SiO_2 . Concentración de elementos traza están expresados en ppm y sílice en wt%. Para descripción de símbolos ver Fig.33.

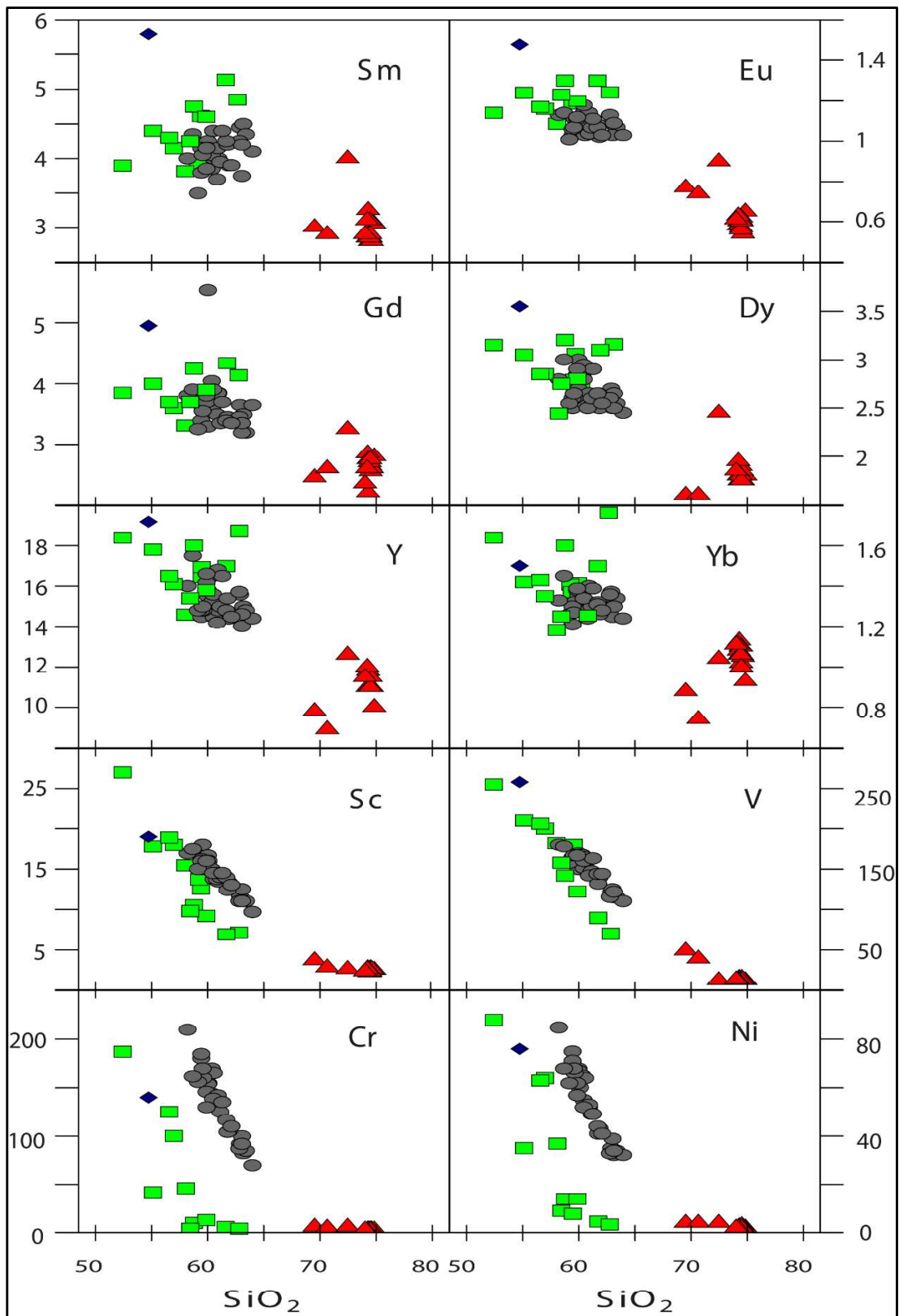


Figura 38. Diagramas de elementos traza vs. SiO_2 . Concentración de elementos trazas están expresados en ppm y sílice en wt%. Para descripción de símbolos ver Fig.33.

4.5.3 Geoquímica Brechas de Collanes

Las rocas de la unidad *Brechas de Collanes* siguen una clara tendencia de incremento de elementos como incompatibles y disminución de los elementos compatibles con el aumento del grado de diferenciación (i.e. aumento de sílice). Así, los elementos que se comportan como incompatibles a lo largo de la evolución magmática de la unidad *Brechas de Collanes* son los large ion lithophile elements (LILEs) (Rb y Ba) y los high-field-strength elements (HFSE) (Th, Nb y Zr), aunque estos últimos con tendencias menos marcadas que los LILEs. Por otro lado, los metales de transición (Sc, V, Cr y Ni) muestran un comportamiento compatible, correlacionándose negativamente con el SiO₂ wt%. Con respecto a las tierras raras (REE), las tierras raras livianas (LREE) (La y Nd) muestran un comportamiento incompatible, mientras que las tierras raras pesadas (HREE) (Dy, Y e Yb) son compatibles. Las tierras raras medias (MREE) (Sm, Eu y Gd) no muestran un comportamiento claro, al igual que el Sr.

4.5.4 Geoquímica Brechas del Altar

En las *Brechas del Altar* se observan las mismas tendencias que en las *Brechas de Collanes*. Los LILEs y los HFSE se presentan como incompatibles. Los metales de transición exhiben un comportamiento compatible. Las LREE se muestran como incompatibles, contrastando con las HREE, que se comportan como elementos compatibles. El Sr y las MREE, al igual que en la unidad anterior, no presentan una tendencia clara en su comportamiento.

4.5.5 Geoquímica Domos Riolíticas

Las tendencias evolutivas en las rocas riolíticas no son muy claras y generalmente no siguen las líneas de evolución de las anteriores unidades. Se puede observar, al igual que en la química de elementos mayores (i.e. Na₂O, K₂O), que tres muestras difieren del resto en el contenido de elementos trazas. Es el caso del bario que las muestras RIO 9, RIO 92 y ALT 156 difieren en hasta 240 ppm con el resto de las muestras. Así también, la diferencia entre estas muestras se observa en los HFSE y Sr. Las REE no muestran esta diferencia, y tampoco lo hacen los metales de transición.

Algo notorio, es la variación en el contenido de ciertos elementos sin un cambio en el contenido de SiO₂. Esta característica se encuentra en las muestras de la unidad riolítica. Esto sucede en los LILEs (Rb y Ba), en los HFSE (Nb, Zr y menos marcado en el Th) y en las LREE (La y Nd). Los metales de transición, las HREE y el Sr no muestran variación composicional.

La tendencia del MgO es decreciente con el aumento del SiO₂. Esto sugiere que minerales como clinopiroxenos y ortopiroxenos fraccionaron a lo largo del proceso de diferenciación del magma. El CaO disminuye en la evolución del magma. Esto se debe al fraccionamiento de minerales como clinopiroxenos y plagioclasas cálcicas. La cristalización de minerales ferromagnesianos, como clinopiroxenos y ortopiroxenos, así como de óxidos de Fe, como Ti-magnetitas e ilmenitas, se evidencia en la Figura 34; en donde la tendencia del Fe es decreciente con el aumento del sílice. La correlación negativa entre el TiO y el SiO sugiere la cristalización de minerales como Ti-magnetita e ilmenita. En resumen, en la unidad *brechas de Collanes* los minerales que fraccionaron son plagioclasas, clinopiroxeno, ortopiroxeno, titanomagnetitas e ilmenitas.

4.5.5.1 Alteración hidrotermal *Riolita de Collanes*

La alteración hidrotermal es un proceso complejo que comprende cambios mineralógicos, químicos y texturales debido a la interacción de fluidos a cierta temperatura con la roca caja (Pirajno, 2013). Rocas con composiciones ácidas, que se hallan en superficie, pueden haber sufrido procesos de alteración, tanto de tipo hidrotermal, como de alteración en superficie en su historia geológica (Lintjewas & Setiawan, 2018).

Parsapoor et al. (2009) indica la presencia de abundante sericita y grandes cantidades de cuarzo en mozaico en rocas producto de alteración filica. Las rocas de la unidad *Riolita de Collanes*, en su mayoría, se encuentran alteradas. El producto de alteración más común es la sericita; es decir, las riolitas fueron afectadas por una alteración filica o sericítica. Este proceso es caracterizado por el remplazo de ambos tipos de feldespatos, potásicos y plagioclasas, por muscovita (en forma de “sericita”).

La asociación mineral característica en este tipo de alteración está definida por cuarzo, sericita y pirita fino-granulares con caolinita, albita y feldespato potásico en pequeñas proporciones (Parsapoor et al., 2009). Sillitoe (2010), en su descripción de las distintas alteraciones asociadas a un sistema de pórfido cuprífero, define a la alteración filica con cuarzo y sericita como sus minerales distintivos; y con sulfuros asociados como pirita y calcopirita.

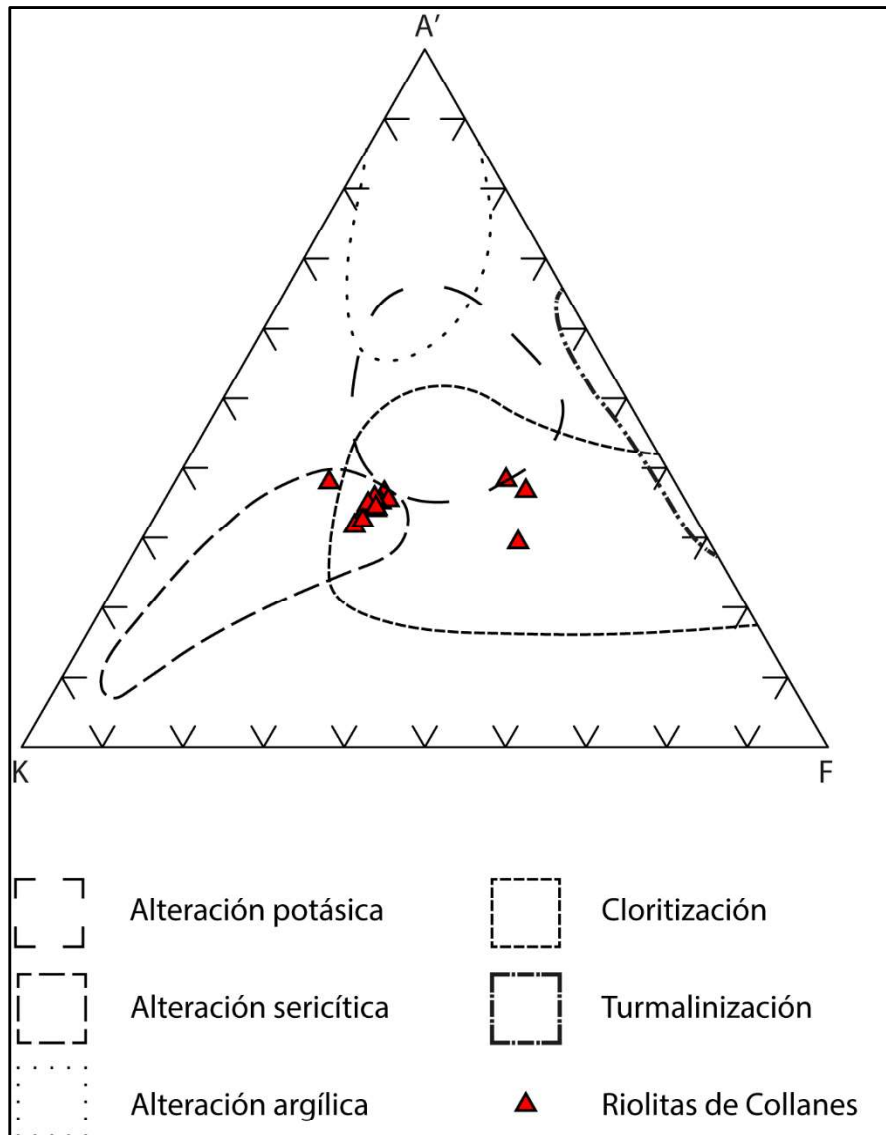


Figura 39. Diagrama A'KF ($A' = Al_2O_3 - (Na_2O + K_2O)$; $K = K_2O$; $F = FeO + MgO + MnO$)

Donde todos los óxidos están en proporciones moleculares. El diagrama muestra los campos de los distintos tipos de alteraciones. Tomado de Alderton et al. (1980)

En un diagrama A'KF, las rocas de la unidad *Riolita de Collanes* son ploteadas con el fin de identificar el tipo de alteración al que pudieron haber sido sometidas (Alderton et al., 1980). Junto con la petrografía, se puede establecer que la alteración que actuó sobre las riolitas es la alteración sericítica. Las rocas con menor grado de alteración potásica son aquellas con menor participación del componente K; es decir, las más alejadas del extremo K en la Figura 39. Adicionalmente, en el diagrama se observa que las rocas pudieron haber sufrido cloritización.

Varios estudios (e.g. Alderton et al., 1980; Im et al., 2002), se han enfocado en el análisis de los cambios en el comportamiento de los elementos mayores y trazas, durante los distintos procesos de alteración que una roca puede sufrir, tanto en superficie como en profundidad. Wood (2002) propone el uso de las variaciones en las concentraciones de las REE como un trazador en la exploración de campos geotérmicos.

Por el lado de elementos mayores (Figura 34), Na y K, que están concentrados en los feldespatos, presentan gran variación en las riolitas, reflejando la alteración de estos minerales. Así también, las micas, la biotita en particular, son las fases que más álcalis contienen en rocas de composición riolítica (Maghraoui et al., 2002). Así, la disminución del contenido de Na_2O y K_2O es atribuida principalmente a la alteración de fases como feldespatos y biotitas, respectivamente. Con respecto a los elementos trazas (Figura 37, Figura 38), el Rb, catión con características muy similares al K, muestra la misma tendencia que K_2O en los diagramas Harker. La variación en Ba, también parecido en su comportamiento al K_2O , se puede explicar por la desestabilización de fases como biotita y feldespatos (Im et al., 2002). En el caso del Sr, se observa en los diagramas que la variación es muy similar a la del CaO y, que en la unidad *Riolita de Collanes*, es casi nula.

El Zr posee altos valores como coeficientes de distribución en líquidos de composición riolítica en las fases de biotita y anfíbol (Rollinson, 1993). Se evidenció la ausencia de estas fases en las rocas con alteración, lo cual sugiere que el cambio en el contenido de este elemento es debido a la desestabilización de estas fases minerales.

Existe un empobrecimiento en REE, tanto en las LREE como en las HREE. Aunque trabajos como el de Lintjeras & Setiawan (2018) mencionan un enriquecimiento en REE como resultado de la alteración hidrotermal y de la meteorización en las REE; en el presente trabajo se evidencia la pérdida de estos elementos con respecto a la muestra RIO 145, escogida como muestra más fresca de la unidad. Maghraoui et al. (2002) muestra tendencias de empobrecimiento en las HREE para rocas de composiciones ácidas; así también, Parsapoor et al. (2009) señala una pérdida de LREE y MREE debido a la alteración del tipo sericítica.

Sumado al bajo contenido de metales de transición (Sc, V, Cr y Ni) en productos diferenciados, como son las rocas de la unidad Riolita de Collanes, se tiene una poca o nula variación de estos elementos en un proceso de alteración hidrotermal (Parsapoor et al., 2009). En resumen, la unidad Riolita de Collanes ha sufrido procesos de alteración sericítica, principalmente, y clorítica,

lo cual ha alterado su composición química. Esto se refleja en la variación de ciertos elementos (i.e. Na, K, Nb, Zr, La y Nd) sin un aumento de SiO₂ (Figura 34, Figura 37 y Figura 38).

4.6 Modelización

Todas las características petrográficas y químicas presentes, como son el cambio composicional de centros a bordes (*plg* y *cpx*), entre fenocristales y microlitos (*plg*, *cpx*, *opx* y *ol*) entre las inclusiones y los microlitos (óxidos) sugieren cristalización fraccional. Además, los datos geoquímicos de los distintos óxidos, evidenciados en los respectivos diagramas Harker, presentan correlaciones positivas y negativas con respecto al SiO₂, lo cual indica que dichos elementos presentan comportamientos incompatibles y compatibles, respectivamente. Estos argumentos sustentan la hipótesis de que el proceso petrogenético principal durante la evolución del magma para las series geoquímicas de El Altar es la **cristalización fraccional**.

Procesos como *mezcla de magmas* y *asimilación* pueden también estar presentes en la evolución de los magmas (Kuritani, 2003; Grove et al., 1982). Bourdon et al. (2002), Samaniego et al. (2005), Ancellin et al. (2017) argumentan que la asimilación cortical en el arco ecuatoriano es baja. Además, la selección de dos miembros finales para un proceso de mezcla, parece ser un proceso muy aleatorio. Esto, junto con petrología experimental análoga detallada en los siguientes apartados, señalan un proceso de cristalización fraccional.

Para verificar dicho proceso, se realizan los diagramas donde un logaritmo decimal de un elemento de comportamiento muy incompatible (e.g. Rb, Ba) se compara con el logaritmo decimal de un elemento muy compatible (e.g. Ni, Cr). Si la tendencia de los datos en este diagrama es cercana a la vertical indica un proceso de cristalización fraccional, debido a que este proceso agota los magmas en elementos compatibles de una manera muy eficaz, resultando en una línea con una fuerte pendiente; mientras que si la tendencia es casi horizontal el proceso es de fusión parcial.

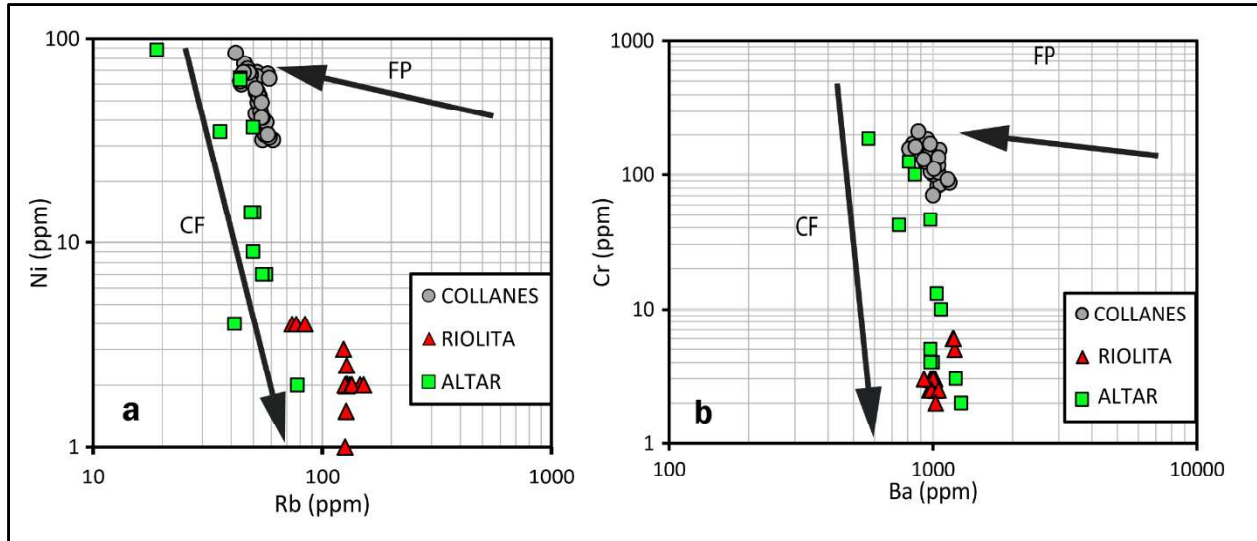


Figura 40. Diagramas de identificación de procesos de cristalización fraccional (CF) y fusión parcial (FP), Ni vs. Rb (izquierda), Cr vs. Ba (derecha).

Según estos diagramas, el proceso magmático que ha dado paso a las unidades *Brechas del Altar* y *Brechas de Collanes* es el de cristalización fraccional (Figura 40). Se plantean varios modelos de **cristalización fraccional** para caracterizar y cuantificar este proceso:

4.6.1 Modelización Brechas de Collanes y Riolita de Collanes

1. **MODELO I:** Este modelo consiste en la evolución desde las *Brechas de Collanes* a las *Riolitas de Collanes* con un cumulo que fracciona con la siguiente paragénesis mineral: plg + anf + ol + cpx + ti-mt.
2. **MODELO II:** Este modelo consiste la evolución desde las *Brechas de Collanes* a las *Riolitas de Collanes* con un cumulo que fracciona la siguiente paragénesis mineral: plg + anf + opx + cpx + ti-mt \pm apt
3. **MODELO III:** Este modelo consiste en dos etapas de cristalización fraccional; la primera etapa representa únicamente la evolución de las *Brechas de Collanes*, con un cumulo compuesto por: plg + opx + cpx + Ti-mt \pm apt; mientras que la segunda etapa abarca la evolución desde la roca más ácida de las *Brechas de Collanes* hasta las *Riolitas de Collanes* en la cual fracciona un cumulo con paragénesis mineral compuesta por: plg + opx + anf + ti-mt + cpx.

4.6.1.1 Modelo I

Se seleccionan dos composiciones de rocas, la primera como magma parental y la segunda roca como magma hijo, basándose en un diagrama Harker SiO_2 vs K_2O . Se tiene como resultado que la roca más básica es la RIO 121B ($\text{SiO}_2 = 59.13$ wt%, *brechas de Collanes*) y la más ácida la RIO 145 ($\text{SiO}_2 = 74.20$ wt%, *riolita de Collanes*).

El modelo plantea un cumulado con la siguiente paragénesis mineral: Plg + Anf + Ol + Cpx + Ti-mt. La composición de estos minerales se la conoce debido al análisis de microsonda electrónica, del cual se tomó los valores de los fenocristales más básicos, es decir el centro de estos minerales, debido a que lo más lógico es que estos centros habrían estado en equilibrio con el magma al momento de su formación, mas no los bordes de estos. En la Tabla 8 se muestra las composiciones de las rocas padre e hijo y de los minerales que fraccionaron:

Tabla 8. Composiciones de roca padre, hijo y de los minerales que fraccionan utilizados en el modelo I.

	MAGMA PADRE	PARAGENESIS MINERAL					MAGMA HIJO
	<i>RIO 121B</i>	<i>plg</i>	<i>anf</i>	<i>ol</i>	<i>cpx</i>	<i>Ti-mt</i>	<i>RIO 145</i>
SiO₂	57.2	55.7	42.3	38.1	51	0.1	74
TiO₂	0.7	0.0	3.1	0.0	0.6	11.9	0.2
Al₂O₃	15.8	27.3	11.5	0.0	2.5	2.5	14.3
FeO	5.9	0.6	12.9	23.3	9.2	75.5	1.2
MnO	0.3	0.0	0.2	0.4	0.3	0.4	0.1
MgO	4.8	0.1	13.5	37.3	14.6	2	0.3
CaO	6.5	10.2	11.3	0.2	20.4	0.1	1.6
Na₂O	3.5	5.7	2.5	0.0	0.4	0.0	4.2
K₂O	1.9	0.4	0.7	0.0	0.0	0.0	3.9
P₂O₅	0.2	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1

En la Tabla 9 se muestra los resultados del balance de masas realizado para este modelo. Se evidencia que el mineral más abundante en el cumulado planteado son las plagioclasas. Este cumulado se forma a partir de la cristalización de 54,38% del magma mencionado. La validez de la regresión lineal que se realizó es expuesta mediante el coeficiente SEE cuyo valor es de 0.3.

Tabla 9. Resultados del balance de masas realizado para el modelo I.

ROCA PADRE	ROCA HIJO	PARAGÉNESIS MINERAL					% (1-F)	SEE
		<i>plg</i>	<i>anf</i>	<i>ol</i>	<i>cpx</i>	<i>Ti-mt</i>		
RIO 121B	RIO 145	52.9 %	21.8 %	12.2 %	8.7 %	4.5 %	54.28	0.3

Los coeficientes de distribución que se utilizaron fueron de magmas andesíticos a riolíticos, debido a que el magma presenta este rango composicional (Rollinson, 1993). Trabajar con coeficientes de distribución solo del magma más básico estaría restringiendo a que dicho elemento no participe en un mineral. En la Tabla 10 se muestran los valores de los Kd utilizados para realizar el modelamiento.

Tabla 10. Coeficientes de distribución utilizados para el modelo I (Rollinson, 1993; “GERM partition coefficient (Kd) database,” n.d.).

Kd	MINERALES				
	cpx	anf	plg	Ti-mt	ol
La	1.11	0.86	0.45	0.22	0.01
Ce	0.04	2.13	0.27	0.2	0.01
Nd	2.1	2.89	0.21	0.3	0.01
Sm	5.23	2.3	0.23	0.35	0.02
Eu	0.4	3	2	0.25	0.01
Gd	0.70	5.4	0.1	0.32	0.02
Dy	0.78	6	0.06	0.28	0.03
Er	0.69	5.94	0.03	0.22	0.04
Yb	1.1	4.89	0.05	0.25	0.02
Rb	0.01	0.04	0.03	0.01	0.01
Ba	1.4	0.3	0.56	1.5	0.02
K	0.04	0.08	0.1	0.01	0
Nb	0.09	1.3	0.02	1	0.01
Sr	0.52	1.65	2.84	0.01	0.02
Zr	0.1	3.8	0.04	0.2	0.01
Ti	0.01	13	0.05	9	0.03
Y	0.35	6	0.04	0.5	0.01
V	2.5	12	0.38	30	0.08
Cr	2.6	20	0.01	32	5.14
Co	3	13	0.01	8	10.7
Ni	4.6	9.3	0.1	10	24

En la Tabla 11 se comparan los valores calculados por el modelo de la composición del líquido con los valores de la composición del líquido reales para cada elemento, los cuales deben ser

similares o iguales. Los valores de composición calculados se asemejan bastante a los valores reales para todos los grupos de elementos químicos.

Tabla 11. Composiciones en elementos traza para las rocas padre (Co) e hijo (CI real) de la cristalización fraccional y composiciones teóricas calculadas (CI calculado).

	Co	CI real	CI calculado
La	18.5	26	26.7
Ce	35	46.5	47.2
Nd	18	18.5	18.9
Sm	3.5	3.1	3.3
Eu	1.0	0.6	0.6
Gd	3.3	2.6	2.6
Dy	2.6	1.9	1.8
Er	1.4	1.2	1
Yb	1.3	1.1	1.1
Rb	48.5	135	103.9
Ba	815	1025	1158.7
K	18800	39100	38800.7
Nb	6.1	10.2	10.2
Sr	646	322	317.9
Zr	104	128	115.5
Ti	7300	1800	1246.1
Y	14.8	12	11
V	158	12	11.3
Cr	156	2	3.1
Co	20	2	2.9
Ni	62	2	13.8

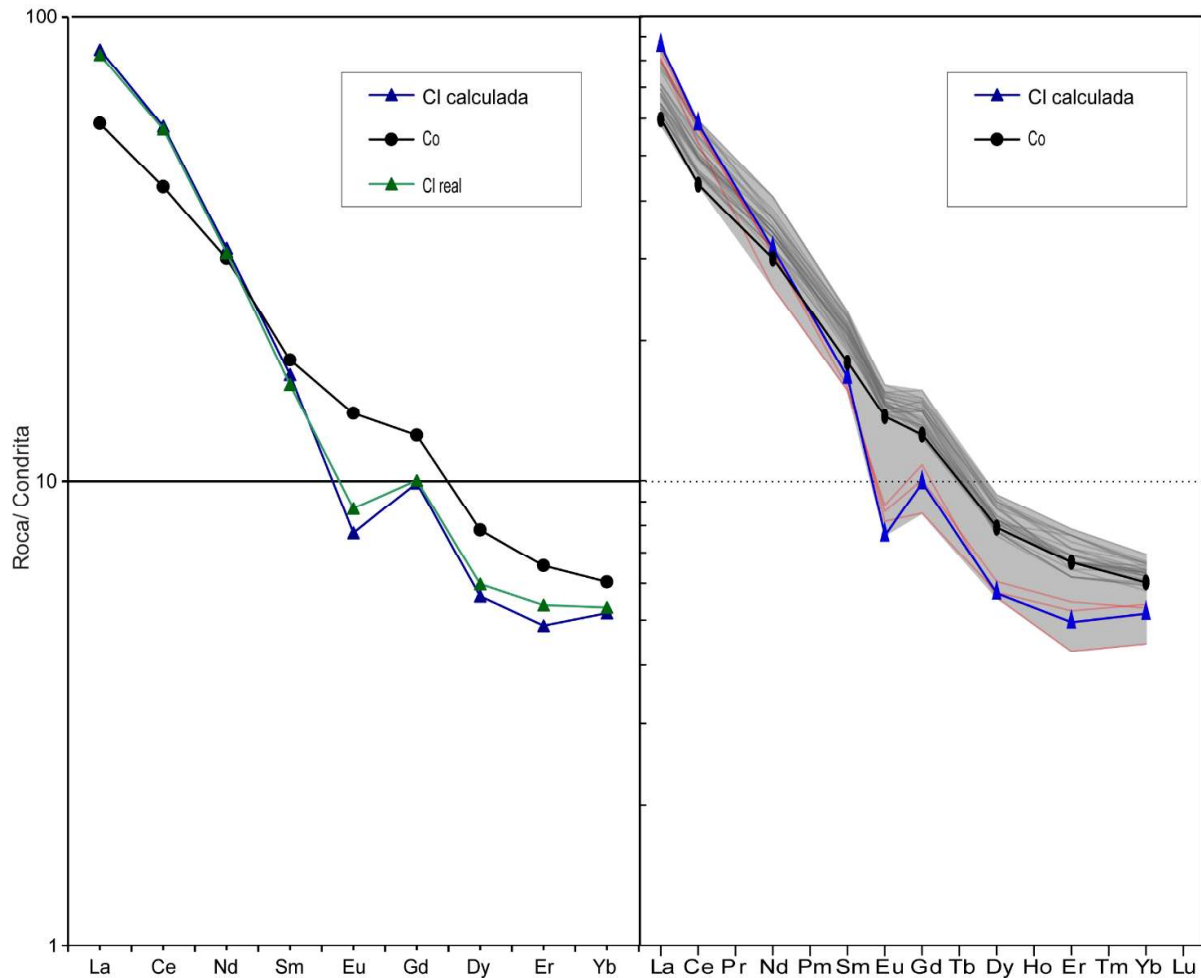


Figura 41. Diagrama de tierras raras normalizado a la composición de la condrita (Sun & McDonough, 1989).

Se muestra las composiciones de las rocas padre, hijo y del modelo [IZQUIERDA]; y las composiciones de roca padre y del modelo, las líneas opacas representan las rocas de las Brechas de Collanes (negro) y Riolita de Collanes (rojo) [DERECHA]. Co= Composición roca padre; CI= Composición real de la roca hijo; CI calculada= Composición teórica producidas por el modelo.

Las concentraciones obtenidas han sido normalizadas a condrita según Sun & McDonough, (1989) y han sido ploteadas en un diagrama de REE junto con las concentraciones del magma padre y magma hijo real.

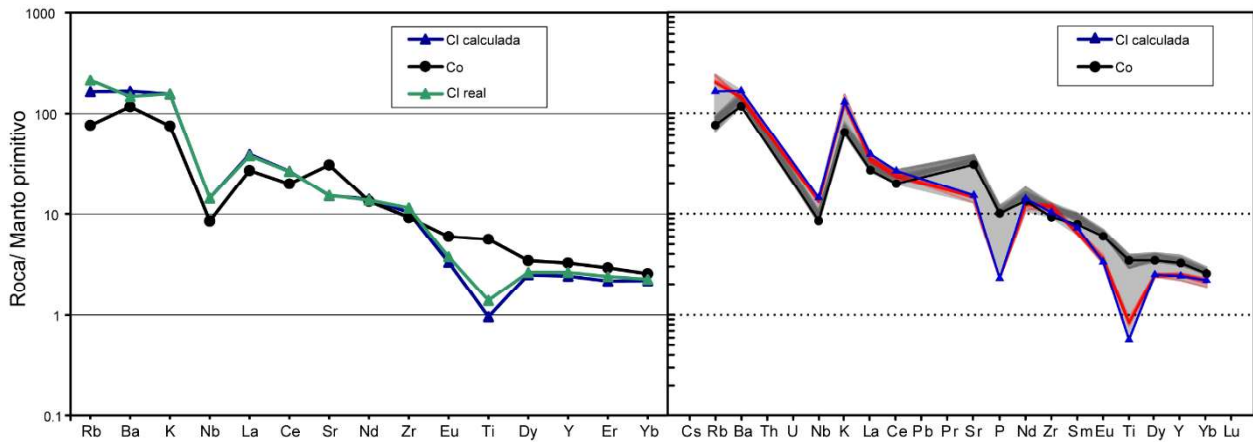


Figura 42. Diagrama multielemental normalizado a la composición del manto primitivo (Sun & McDonough, 1989)

Se muestra las composiciones de las rocas padre, hijo y del modelo [IZQUIERDA]; y las composiciones de roca padre y del modelo, las líneas opacas representan las rocas de Brechas de Collanes (negro) y Riolita de Collanes (rojo) [DERECHA].

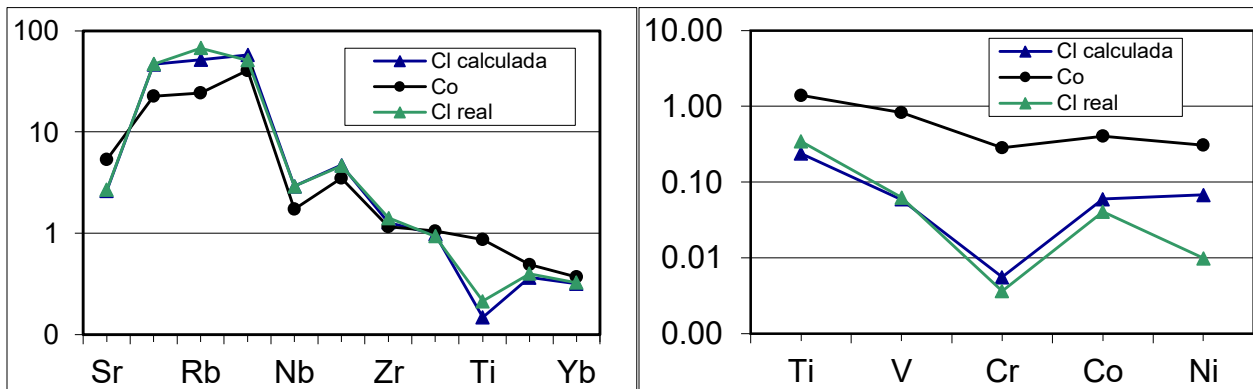


Figura 43. Diagramas multielementales normalizados a la composición del manto primitivo (Sun & McDonough, 1989).

Se muestra las composiciones de las rocas padre, hijo y del modelo.

En el diagrama de REE y multielemental se puede observar que las muestras de *Collanes* y *Riolitas* se encuentran dentro del campo formado por el CI calculado y el Co a través de algunos elementos mientras que para otros como es el caso de las tierras raras pesadas se encuentran fuera lo cual indica que el modelo es válido para explicar la evolución de dichas unidades solo parcialmente.

La diferencia composicional entre el magma padre y magma hijo es de $\text{SiO}_2 = 17\text{wt}\%$.

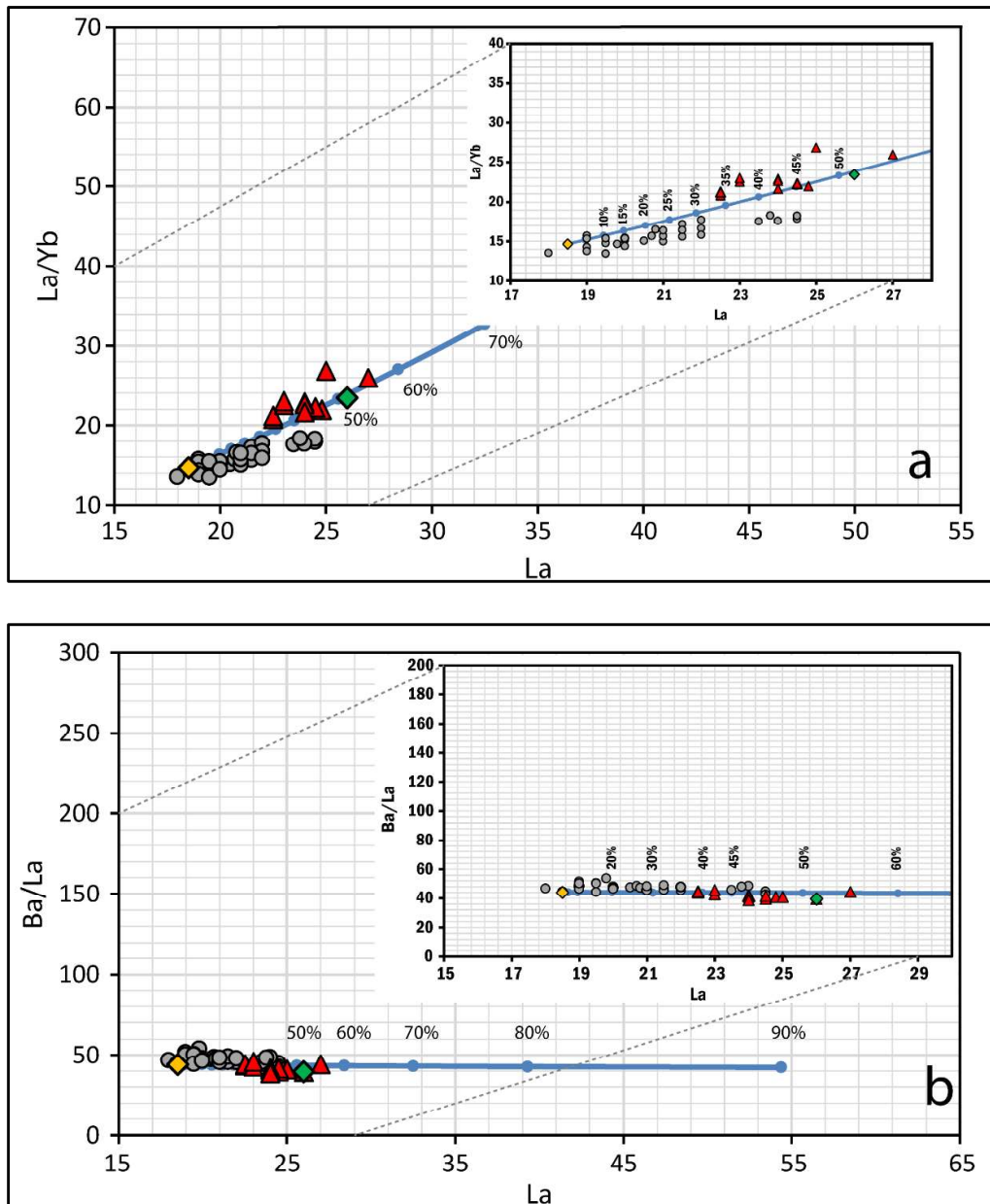


Figura 44. Curvas de cristalización de las relaciones (a) La/Yb (b) Ba/La vs. La , producidas por el proceso de cristalización fraccional.

Unidad *Brechas de Collanes* (círculos grises), *Riolita de Collanes* (triángulos rojos), Co (rombo amarillo), CI (rombo verde). Se indican los grados de cristalización.

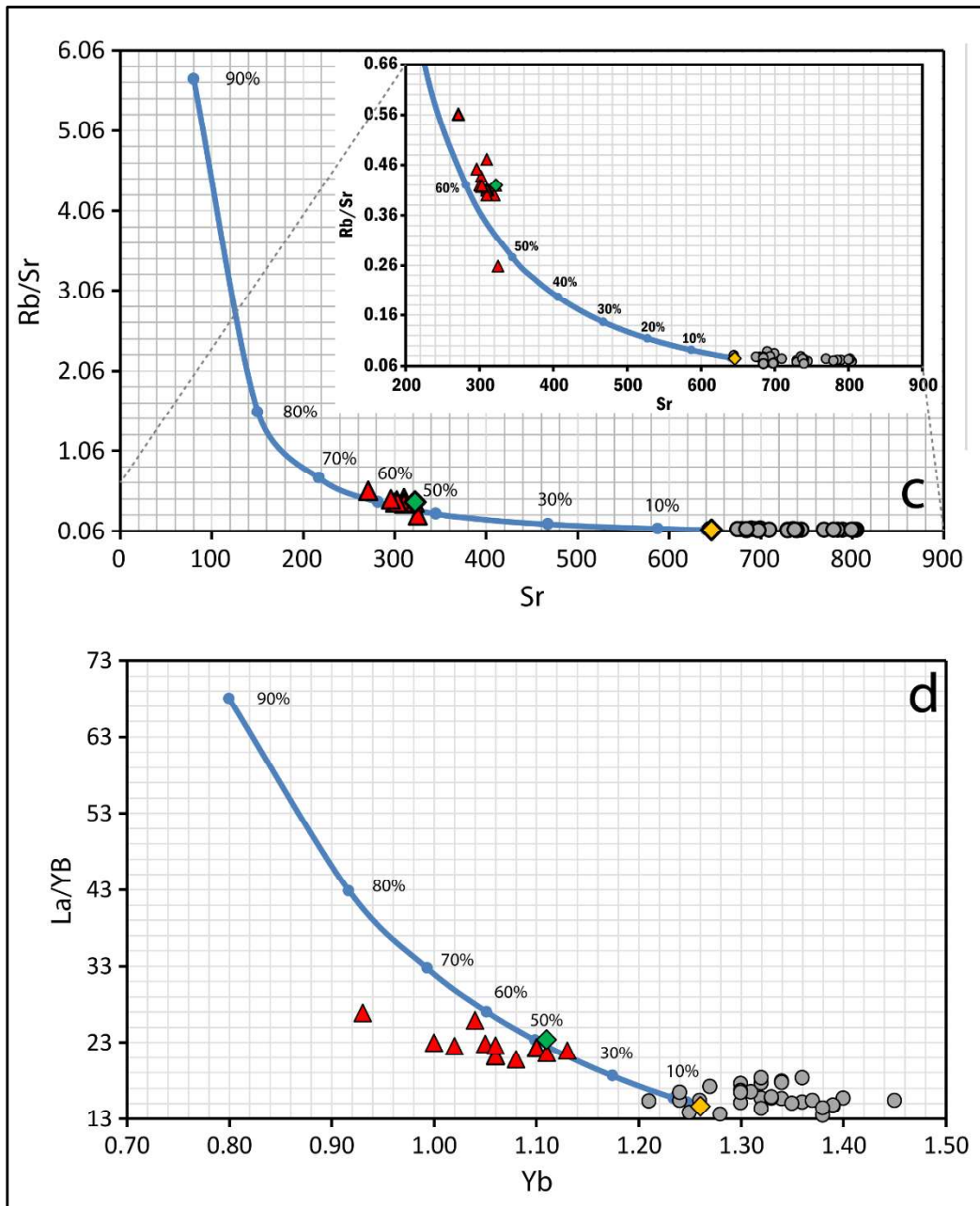


Figura 45. Curvas de cristalización de las relaciones (c) Rb/Sr vs. Sr (d) La/Yb vs. Yb, producidas por el proceso de cristalización fraccional.

Unidad *Brechas de Collanes* (círculos grises), *Riolita de Collanes* (triángulos rojos), Co (rombo amarillo), CI (rombo verde). Se indican los grados de cristalización.

En las Figura 44 y Figura 45 se puede observar el comportamiento que siguen las muestras de Collanes y de las riolitas a través del modelo de cristalización. Estas se ajustan de manera adecuada a la composición del líquido calculado. Este comportamiento se presenta en la mayor

parte de los elementos. Además, se denota que la evolución de las muestras está en el rango de cristalización fraccional encontrado en el modelo, el cual es de 54%.

4.6.1.2 Modelo II

La roca RIO 131A ($\text{SiO}_2 = 58.67 \text{ wt\%}$) representa la composición del magma padre; mientras que la RIO 145 ($\text{SiO}_2 = 74.20 \text{ wt\%}$) representa la composición del magma hijo.

Este modelo plantea un cumulado con la siguiente paragénesis mineral: $\text{plg} + \text{anf} + \text{opx} + \text{cpx} + \text{Ti-mt} \pm \text{apt}$. La composición de estos minerales se la muestra a continuación en la Tabla 12.

Tabla 12. Composiciones de roca padre, hijo y de los minerales que fraccionan utilizados en el modelo II.

	MAGMA PADRE	PARAGENESIS MINERAL						MAGMA HIJO
	RIO 131A	<i>plg</i>	<i>anf</i>	<i>opx</i>	<i>cpx</i>	<i>Ti-mt</i>	<i>apt</i>	RIO 145
SiO₂	58.7	53.4	42.2	53.3	51.0	0.1	0.1	74
TiO₂	0.9	0.1	3.1	0.2	0.6	11.9	0.0	0.2
Al₂O₃	16.7	28.6	11.5	1.6	2.5	2.4	0.0	14.3
FeO	6.3	1.0	12.9	17.1	9.2	75.5	0.8	1.2
MnO	0.1	0.0	0.2	0.6	0.3	0.4	0.2	0.1
MgO	4.7	0.1	13.4	25.0	14.6	1.9	0.3	0.3
CaO	6.6	12.6	11.3	1.4	20.4	0.1	58.8	1.6
Na₂O	3.8	4.5	2.5	0.0	0.4	0.0	0.2	4.2
K₂O	1.9	0.4	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	3.9
P₂O₅	0.3	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	43.8	0.1

A partir de estas composiciones se realizó el siguiente balance de masas, cuyos resultados son mostrados en la Tabla 13:

Tabla 13. Resultados del balance de masas realizado para el modelo II.

ROCA PADRE	ROCA HIJO	PARAGÉNESIS MINERAL						% (1-F)	SEE
RIO 131A	RIO 145	<i>plg</i>	<i>anf</i>	<i>opx</i>	<i>cpx</i>	<i>Ti-mt</i>	<i>apt</i>	61.52	0.23
		44.6 %	30.3 %	15 %	4.8 %	4.4 %	0.8 %		

En el balance de masas se puede evidenciar que el mineral más abundante dentro del cumulado son las plagioclasas. El cumulado se forma a partir de la cristalización de un 61.5 % del magma durante la evolución de este. Este modelo posee un SEE (suma de los cuadrados a causa del error) igual a 0.23 lo cual da veracidad al modelo.

Los coeficientes de distribución que han sido usados se detallan en la Tabla 14:

Tabla 14. Coeficientes de distribución utilizados para el modelo II (Rollinson, 1993; "GERM partition coefficient (Kd) database," n.d.).

Kd	MINERALES					
	cpx	opx	anf	plg	Ti-mt	apt
La	1.11	0.78	0.86	0.38	0.22	14.5
Ce	0.04	0.02	2.13	0.1	0.2	21.1
Nd	3.3	1.25	1.24	0.29	0.3	32.8
Sm	1.67	0.02	2.3	0.17	0.35	64
Eu	0.4	0.83	3	0.82	0.25	25.5
Gd	1.85	0.03	2	0.9	0.32	56.3
Dy	0.8	0.5	3.08	0.09	0.28	34.8
Er	1.8	0.7	2.35	0.38	0.22	37.2
Yb	6.37	0.94	1.89	0.05	0.25	23.9
Rb	0.01	0	0.04	0.03	0.01	16
Ba	0.13	0	0.3	1.52	1.5	2
K	0.04	0.61	0.08	0.26	0.01	0.0
Nb	0.09	0.8	1.3	0.06	1	0.0
Sr	0.52	0.01	1.65	2.84	0.01	0.0
Zr	0.184	0.2	4	0.04	0.2	0.1
Ti	0.01	0.4	7	0.05	9	0.0
Y	3.1	1	2.46	0.13	0.5	40
V	2.5	5.2	4.92	0.38	30	0.0
Cr	2.6	6	15	0.01	3.17	0.0
Co	3	0.5	13	0.01	8	0.0
Ni	6	8	9.3	0.1	10	0.2

Al realizar el modelamiento con estos valores de Kd se ha conseguido los siguientes CI para cada elemento. El Co y los CIs respectivos se muestran en la

Tabla 15:

Tabla 15. Composiciones en elementos traza para las rocas padre (Co) e hijo (CI real) de la cristalización fraccional y composiciones teóricas calculadas (CI calculado).

	Co	CI real	CI calculado
La	19.5	26.0	25.3
Ce	40.0	46.5	45.2
Nd	21.0	18.5	18.6
Sm	4.4	3.1	3.0
Eu	1.1	0.6	0.6
Gd	3.9	2.6	2.3
Dy	3.0	1.9	2.1
Er	1.7	1.2	1.2
Yb	1.5	1.1	1.2
Rb	45.5	135.0	101.9
Ba	860	1025	986.5
K	19000	39100	39441.4
Nb	7.3	10.2	10.8
Sr	698	322.0	326.9
Zr	132.0	128.0	101.3
Ti	8300	1800	1798.7
Y	17.5	12.0	11.4
V	178.0	12.0	11.26
Cr	162.0	2.0	1.80
Co	24.0	2.0	0.84
Ni	68.0	2.0	1.81

Una vez efectuado este modelamiento ha sido posible calcular los valores de la composición del líquido, estos valores son similares a los de la composición del líquido real lo cual es indicativo que el modelo reproduce la composición del magma hijo.

Los valores obtenidos se los ha graficado en un diagrama de tierras raras y en distintos diagramas multielementales, los cuales se muestran en las Figura 46, Figura 47 y Figura 48. El modelo de cristalización de Rayleigh reproduce de una manera apropiada la variación composicional en elementos trazas, a lo largo de la diferenciación magmática desde la unidad Brechas de Collanes hasta la unidad Riolita de Collanes. Los valores de composición calculados se asemejan a los valores reales para todos grupos de elementos químicos, lo cual se corrobora en los diagramas multielementales.

En la Figura 46 se puede observar que las tierras raras ligeras presentan valores muy similares entre el modelo (composición del líquido calculado) y el real (la composición del líquido real); sin embargo, en las tierras raras pesadas se evidencia cierta variación en los valores de Gd y Dy. La diferencia composicional entre el magma padre y magma hijo es de 17 wt% de SiO₂.

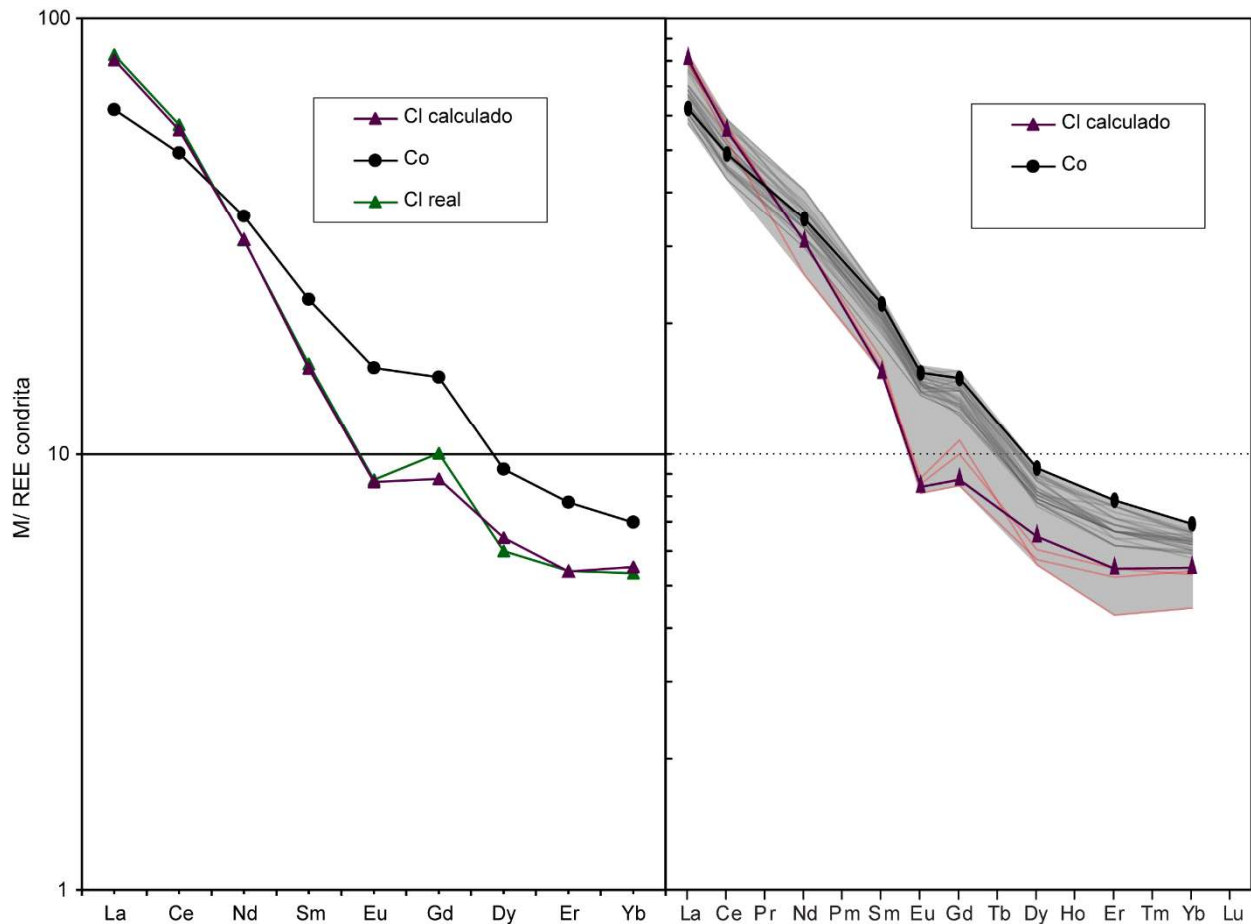


Figura 46. Diagrama de tierras raras normalizado a la composición de la condrita (Sun & McDonough, 1989).

Se muestra las composiciones de las rocas padre, hijo y del modelo [IZQUIERDA]; y las composiciones de roca padre y del modelo, las líneas opacas representan las unidades Brechas de Collanes (negro) y Riolita de Collanes (rojo) [DERECHA]. Co= Composición roca padre; CI= Composición real de la roca hijo; CI calculada= Composición teórica producidas por el modelo.

Como se observa en la Figura 46 las unidades *Brechas de Collanes* y *Riolita de Collanes* se enmarcan casi en su totalidad por el campo producido por la composición de la roca padre (Co), y la composición teórica obtenida mediante el modelo (composición del líquido calculada). En la Figura 46, además se puede observar que la evolución de la unidad *Brechas de Collanes* a la unidad *Riolita de Collanes* se da con un empobrecimiento en las HREE, mientras que la variación en las LREE es menos significativo.

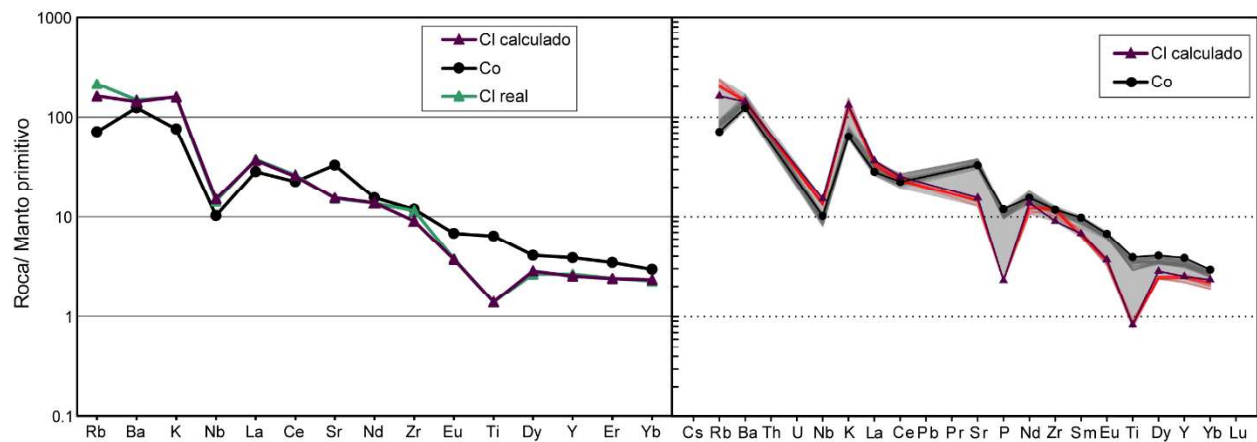


Figura 47. Diagrama multielemental normalizado a la composición del manto primitivo (Sun & McDonough, 1989).

Se muestra las composiciones de las rocas padre, hijo y del modelo [IZQUIERDA]; y las composiciones de roca padre y del modelo, las líneas opacas representan las rocas de Collanes (negro) y Riolitas (rojo) [DERECHA].

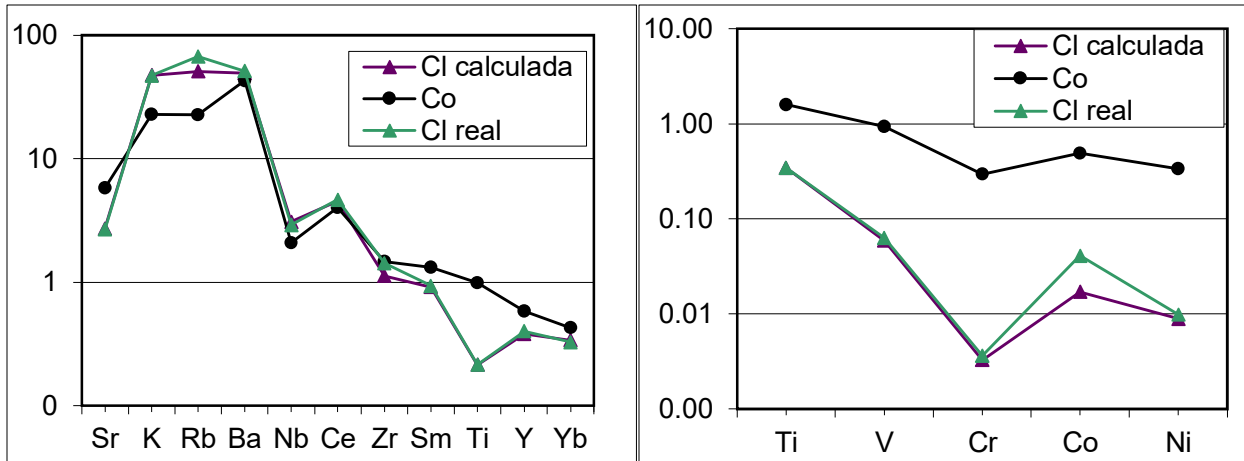


Figura 48. Diagramas multielementales normalizados a la composición del manto primitivo (Sun & McDonough, 1989).

Se muestra las composiciones de las rocas padre, hijo y del modelo.

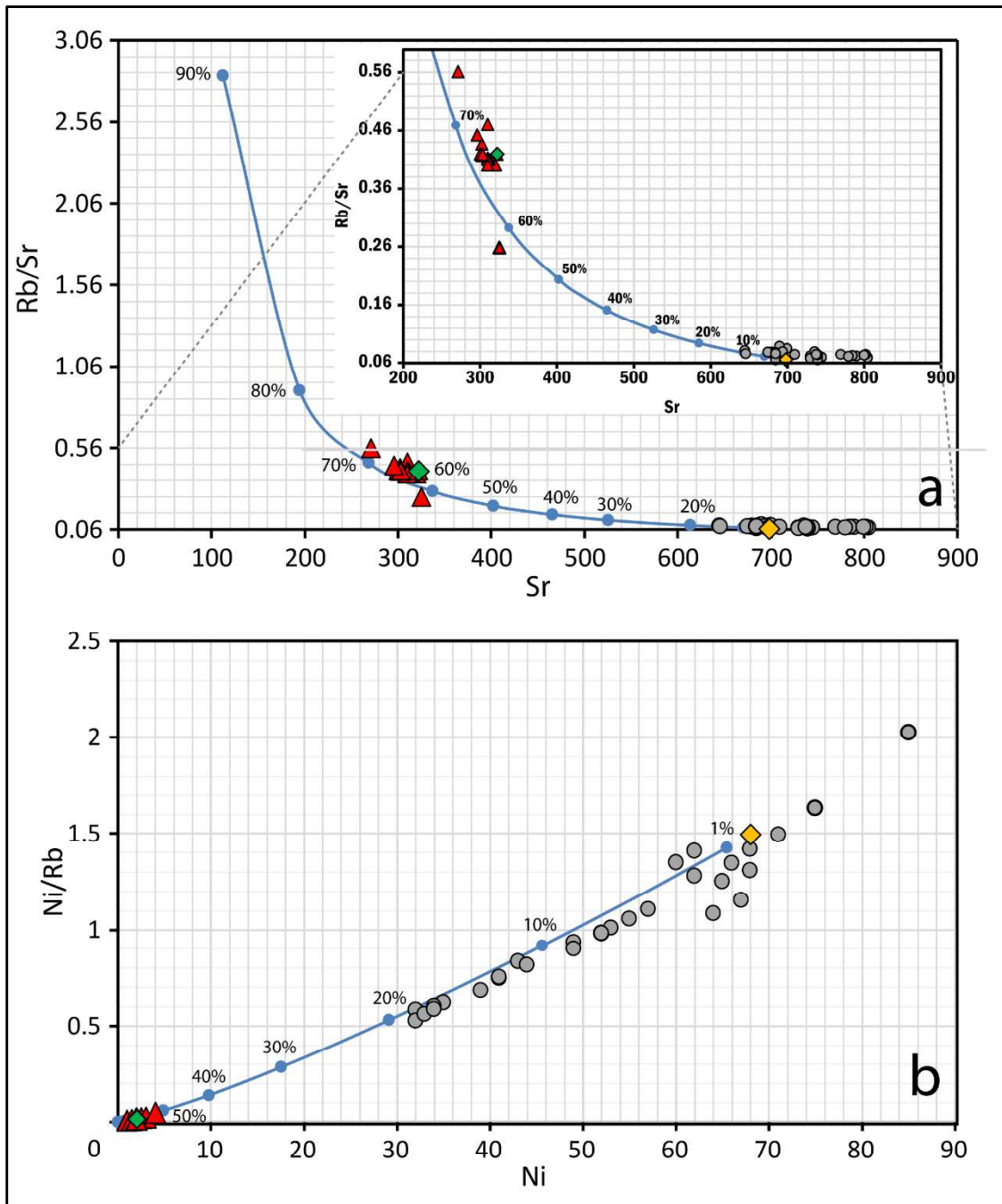


Figura 49. Curvas de cristalización de las relaciones (a) Rb/Sr vs. Sr (b) Ni/Rb vs. Ni, producidas por el proceso de cristalización fraccional.

Unidad *Brechas de Collanes* (círculos grises), *Riolita de Collanes* (triángulos rojos), Co (rombo amarillo), Cl (rombo verde). Se indican los grados de cristalización.

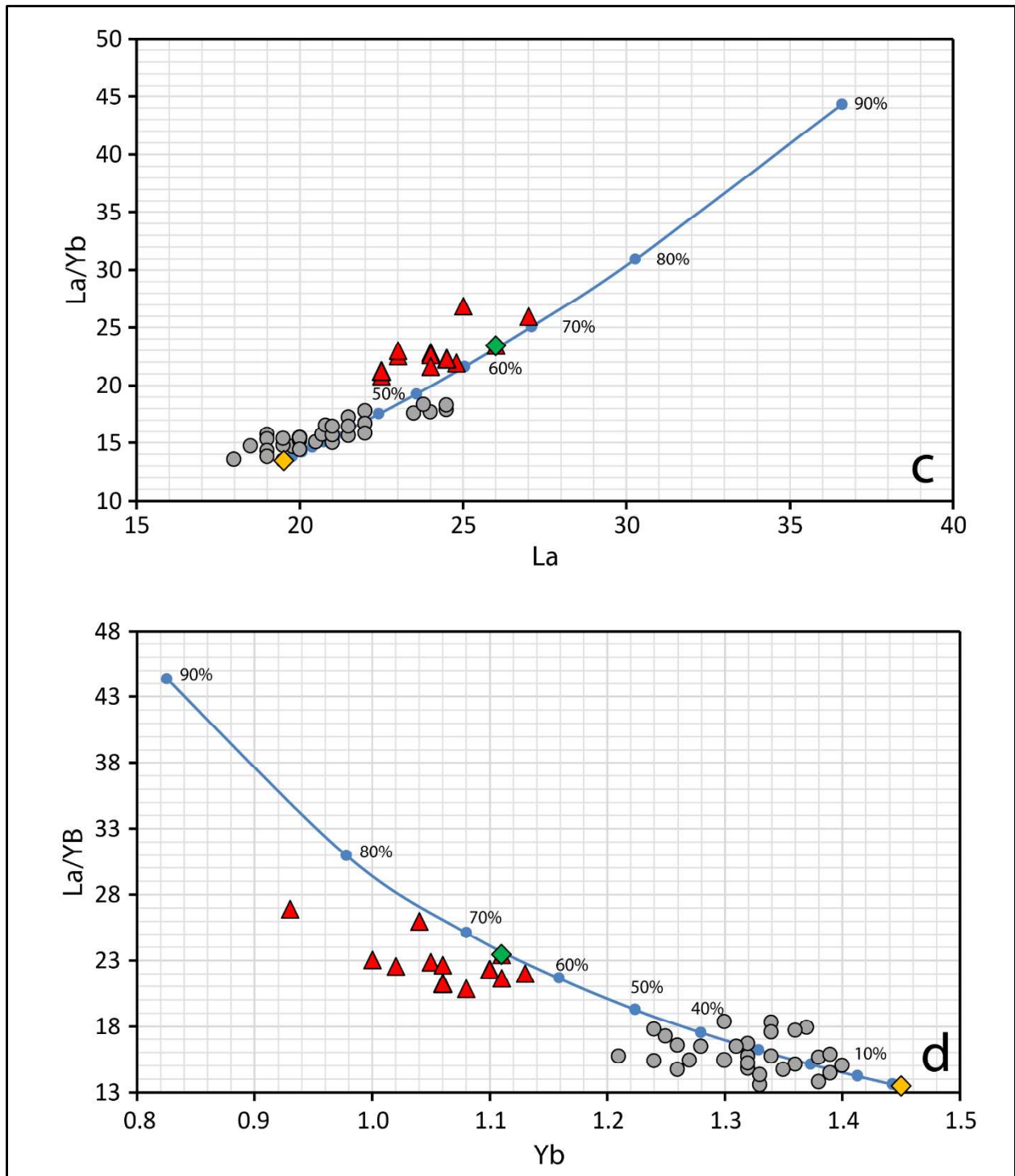


Figura 50. Curvas de cristalización de las relaciones (c) La/Yb vs. La (d) La/Yb vs. Yb, producidas por el proceso de cristalización fraccional.

Unidad *Brechas de Collanes* (círculos grises), *Riolita de Collanes* (triángulos rojos), Co (rombo amarillo), CI (rombo verde). Se indican los grados de cristalización.

4.6.1.3 Modelo III

El tercer modelo se lo realiza en dos etapas:

en una primera etapa, se involucran únicamente a las rocas de la unidad *Brechas de Collanes*. Las rocas escogidas para la respectiva modelización, como magma padre y magma hijo, son las muestras RIO 121B ($\text{SiO}_2 = 57.2 \text{ wt}\%$) y RIO 44E ($\text{SiO}_2 = 62 \text{ wt}\%$), respectivamente. Las fases presentes en la mineralogía de las *Brechas de Collanes* (plg, opx, cpx, Ti-mt y apt), se han seleccionado para componer el cumulado. Las composiciones minerales necesarias para la modelización son los promedios de las composiciones minerales presentes en la unidad. Las distintas composiciones de los elementos involucrados en el proceso de diferenciación (magma padre, magma hijo y minerales), en esta etapa de la modelización, se especifican a continuación en la Tabla 16:

Tabla 16. Composiciones de roca padre, hijo y de los minerales que fraccionan utilizados en el modelo III (Collanes).

	MAGMA PADRE	PARAGENESIS MINERAL					MAGMA HIJO
	RIO 121B	plg	opx	cpx	Ti-mt	apt	RIO 44E
SiO₂	57.2	54.1	53.3	51.0	0.1	0.1	62
TiO₂	0.7	0.0	0.2	0.6	11.9	0.0	0.6
Al₂O₃	15.8	28.3	1.6	2.5	2.5	0.0	16.6
FeO	5.9	0.5	17.1	9.2	75.5	0.8	4.7
MnO	0.3	0.0	0.6	0.3	0.4	0.2	0.1
MgO	4.8	0.1	25.0	14.6	1.9	0.3	2.8
CaO	6.5	10.9	1.4	20.4	0.1	53.8	5
Na₂O	3.5	5.2	0.0	0.4	0.0	0.2	3.9
K₂O	1.9	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	2.3
P₂O₅	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	43.8	0.2

Como resultado del respectivo balance de masas, se obtuvo la composición del cumulado en % mineral, el grado de cristalización y el respectivo valor del SEE. Los resultados de dicho balance de masas son mostrados en la Tabla 17:

Tabla 17. Resultados del balance de masas realizado para el modelo III (Collanes).

ROCA PADRE	ROCA HIJO	PARAGÉNESIS MINERAL					% (1-F)	SEE
RIO 121B	RIO 44E	<i>plg</i>	<i>opx</i>	<i>cpx</i>	<i>Ti-mt</i>	<i>apt</i>	30.52	0.27
		49.2 %	25.9 %	20.4 %	3.9 %	0.5		

Teniendo en cuenta las composiciones de las rocas involucradas en el proceso, los valores escogidos como coeficientes de partición, en el modelo de Rayleigh, corresponden a aquellos

valores experimentales calculados para composiciones andesíticas. Para el apatito se usó coeficientes para magmas dacíticos. Estos valores se especifican en la Tabla 18.

Tabla 18. Coeficientes de distribución utilizados para el modelo III (Collanes) (Rollinson, 1993; "GERM partition coefficient (Kd) database," n.d.).

KD	<i>MINERALES</i>				
	<i>plg</i>	<i>opx</i>	<i>cpx</i>	<i>ti-mt</i>	<i>apt</i>
La	0.30	0.03	0.05	0.22	25
Ce	0.22	0.05	0.51	0.2	16.6
Nd	0.15	0.05	0.65	0.3	21
Sm	0.12	0.1	0.95	0.35	20,7
Eu	1.21	0.12	0.8	0.25	15
Gd	0.07	0.13	1.35	0.32	64
Dy	0.29	0.21	1.46	0.28	58
Er	0.05	0.31	1.3	0.22	80
Yb	0.05	0.46	1.3	0.25	37
Rb	0.07	0.02	0.02	0.01	16
Ba	0.50	0.01	0.04	0.01	2
K	0.12	0.01	0.02	0.01	0.0
Nb	0.03	0.35	0.3	1	0.0
Sr	1.6	0.03	0.08	0.01	0.0
Zr	0.01	0.1	0.27	0.2	0.01
Ti	0.05	0.25	0.4	9	0.0
Y	0.06	0.45	1.5	0.5	0.0
V	0.01	1.1	3	30	0.0
Cr	0.01	4	4	32	0.0
Co	0.01	6	1.77	8	0.0
Ni	0.01	3	5.5	10	0.2

Los resultados de la modelización de los elementos trazas (Tabla 19) se expresan en diagramas de REE, así como en los distintos diagramas multielementales (Figura 51, Figura 52 y Figura 53).

Tabla 19. Composiciones en elementos traza para las rocas padre (Co) e hijo (CI real) de la cristalización fraccional y composiciones teóricas calculadas (CI calculado).

	Co	CI real	CI calculada
La	18,5	24,5	22,6
Ce	35	46	44,9
Nd	18	24,5	22,8
Sm	3,5	4,5	4,1
Eu	1,0	1,1	1,1
Gd	3,3	3,5	3,9
Dy	2,6	2,7	2,9
Er	1,4	1,4	1,4
Yb	1,3	1,3	1,3
Rb	48,5	55	64,8
Ba	815	1040	1039,2
K	18800	22800	23941,2
Nb	6,1	7,0	6,6
Sr	646	805	758,6
Zr	104	132	128,7
Ti	7300	6200	6238,3
Y	14,8	15	14,9
V	158	115	121,6
Cr	156	82	79,5
Co	20	14	15,3
Ni	62	32	30,7

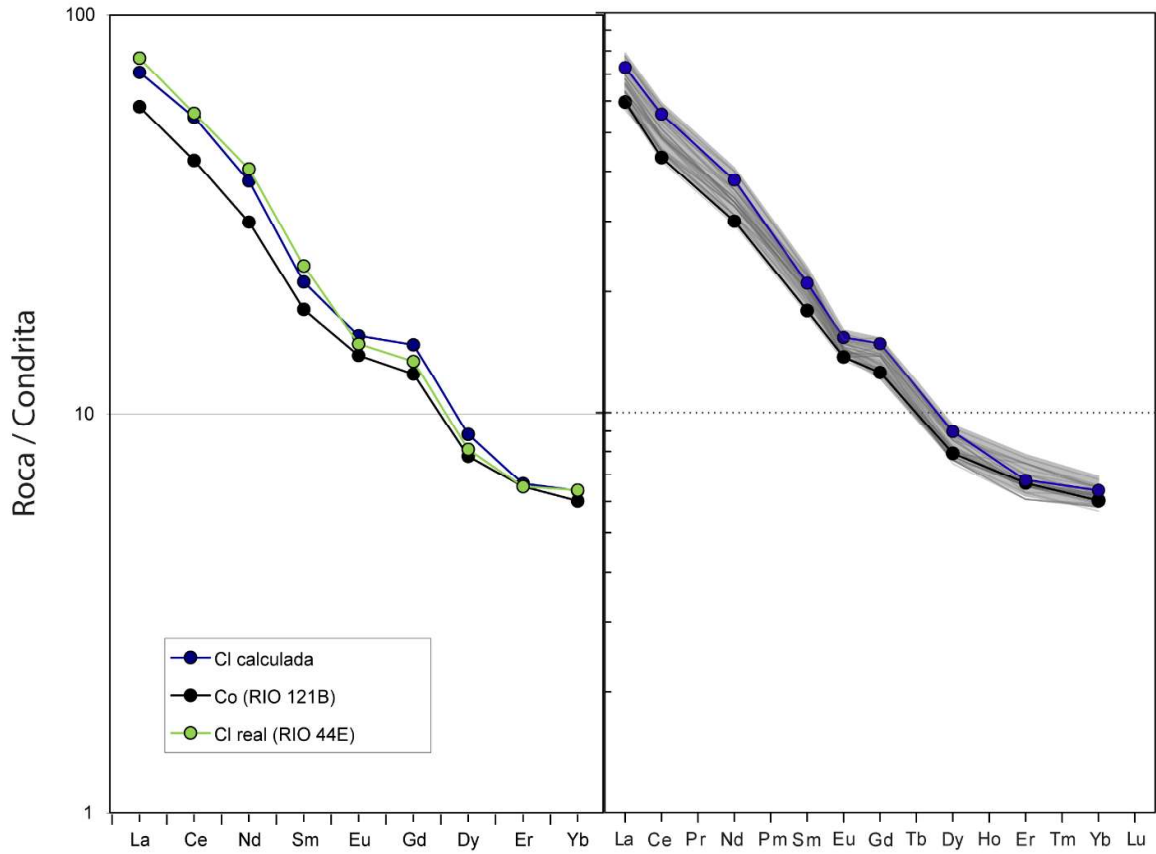


Figura 51. Diagrama de REE normalizado a la composición de la condrita (Sun & McDonough, 1989).

Se muestra las composiciones de las rocas padre, hijo y del modelo [IZQUIERDA]; y las composiciones de roca padre y del modelo, las líneas opacas representan las rocas de Brechas de Collanes (negro) [DERECHA]. Co= Composición roca padre; CI= Composición real de la roca hijo; CI calculada= Composición teórica producidas por el modelo.

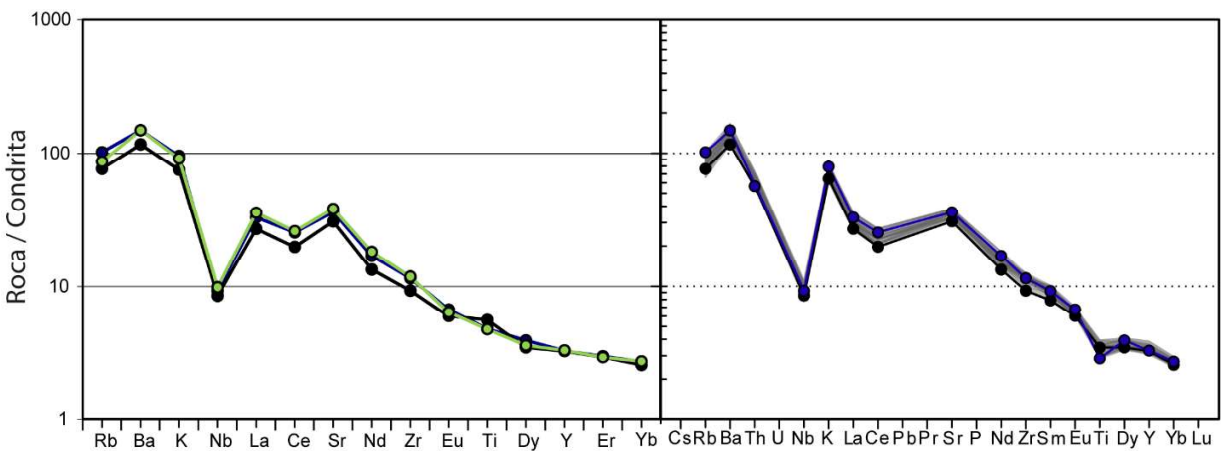


Figura 52. Diagrama multielemental normalizado a la composición del manto primitivo (Sun & McDonough, 1989).

Se muestra las composiciones de las rocas padre, hijo y del modelo [IZQUIERDA]; y las composiciones de roca padre y del modelo, las líneas opacas representan las rocas de Brechas de Collanes (negro) [DERECHA].

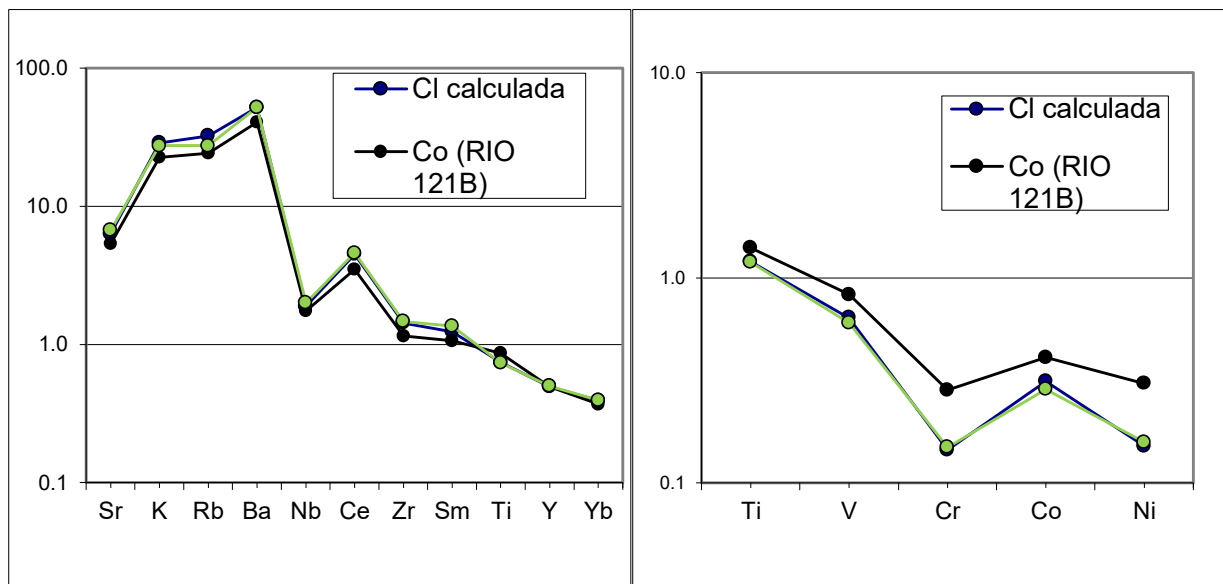
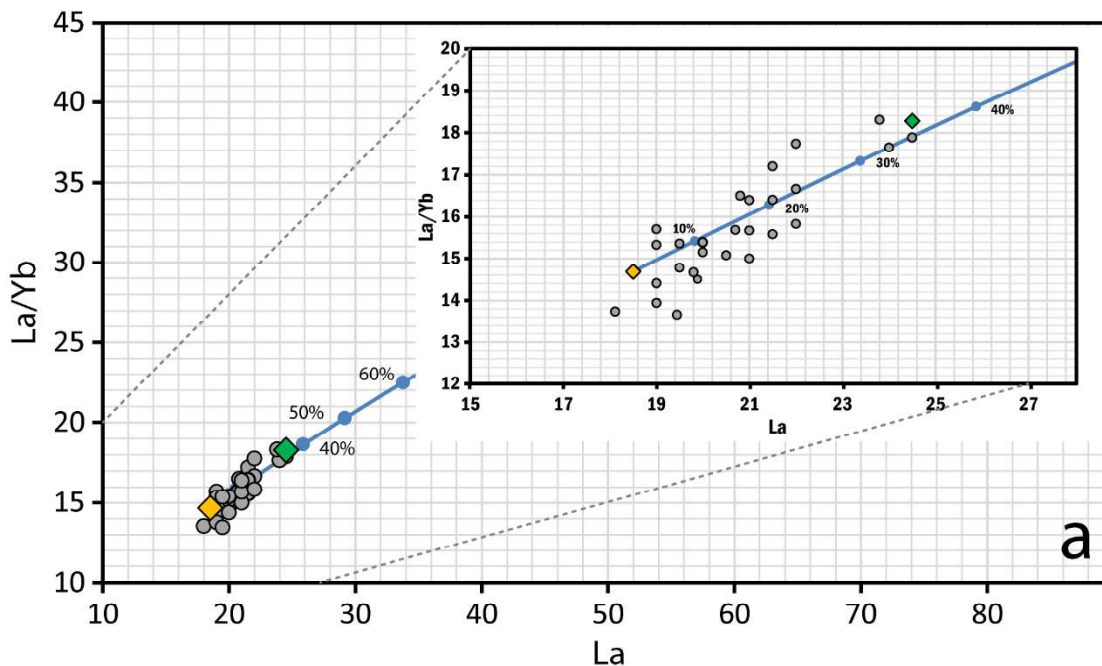
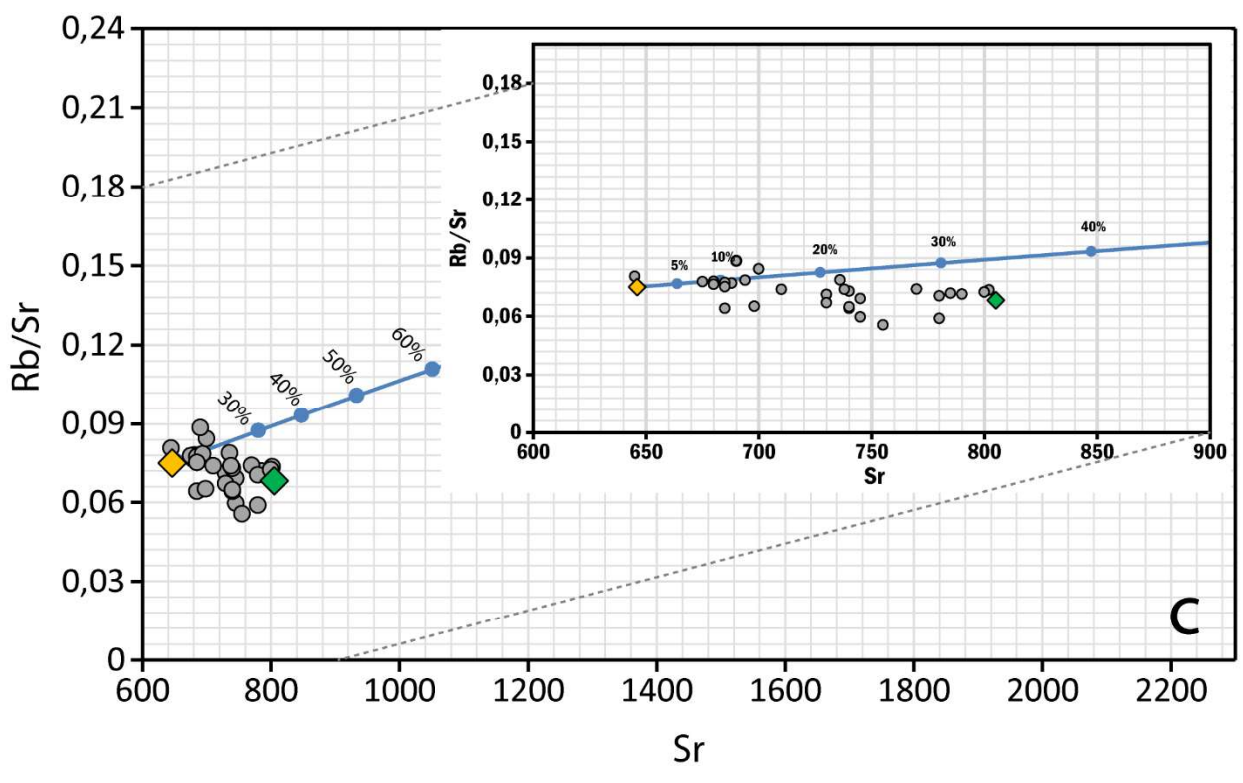
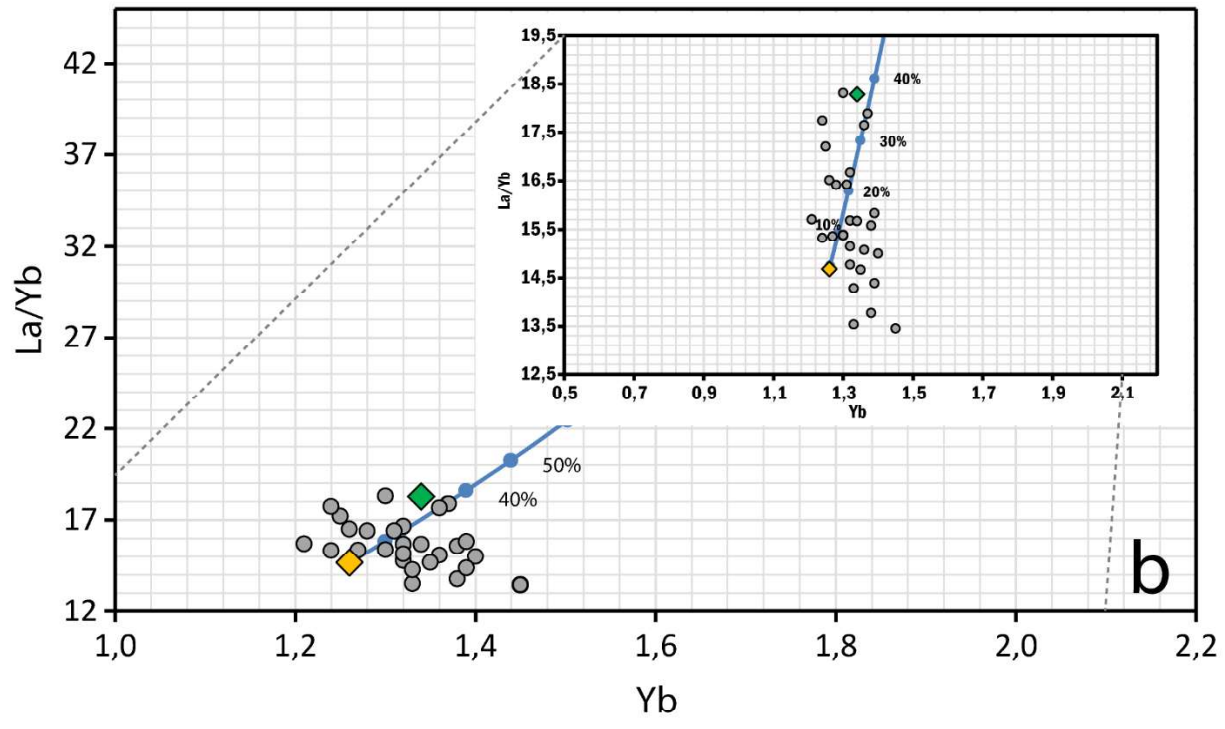


Figura 53. Diagramas multielementales normalizados a la composición del manto primitivo (Sun & McDonough, 1989).

Se muestra las composiciones de las rocas padre, hijo y del modelo.





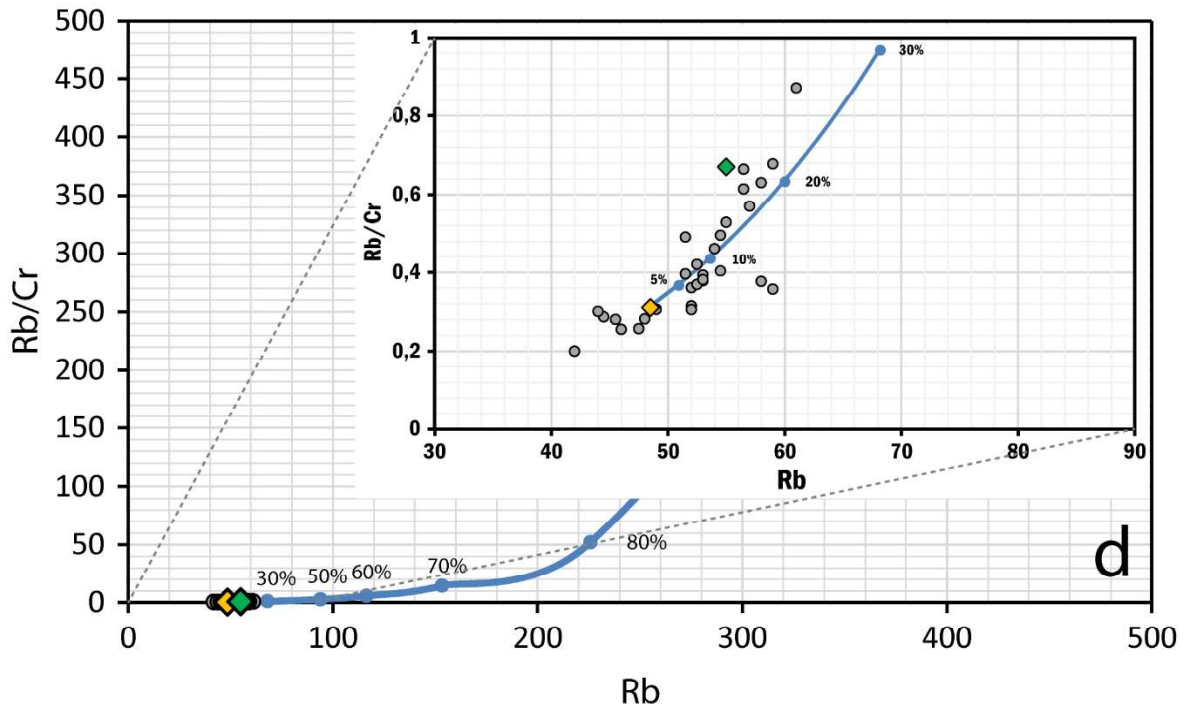


Figura 54. Curvas de cristalización de las relaciones (a) La/Yb vs. La (b) La/Yb vs. Yb (c) Rb/Sr vs. Sr (d) Rb/Cr vs. Rb, producidas por el proceso de cristalización fraccional.

Unidad *Brechas de Collanes* (círculos grises), Co (rombo amarillo), CI (rombo verde). Se indican los grados de cristalización.

El modelo de cristalización de Rayleigh reproduce de una manera apropiada la variación composicional en elementos trazas, a lo largo de la diferenciación magmática para las rocas de la unidad *Brecha de Collanes*. Los valores de composición calculados se asemejan bastante a los valores reales para todos grupos de elementos químicos. Además, se puede apreciar que las composiciones de las rocas de la unidad *Brechas de Collanes*, tanto en el gráfico de REE como en el multielemental, caen entre los dos miembros finales, el magma padre y el líquido resultante calculado.

La diferencia composicional entre el magma padre y magma hijo es relativamente pequeña (~ 5 SiO₂ wt%).

Las muestras de la unidad *Brechas de Collanes* se ajustan al modelo de cristalización. Esto se puede apreciar en los distintos diagramas que reproducen la evolución de varios elementos trazas (La, Yb, Rb, Cr, Sr). De este modo, el modelo llega a explicar la evolución química de las rocas en las REE.

En una segunda etapa del modelo III, se tiene un proceso de diferenciación que empieza desde el magma caracterizado como uno de los más ácidos de la unidad *Brechas de Collanes* (RIO 44G; SiO₂ = 62.5 wt%), hasta la unidad *Riolita de Collanes* (RIO 145; SiO₂ = 74 wt%).

La composición mineral del cumulado a fraccionar consta de *plg* + *opx* + *anf* + *cpx* + *ti-mt*. La composición de anfíbol en el cumulado corresponde a un promedio de aquellos pertenecientes a la unidad *Riolita de Collanes*.

Las composiciones del respectivo magma padre, magma hijo y de los distintos minerales para esta parte de la modelización se especifican a continuación (Tabla 20).

Tabla 20. Composiciones de roca padre, hijo y de los minerales que fraccionan utilizados en el modelo III (Collanes - Riolitas).

	MAGMA PADRE	PARAGENESIS MINERAL						MAGMA HIJO
	RIO 44G	plg1	opx	anf	plg2	Ti-mt	cpx	RIO 145
SiO ₂	62.5	54.1	53.3	42.3	57.7	0.1	51.0	74
TiO ₂	0.6	0.0	0.2	3.1	0.1	11.9	0.6	0.2
Al ₂ O ₃	16.4	28.3	1.6	11.5	26.1	2.5	2.5	14.3
FeO	4.7	0.4	17.1	12.9	0.3	75.5	9.2	1.2
MnO	0.1	0	0.6	0.2	0.0	0.4	0.3	0.1
MgO	2.9	0.1	25.0	13.5	0.0	1.9	14.6	0.3
CaO	5.0	10.9	1.4	11.3	8.4	0.1	20.4	1.6
Na ₂ O	3.9	5.2	0.0	2.5	6.7	0.0	0.4	4.2
K ₂ O	2.3	0.3	0.0	0.7	0.4	0.0	0.0	3.9
P ₂ O ₅	0.2	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1

Como resultado del balance de masas con los elementos especificados anteriormente, tenemos un grado de cristalización de 44.33 %, y la composición mineral del cumulado, especificada en la Tabla 21, junto con el correspondiente valor de SEE.

Tabla 21. Resultados del balance de masas realizado para el modelo III (Collanes - Riolitas).

ROCA PADRE	ROCA HIJO	PARAGÉNESIS MINERAL						% (1-F)	SEE
RIO 121B	RIO 145	plg1	plg2	anf	opx	cpx	Ti-mt	44.36	0.088
		52.9 %	9.4 %	10.7 %	14.2 %	6.2 %	6.6 %		

Se escogen coeficientes de distribución para composiciones dacíticas y riolíticas. Esto, debido a que el proceso de diferenciación en esta etapa comprende rocas con composiciones ácidas. Los distintos coeficientes de distribución utilizados se especifican a continuación (Tabla 22).

Tabla 22. Coeficientes de distribución utilizados para el modelo III (Collanes - Riolitas) (Rollinson, 1993; "GERM partition coefficient (Kd) database," n.d.).

KD	MINERALES				
	<i>Cpx</i>	<i>Opx</i>	<i>Amp</i>	<i>Plg</i>	<i>ti-mt</i>
La	1,1	0,78	1,92	0,5	0,22
Ce	1,83	0,93	4,23	0,34	0,26
Nd	1,2	1,25	8,7	0,21	0,3
Sm	8,3	1,6	4	0,23	4,5
Eu	1,56	0,83	3	2,11	0,44
Gd	0,70	0,03	7	0,9	0,28
Dy	0,78	0,04	13	0,06	0,28
Er	0,7	0,07	12	0,03	0,22
Yb	4,55	0,94	8,38	0,05	0,18
Rb	0,03	0,00	0,01	0,01	0,18
Ba	0,13	0,00	0,3	1,5	0,00
K	0,00	0,00	0,08	0,1	0,96
Nb	0,3	0,8	2,5	0,06	0,00
Sr	0,1	0,01	0,02	4	0,00
Zr	0,6	0,2	4	0,6	0,00
Ti	0,7	0,4	7	0,05	12,5
Y	0,35	0,1	11,3	0,21	0,00
V	1,1	5	32	0,38	8,7
Cr	6	13	32	0,01	30
Co	0,3	0,51	37	0,03	0,00
Ni	8	8	10	1,5	10

Los distintos diagramas multielementales (Figura 55 y Figura 56) expresan los resultados de la modelización con los elementos traza (Tabla 23).

Tabla 23. Composiciones en elementos traza para las rocas padre (Co) e hijo (Ci real) de la cristalización fraccional y composiciones teóricas calculadas (Ci calculado).

	Co	Ci real	Ci calculado
La	23,5	26,0	27,8
Ce	44,5	46,5	46,4
Nd	23,0	18,5	18,9
Sm	4,4	3,1	3,0
Eu	1,1	0,6	0,6
Gd	3,2	2,6	2,6
Dy	2,6	1,9	1,9
Er	1,4	1,2	1,1
Yb	1,3	1,1	1,1
Rb	56,5	135,0	100,3
Ba	1070	1025	1085,5
K	22800,0	39100,0	37875,6
Nb	7,5	10,2	10,5
Sr	785,0	322,0	325,3
Zr	132,0	128,0	142,7
Ti	6300,0	1800,0	4181,2
Y	14,8	12,0	11,9
V	115,0	12,0	10,9
Cr	85,0	2,0	1,8
Co	14,0	2,0	2,3
Ni	34,0	2,0	4,9

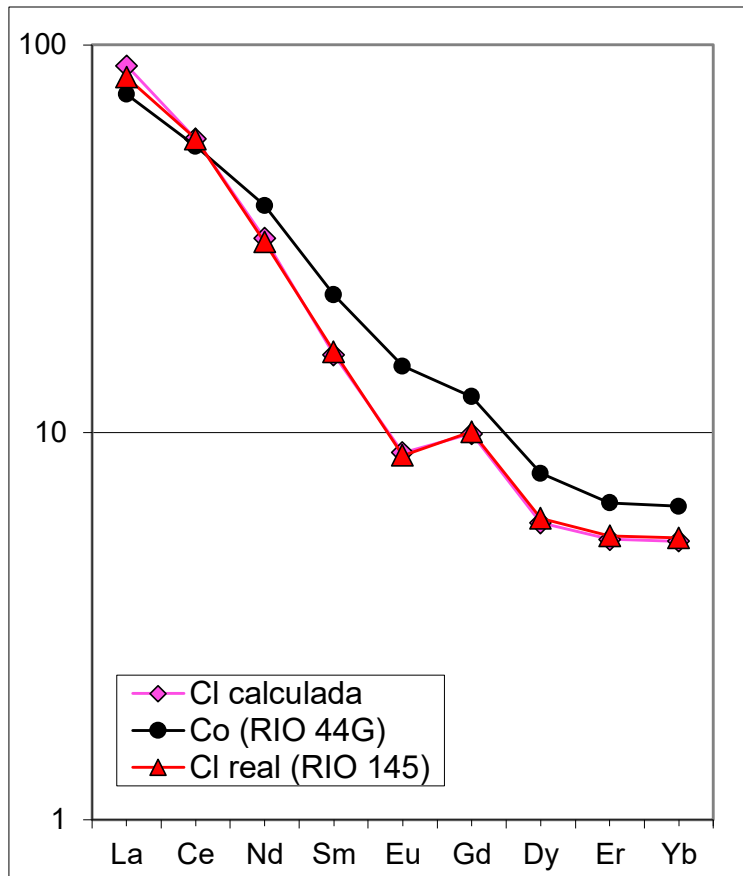
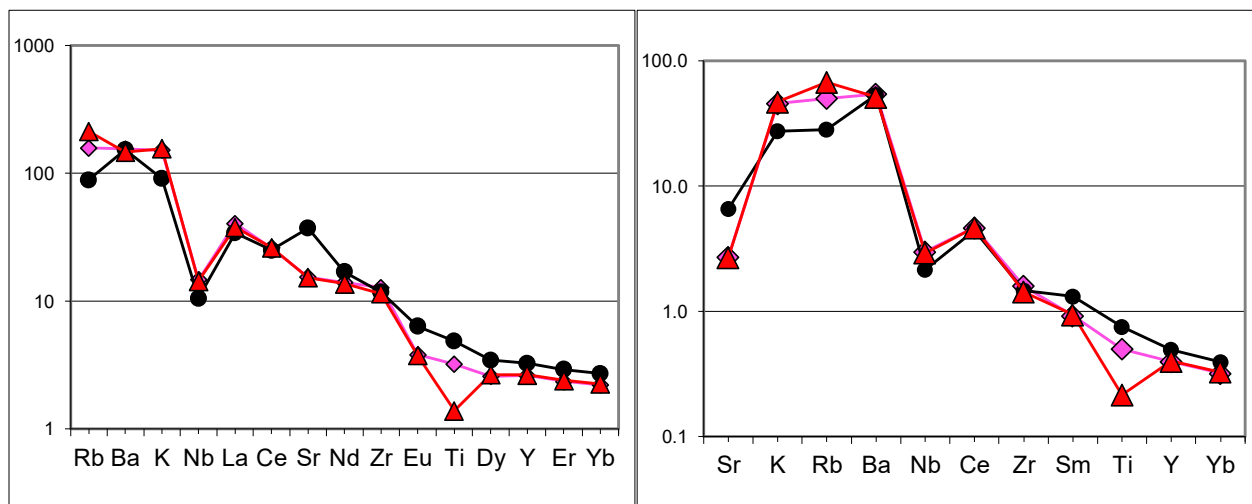


Figura 55. Diagrama de REE normalizado a la composición de la condrita (Sun & McDonough, 1989).

Se muestra las composiciones de las rocas padre, hijo y del modelo. Co= Composición roca padre; CI= Composición real de la roca hijo; CI calculada= Composición teórica producidas por el modelo.



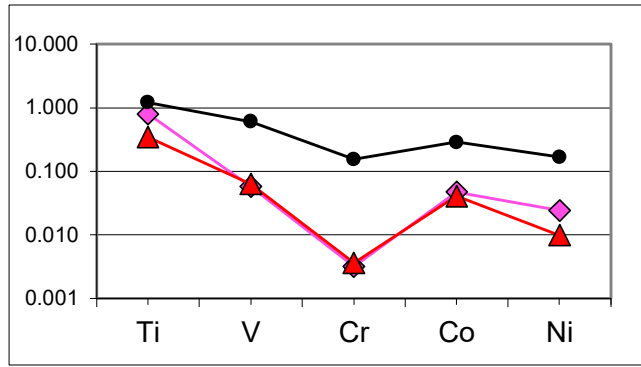


Figura 56. Diagramas multielementales normalizados a la composición del manto primitivo (Sun & McDonough, 1989). Se muestran las composiciones de las rocas padre, hijo y del modelo.

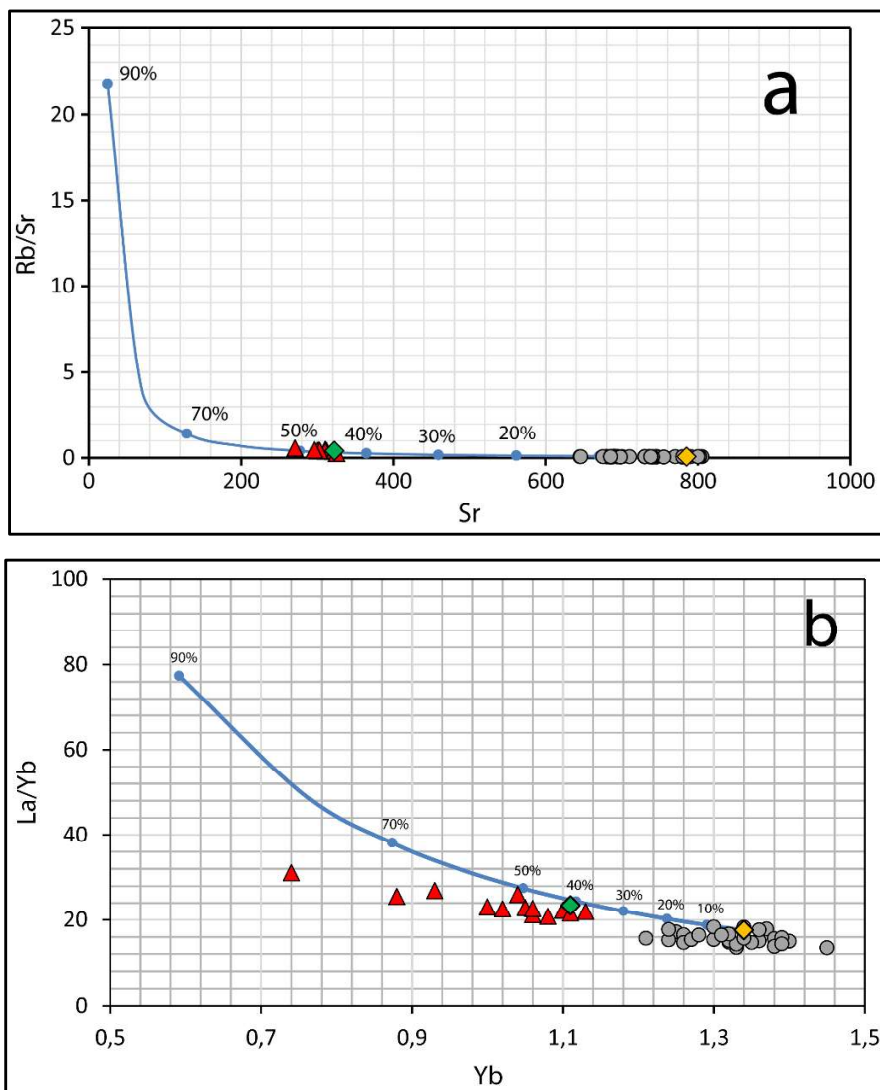


Figura 57. Curvas de cristalización de las relaciones (a) Rb/Sr vs. Sr (b) La/Yb vs. Yb, producidas por el proceso de cristalización fraccional.

Unidad Brechas de Collanes (círculos grises), Co (rombo amarillo), Cl (rombo verde). Se indican los grados de cristalización

De manera general, se observa un buen ajuste entre los resultados de composición teóricos y las composiciones reales para el magma hijo, en todos los grupos de elementos químicos (REE, LILEs, HFS y metales de transición). No obstante, es notable la diferencia entre el valor de Ti calculado y el valor de Ti real.

En el diagrama de REE se puede apreciar la anomalía negativa de Eu, misma que refleja la sustitución de Eu^{2+} por Ca en las plagioclasas. Esta anomalía tiene como causa, bien la adición de plagioclasas con Eu^{2+} , o la remoción de la misma, en el caso de que esta anomalía se positiva o sea negativa, respectivamente (Winter, 2014). Por ende, existe el fraccionamiento de plagioclasas en base al patrón de REE observado en la figura 55. Esto es ratificado por el cumulado, resultado del balance de masas, en el cual hay un gran porcentaje de esta fase presente (~ 60 wt%).

Los diagramas, en los cuales se representan las distintas curvas de cristalización del modelo resultante, muestran que este último reproduce de una manera aceptable la evolución a lo largo de la diferenciación de las rocas, hasta llegar a la composición riolítica de las rocas más ácidas. El comportamiento de las rocas de la unidad *Riolita de Collanes*, no obedece el modelo en la mayoría de muestras. Esto es aún más evidente en los diagramas graficados contra elementos incompatibles, para los cuales, como ya se mencionó, existía un cambio en composición sin alguna variación en el contenido de sílice.

4.6.2 Modelización Brechas del Altar

4.6.2.1 Modelo I: Este modelo consiste en un proceso de cristalización fraccional únicamente en la unidad *Brechas del Altar*, el cual se da produciendo un cumulado de: plg + opx + cpx + Ti-mt.

Se selecciona una roca básica, en este caso la RIO 38 ($\text{SiO}_2 = 56.98 \text{ wt}\%$) como magma parental y otra roca ácida, la RIO 34 ($\text{SiO}_2 = 62.77 \text{ wt}\%$) como magma hijo.

El cumulado de este modelo está conformado por: plg + opx + cpx + Ti-mt. Las composiciones usadas para el balance de masas, tanto de las rocas padre e hijo, así como de los minerales se muestran en la Tabla 24.

Tabla 24. Composiciones de roca padre, hijo y de los minerales que fraccionan utilizados en el modelo.

	MAGMA PADRE	PARAGENESIS MINERAL				MAGMA HIJO
	RIO 38	plg	opx	cpx	Ti-mt	RIO 34
SiO₂	56.9	53.0	52.8	51.5	0.2	62.8
TiO₂	0.9	0.1	0.3	0.6	12.9	0.7
Al₂O₃	17.7	28.4	2.1	2.5	2.7	17.4
FeO	7.3	1.0	18.6	9.3	81.6	5.0
MnO	0.1	0.0	0.4	0.3	0.5	0.1
MgO	3.9	0.1	23.9	14.8	2.1	1.5
CaO	7.2	12.5	1.6	20.6	0.1	4.1
Na₂O	3.8	4.5	0.1	0.4	0.0	4.9
K₂O	1.8	0.4	0.0	0.0	0.0	3.1
P₂O₅	0.3	0.0	0.13	0.0	0.0	0.4

En la Tabla 25 se muestran los resultados del balance de masas realizado para este modelo. Este se lo efectúa con las composiciones detalladas anteriormente (Tabla 24).

Tabla 25. Resultados del balance de masas realizado para el modelo.

ROCA PADRE	ROCA HIJO	PARAGÉNESIS MINERAL				% (1-F)	SEE
		Plg	Opx	Cpx	Ti-mt		
RIO 38	RIO 34	55.7 %	18.6 %	17.6 %	8.2 %	41.77	0.029

Mediante este balance de masas se puede observar que el mineral más abundante dentro del cumulado son las plagioclasas. Los coeficientes de distribución utilizados corresponden a aquellos para líquidos andesíticos (Rollinson, 1993; "GERM partition coefficient (Kd) database," n.d.). Estos coeficientes son presentados en la Tabla 26.

Tabla 26. Coeficientes de distribución utilizados para el modelo.

Kd	MINERALES			
	Plg	Opx	Cpx	Ti-mt
La	0.23	0.03	0.05	3
Ce	0.14	0.03	0.51	3
Nd	0.24	0.47	0.86	3
Sm	0.12	0.46	1.6	2.2
Eu	1.21	0.16	0.8	0.25
Gd	0.21	0.88	1.35	0.32
Dy	0.3	0.98	1.9	0.58

Er	0.06	0.93	1.33	0.22
Yb	0.1	0.89	1.3	0.25
Rb	0.04	0.01	0.00	0.01
Ba	0.56	0.01	0.00	0.01
K	0.08	0.01	0.01	0.01
Nb	0.03	0.35	2.1	1
Sr	2.8	0.01	0.00	0.01
Zr	0.15	0.13	0.41	0.38
Ti	0.2	0.25	1.09	9
Y	0.28	0.5	2.48	0.5
V	0.01	1.1	1.1	30
Cr	0.01	4	30	32
Co	0.01	6	3	8
Ni	1.16	8	10	29

Los valores de la composición del líquido calculados se ajustan a los valores de la composición del líquido reales para cada elemento. En la Tabla 27 se adjunta los valores obtenidos en el modelamiento.

Tabla 27. Composiciones en elementos traza para las rocas padre (Co) e hijo (CI real) de la cristalización fraccional y composiciones teóricas calculadas (CI calculado).

	Co	CI real	CI calculado
La	19	26.5	26.48
Ce	36.5	50	50.06
Nd	21	25	25.83
Sm	4.15	4.85	5.12
Eu	1.16	1.24	1.25
Gd	3.6	4.15	4.60
Dy	2.85	3.15	3.30
Er	1.5	1.8	2.01
Yb	1.35	1.79	1.80
Rb	44	78	74.57
Ba	855	1280	1238.38
K	18200	30500	30389.46

Nb	6.5	8.6	8.38
Sr	780	630	575.57
Zr	125	182	191.53
Ti	9100	6400	8688.05
Y	16.1	18.8	18.66
V	200	70	73.26
Cr	100	2	1.60
Co	28	10	13.86
Ni	64	2	3.72

Una vez obtenidas las concentraciones, estas han sido ploteadas en un diagrama de tierras raras. Las concentraciones obtenidas han sido normalizadas a la composición de la condrita según Sun & McDonough, (1989), y ploteadas junto con las concentraciones del magma padre y las concentraciones del magma hijo real.

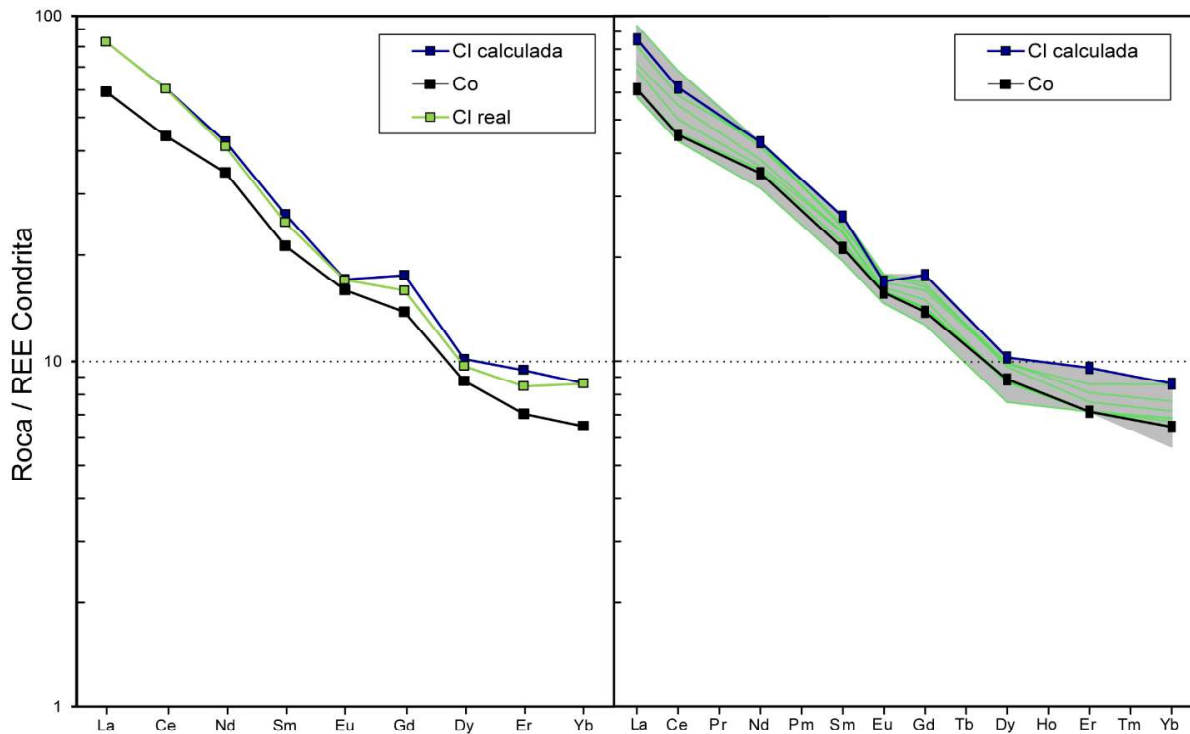


Figura 58. Diagrama de REE normalizado a composición de la condrita (Sun & McDonough, 1989).

Se muestra las composiciones de las rocas padre, hijo y del modelo [IZQUIERDA]; y las composiciones de roca padre y del modelo, las líneas opacas (verde) representan las rocas de la unidad Brechas del Altar [DERECHA]. Co= Composición roca padre; CI= Composición real de la roca hijo; CI calculada= Composición teórica producidas por el modelo.

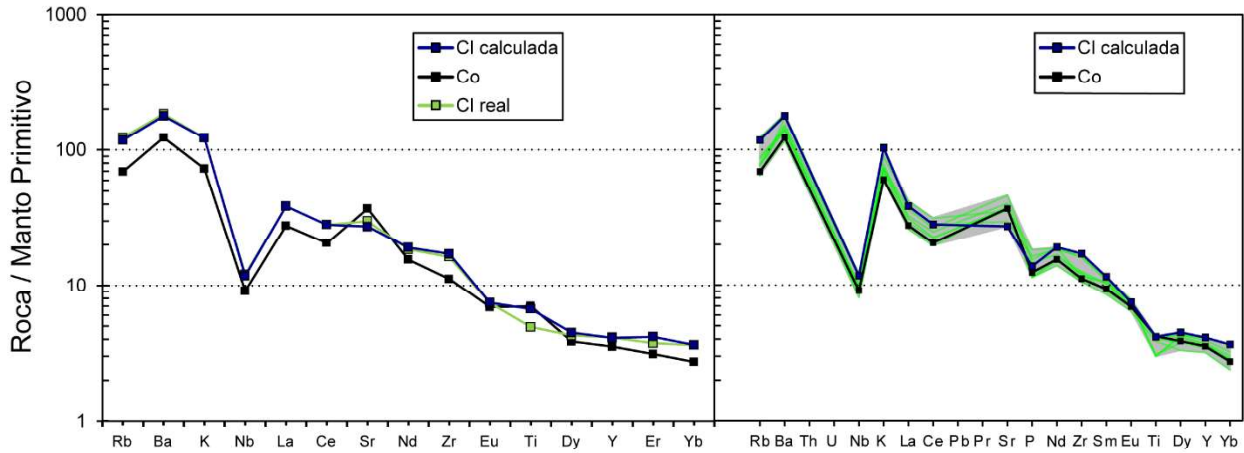


Figura 59. Diagrama multielemental normalizado a la composición del manto primitivo (Sun & McDonough, 1989).

Se muestra las composiciones de las rocas padre, hijo y del modelo [IZQUIERDA]; y las composiciones de roca padre y del modelo, las líneas opacas (verde) representan las rocas de la unidad Brechas del Altar [DERECHA].

En la Figura 58 se observa un buen ajuste entre el modelo y los valores reales de CI. Se observa que el contenido de las HREE se enriquece respecto al magma padre, lo cual indica el no fraccionamiento de minerales afines a estos elementos, como anfíbol y apatito. De igual manera se observa la anomalía negativa de Eu, misma que ratifica un fraccionamiento de plagioclasas. Esto se corrobora con el porcentaje de plagioclasas dentro del cumulado (56%).

En el diagrama spider o multi elemental se observa un buen ajuste entre CI calculado y el CI real. Así, en la Figura 59 se observa que las rocas de la unidad *Brechas del Altar* (líneas color verde) se acomodan en el campo formado por el CI calculado y el Co.

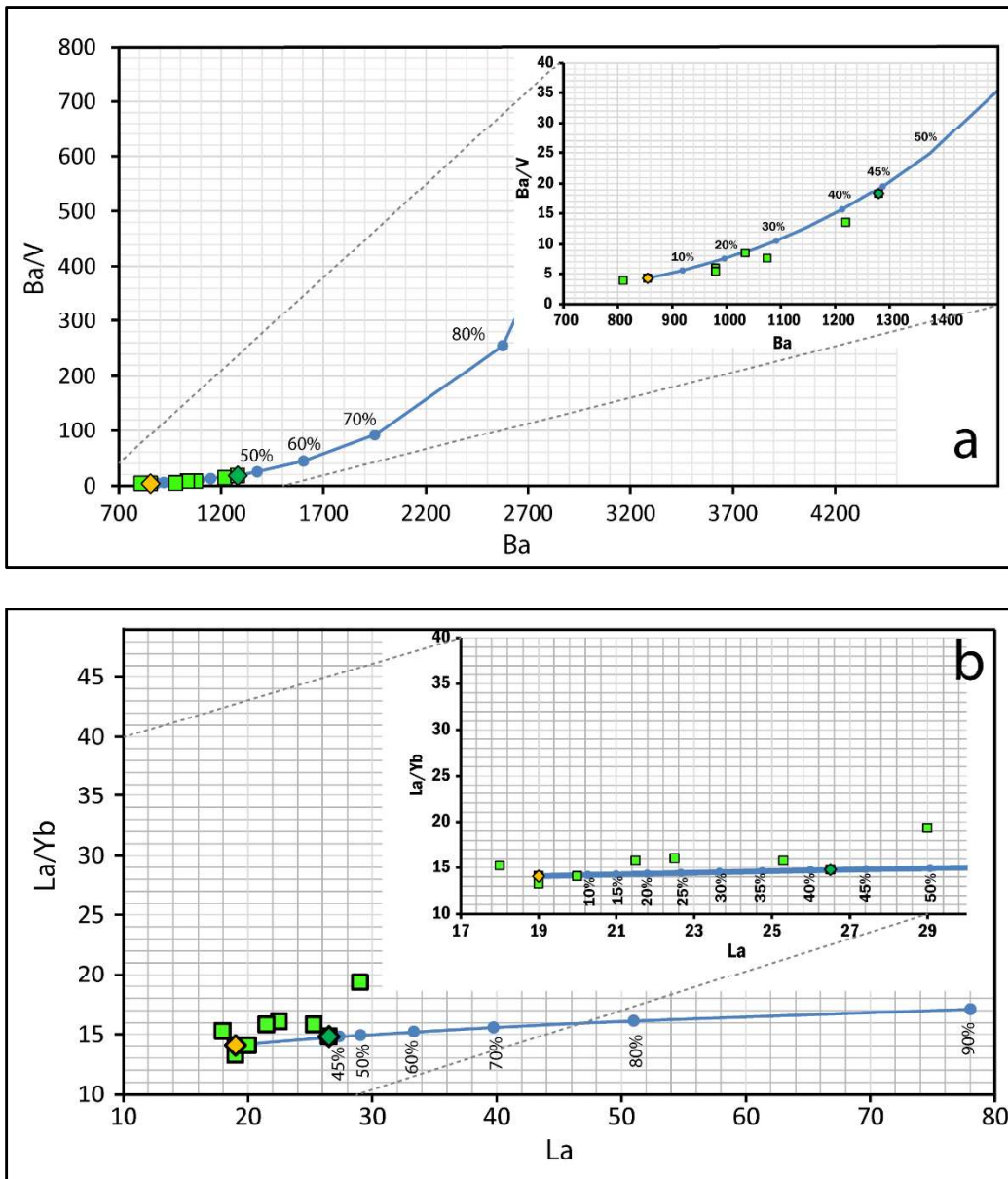


Figura 60. Curvas de cristalización de las relaciones (a) Ba/V vs. Ba (b) La/Yb vs. La, producidas por el proceso de cristalización fraccional.

Unidad *Brechas del Altar* (cuadrados verdes), Co (rombo amarillo), Cl (rombo verde). Se indican los grados de cristalización

4.7 Fuente magmática

Una vez efectuados los distintos modelos que explican la evolución composicional de las unidades de El Altar, es necesario comprender el origen de los magmas; es decir que proceso

fue el que dio paso a las rocas más básicas de las unidades *Brechas de Collanes* y *Brechas del Altar*.

Tomando en cuenta el ambiente geodinámico de subducción en el que se encuentra el Ecuador, en el cual la subducción es caracterizada por un contraste entre la zona hacia el norte y la zona hacia el sur de la Zona de Fractura de Grijalva (GFZ), en la placa subductante Nazca. Hacia el S, más antigua, densa y probablemente fría; y hacia el N, más joven, menos densa y probablemente más caliente. Estas placas presentan diferencias en su reología debido a su edad (Yepes et al., 2016). Estas características marcan diferencias geoquímicas a lo largo del arco Ecuatoriano, como las presentadas en los trabajos de Ancellin et al., (2017) y Narváez et al. (2018). Un proceso de fusión parcial del manto pudo dar paso a la formación de los magmas más básicos de las unidades de El Altar.

Monzier et al. (1999), en su estudio del volcán Sangay, indica la presencia de basaltos (una sola muestra encontrada; SAN 20B; SiO₂ % = 49.8), andesitas básicas (53 < SiO₂ % < 57) y andesitas ácidas (57 < SiO₂ % < 63), con una paragénesis mineral definida por *ol* + *cpx*, *ol* + *cpx* + *plg* y *cpx* + *opx* + *plg*, respectivamente. En las andesitas más ácidas, apatito, anfíbol y biotita también están presentes. Las andesitas tienen una textura porfirítica. Al comparar esto con las rocas del volcán El Altar, la unidad *Brechas del Altar* presenta características bastante parecidas.

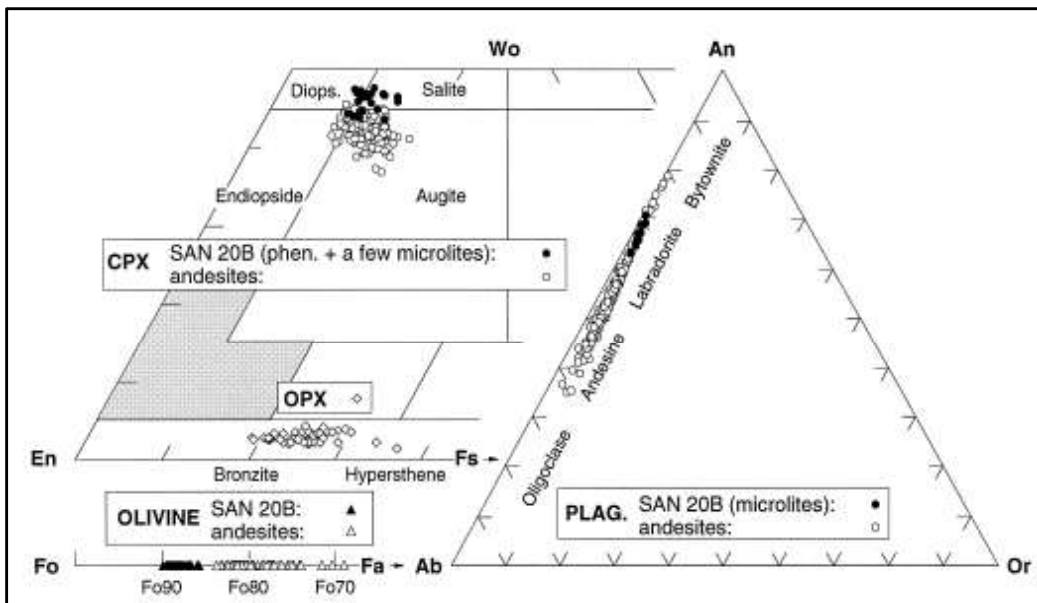


Figura 61. Mineralogía de los fenocristales de olivino, clinopiroxeno, ortopiroxeno y plagioclasas del Sangay. (Tomado de Monzier et al., 1999)

En la Fig. 61 se observa la composición de los minerales, tanto de las andesitas (símbolos blancos) como de la muestra SAN 20B (símbolos negros) del volcán Sangay. La mineralogía del Sangay es bastante similar a la de El Altar, en especial a las rocas de la unidad *Brechas del Altar*. Las plagioclasas con composiciones desde *bytownita* hasta *andesina*; el clinopiroxeno principalmente del tipo *augita*; y el ortopiroxeno en el rango de *Bronzita*. El olivino, en el volcán Sangay, se encuentra en las rocas con contenidos de SiO₂ > 57 wt%; en tanto que, en las rocas de El Altar, éste se encuentra en muestras hasta con SiO₂% de 58.5. Las composiciones en los olivinos también son parecidas, excepto en el rango Fo₈₂₋₇₅, presente en el Sangay y ausente en El Altar.

El basalto SAN 20B, la muestra más primitiva en las rocas del Sangay presenta fenocristales de olivino muy ricos en Mg (Fo=90-86). Estos olivinos poseen contenidos de CaO y NiO de 0.13% y 0.33%, respectivamente. Una característica especial de estos minerales es que poseen inclusiones de Cr-espínela (Al₂O₃ ~ 21%, Cr₂O₃ ~ 38% y #Cr ~ 55), parámetros apuntan a que estos fenocristales son verdaderamente magmáticos, en equilibrio con el fundido basáltico del que se originan (Monzier et al., 1999).

Tabla 28. Características SAN 20B (a= en olivino, b= microlitos). (Tomado de Monzier et al., 1999)

SAN	Sangay	SiO ₂ %	MgO %	Cr-Esp ^a (Cr ₂ O ₃ %)	Olivino (Fo%)	Cpx			Plg. (An%)
						En%	Wo%	Fs%	
20B	II?	49.8	11.0	31-40	86-90	39-46	44-47	9-14	63-71 ^b

Como basalto en el volcán El Altar, se tiene a la muestra RIO 35, en la cual se encontró olivinos con composiciones tan ricas en Mg (Fo₈₈) como aquellas encontradas en la muestra SAN 20B. Sus contenidos de CaO y MgO son de 0.18 y 0.38%, respectivamente. Estos olivinos presentan las mismas inclusiones de Cr-espínela de los olivinos primitivos en las rocas del Sangay, con un contenido de Al₂O₃ y Cr₂O₃ de 18.3 y 32.5%, respectivamente; y un número de cromo (Cr# = 100 Cr / Cr + Al; radio atómico) que va desde 0.45 a 0.59.

Tabla 29. Comparación de los olivinos y Cr-espínelas pertenecientes a las muestras SAN 20B (Sangay) y RIO 35 (El Altar)

VOLCÁN	MUESTRA	OLIVINO	Cr-ESPINELA	
		Fo %	Cr#	Cr ₂ O ₃ %
SANGAY	SAN 20B	86-90	0.55	38
EL ALTAR	RIO 35	70-88	0.45-0.59	32.5

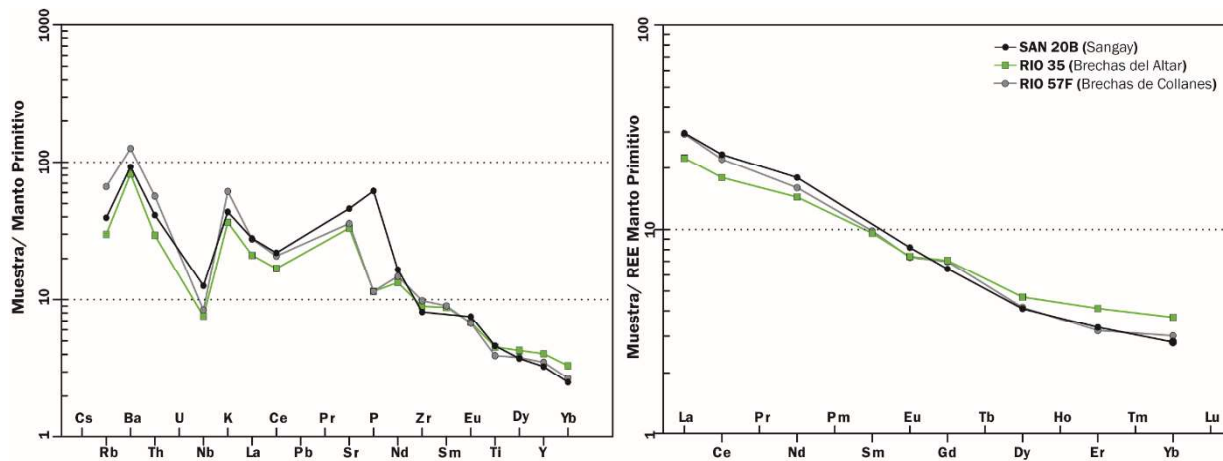


Figura 62. Gráfico multielemental (Sun & McDonough 1989) y de tierras raras (McDonough & Sun 1995) de las muestras SAN 20B, RIO 35 y RIO 57F.

En la Figura 62 se observa que el basalto SAN 20B se asemeja a las muestras RIO 35 (*Brechas del Altar*) y RIO 57F (*Brechas de Collanes*), las muestras más básicas de cada unidad, en su química de elementos traza. Observándose en el diagrama multielemental un mejor ajuste en los HFSE que los LILE, el único elemento que varía es el fósforo con un valor mucho más elevado en la SAN 20B. En el diagrama de tierras raras se aprecia que la muestra RIO 57F es idéntica al basalto SAN 20B; mientras que la RIO 35 muestra un leve empobrecimiento en LREE, y un enriquecimiento en HREE, con relación al basalto SAN 20B.

Monzier et al. (1999) propone un modelo de cinco pasos para explicar las características geoquímicas de las rocas del Sangay, como son los altos contenidos de elementos incompatibles y los bajos valores de Y y HREE. (1) un manto enriquecido, o variablemente enriquecido, (2) el metasomatismo de este manto mediante importantes volúmenes de fluidos derivados del slab enriquecidos en elementos incompatibles solubles, (3) fusión parcial del manto metasomatizado, (4) procesos de asimilación y de cristalización fraccional (AFC; por sus siglas en inglés) en la base de la corteza continental, y por último (5) procesos de cristalización fraccional y mezcla de magmas a nivel de corteza superior. Un modelo adaquíctico, como es el adoptado para los volcanes hacia el norte (Bourdon et al., 2003; Samaniego et al., 2005; Hidalgo et al., 2012) no es compatible, debido a que las rocas del Sangay se encuentran en el campo de alto K.

Con el objetivo de definir de mejor manera la fuente del volcán Sangay, Narváez et al. (2018) utiliza las inclusiones en los olivinos del basalto SAN 20B para modelizar la fuente de dicho

volcán; dado que las inclusiones no representan un magma parental de las lavas en erupción; sino, magmas primitivos no relacionados a los productos eruptivos de donde se alojan. De esta manera, se identifica el componente metasomatizante del slab mediante el uso de elementos traza. La subducción de un slab provoca la deshidratación de la corteza oceánica o la fusión de la misma, dependiendo del régimen termal. Esto varía la composición química del producto que es liberado hacia la cuña mantélica (Kessel et al., 2005).

En el trabajo de Kessel et al., (2005) se ha realizado un estudio experimental mediante el cual se conoce el comportamiento; es decir la movilidad que tienen los LILE, HFSE, REE, y otros elementos traza, en los tres productos resultantes del proceso de subducción de la corteza oceánica: fluidos, fundidos y fluidos supercríticos. Estos estudios han permitido caracterizar a los fluidos y fundidos, productos de la deshidratación y fusión de la corteza oceánica respectivamente. Así se conoce que los fluidos se dan por la deshidratación de la serpentinita bajo la corteza oceánica de la placa subducida (Prouteau et al., 2001), a condiciones de 4 GPa / 700°-800°C, los fundidos hidratados a 4 GPa / 1000°C y los fluidos supercríticos a 6 GPa. Los fluidos presentan $D^{\text{fluido/liquido}}$ de elementos como Rb, Cs, Ba y Pb ≥ 10 , para las REE, HFSE valores entre 0.01 a 0.5 (Kessel et al., 2005).

Es decir, los fluidos acuosos son enriquecidos en elementos móviles en fluidos (LILE; e.g Rb, Cs, Ba, Pb, Cs, K) y empobrecidos en HFSE y HREE (e.g Nb, La, Th, Yb), mientras que los fundidos son enriquecidos en elementos inmóviles en fluidos (LREE; e.g. La, Ce) (Kessel et al., 2005).

Así, Narváez et al. (2018) identifica que para la muestra SAN 20B el agente metasomatizante es un fluido acuoso. A partir de este, se realiza la modelización para el volcán Sangay, que consiste en: (1) deshidratación de los basaltos pertenecientes a la ridge de Carnegie para obtener el fluido acuoso, (2) mezcla entre el fluido acuoso y una peridotita empobrecida que representa la composición pre metasomatismo, en proporciones de 10:90 a 15:85, (3) 5% de fusión parcial, dejando un residuo comprendido por olivino, clinopiroxeno, anfíbol, espinela

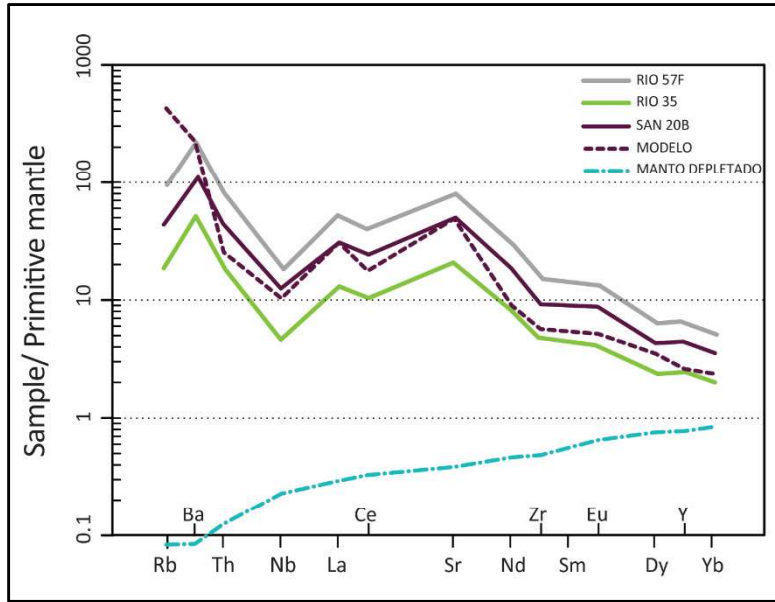


Figura 63. Composición modelada de SAN 20B (Sangay) tomado de Narváez et al., (2018) , y comparación de muestras RIO 35 y RIO 57F con dicho modelo.

Finalmente, dada la cercanía y mismo contexto geológico (culminación S de la NVZ), características mineralógicas semejantes, las composiciones en elementos traza idénticas entre los productos menos diferenciados (SAN 20B, Sangay; RIO 35, *Brechas del Altar*; y RIO 57F, *Brechas de Collanes*) para los volcanes Sangay y El Altar, se propone la misma fuente de la muestra SAN 20B del Sangay, planteada en Narváez et al. (2018), para El Altar. Es decir, las rocas del volcán El Altar tendría como origen un manto empobrecido, mismo que ha sido metasomatizado por un fluido acuoso producto de la deshidratación del slab subductante.

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN

5.1 Cristalización Fraccional

En el presente trabajo se ha modelizado la evolución de las unidades del volcán El Altar por medio de un proceso de cristalización fraccional. De este modo, se tiene la evolución de la unidad *Brechas de Collanes* a la unidad *Riolita de Collanes*, y en otro proceso de cristalización fraccional, se da la formación de la unidad *Brechas del Altar*.

En el trabajo realizado por Schiano et al. (2010) se propuso mediante el modelamiento de elementos mayores y traza, que el proceso dominante en la evolución de los magmas ecuatorianos es una mezcla de dos miembros. Esta mezcla se da entre un componente de bajo contenido de sílice (basalto) y un componente de alto contenido de sílice (dacitas). Aquí, los procesos de AFC, no contribuyen en las tendencias de los elementos mayores y trazas.

Samaniego et al., (2010) propone para el complejo volcánico Pichincha un proceso de mezcla entre un componente máfico derivado del manto, empobrecido en elementos trazas incompatibles (LILE, LREE) y enriquecido en elementos compatibles (HREE y metales de transición), con un componente silicatado adaquíptico, enriquecido en elementos incompatibles y empobrecido en elementos compatibles.

En el volcán Sangay (Monzier et al., 1999) propone un proceso de fraccionamiento de baja P como el proceso principal para la evolución de las rocas de dicho volcán. Aquí, los procesos de asimilación y cristalización fraccional si están presentes.

En el complejo volcánico Atacazo - Ninahuilca, Hidalgo et al.,(2006b) propone que la evolución de dicho complejo se ha dado debido a la participación de distintos procesos como: fusión parcial de distintas fuentes, cristalización fraccional, asimilación cortical y mezcla de magmas.

La variabilidad de la química de los magmas ecuatorianos no se puede explicar mediante un único proceso de evolución. Incluso a nivel de un único edificio los procesos pueden ser diversos y complementarios.

Como ya se mencionó anteriormente (apartado 4.3), el mejor análogo experimental para las rocas del volcán El Altar es el trabajo de Andújar et al. (2017), en el Volcán Tungurahua. En este se investigan experimentalmente las relaciones de fase en la andesita producto de la erupción del 2006. La química del material utilizado como inicial, (TUNG-PS.51B, SiO₂ = 58 wt%, MgO =

4.5 wt%, Na₂O = 3.9 wt%, Sr = 570ppm., La/Yb = 12, Y = 17ppm.) es parecida a la muestra RIO 128 de la unidad *Brechas de Collanes* (SiO₂ = 58.4 wt%, MgO = 4.45 wt%, Na₂O = 3.76 wt%, Sr = 740ppm, La/Yb = 15.35 ppm, Y = 15ppm), y en general a las rocas andesíticas de El Altar. Las fases minerales identificadas en las ejecuciones experimentales (*ol, cpx, opx, plg, anf, mt e il*), son las mismas fases que caracterizan a las dos unidades andesíticas de El Altar. Todo esto, junto a las composiciones minerales similares y la cercanía entre los dos volcanes, asegura una selección adecuada de un estudio experimental análogo para la presente investigación.

En el trabajo experimental, el H₂O ejerce gran control en la estabilidad de las distintas fases. Los autores demuestran que, para los magmas del Tungurahua, el olivino y el anfíbol necesitan una mínima cantidad de H₂O disuelta en el magma (>6 y 5-6 H₂O wt%, respectivamente) para estar en equilibrio con el magma. Las *Brechas de Collanes* carecen de estas dos fases en equilibrio, lo cual sugiere contenidos de H₂O no tan altos en el magma (<5 wt%). La presencia de ilmenita y de los llamados fantasmas de olivino (i.e. cristales con bastante alteración, lejos del equilibrio) corroboran los bajos contenidos de agua (Andújar et al., 2017).

Por el contrario, el olivino y el anfíbol se encuentran en equilibrio en las *Brechas del Altar*. Por ende, el contenido de H₂O debería ser >6 wt%. En el estudio experimental, se observa un detrimento en el porcentaje de *opx* con el aumento del contenido de H₂O en el magma. El menor porcentaje de ortopiroxeno en esta serie, con respecto a las *Brechas de Collanes*, ratifica el mayor contenido de agua para las *Brechas del Altar*.

Dicho esto, el modelo de evolución por cristalización fraccional propuesto para las *Brechas de Collanes* presenta armonía con los resultados experimentales. Los componentes del cumulado (*plg, opx, cpx, Ti-mt y apt*) están presentes en la mineralogía de la unidad y en la mineralogía del experimento, a excepción del *apt*. Para la unidad *Brechas del Altar*, de igual manera, los resultados del modelo concuerdan con las fases experimentales; un cumulado compuesto por *plg, cpx, opx y Ti-mt*. Vale la pena mencionar que el anfíbol no fracciona para ninguna de las dos unidades; pero sí en la evolución hacia las riolitas.

La presencia de riolitas, en centros volcánicos que presentan andesitas como sus productos eruptivos más recientes, es una característica de la Cordillera Real (Hall et al., 2008). En el Volcán Cotopaxi, también ubicado en la Cordillera Real, se identifican productos de composición andesítica y riolítica, alternantes (Hall & Mothes, 2008); sin la generación de magmas con composición intermedia (i.e. dacítica); caso muy similar al de El Altar. Al igual que en el presente trabajo, Garrison et al. (2006), (2011) y Martel et al. (2018) concluyen que la cristalización

fraccional es el principal proceso petrogenético en la evolución magmática, desde magmas andesíticos hasta riolíticos, en el Volcán Cotopaxi.

5.2 Fuente Magmática

El ambiente geodinámico de subducción en el que se encuentra el Ecuador, se caracteriza por la presencia de dos placas, la de Farallón hacia el S, más antigua, densa y probablemente fría; y la de Nazca hacia el N, más joven, menos densa y probablemente más caliente. Estas placas presentan diferencias en su reología debido a su edad. El margen que separa estas placas es la Zona de Fractura de Grijalva (GFZ) en sus siglas en inglés (Yepes et al., 2016). Estas diferencias marcan diferencias geoquímicas a lo largo del arco Ecuatoriano (Ancellin et al., 2017).

Los magmas generados en zonas de subducción pueden ser generados a partir de la fusión de los basaltos de la corteza oceánica subductante (Martin et al., 2005). Algunos estudios se han llevado a cabo (e.g., Winther & Newton, 1991; Wolf & Wyllie, 1994) para demostrar cuáles son las condiciones P y T bajo las cuales los basaltos empiezan a fundirse; y conocer la composición del fundido producido. Las lavas producidas en la fusión de los basaltos fueron denominadas “Adaquitas” en el trabajo realizado por Defant & Drummond, (1990).

Las rocas adaquíticas presentan una paragénesis mineral de plagioclasas, hornblenda y biotita; las fases accesorias son: apatito, zircón, esfena y titanomagnetita. Las adaquitas presentan $\text{SiO}_2 > 56 \text{ wt\%}$, un alto contenido de Na_2O comprendido entre 3.5 a 7.5 wt%, un alto Mg#, y valores Ni y Cr (~ 0.51, 24 y 36 ppm respectivamente) (Defant & Drummond, 1990). Las características que definen a las adaquitas primordialmente son su alto contenido de Sr (>400 ppm), bajo contenido de HREE ($\text{Yb} \leq 1.8 \text{ ppm}$; $\text{Y} \leq 18 \text{ ppm}$) (Martin et al., 2005).

En el arco ecuatoriano las firmas adaquíticas han sido interpretadas de dos maneras: (1) por la fusión del slab (Bourdon et al., 2003; Samaniego et al., 2002; Hidalgo et al., 2007); y (2) por procesos de AFC, seguido de procesos de fusión parcial (Monzier et al., 1999; Chiaradia et al., 2004). Las variaciones composicionales en elementos mayores y trazas, así como en isótopos, son resultado de múltiples procesos (Chiaradia et al., 2009).

Las rocas del volcán Sangay no presentan todas las características químicas para ser denominadas adaquitas, sin embargo, presentan empobrecimiento en Y y HREE (Monzier et al., 1999).

La zonación geoquímica desde el occidente hacia el oriente, que existe en el Ecuador, está definida por el incremento de K_2O y elementos incompatibles (Ba, Nb, Pb, Th, Be, Y, Rb, Sr, Zr,

REE) con el incremento de la distancia a la fosa. Así también, las relaciones de elementos móviles en fluidos sobre elementos inmóviles en fluidos (Ba/Th, Pb/Nb, etc) decrecen respecto a la distancia a la fosa (Hidalgo et al., 2012; Ancellin et al., 2017).

Ancellin et al., (2017) muestra dos tendencias de los elementos traza a través del arco ecuatoriano: (1) el incremento de elementos incompatibles (LILE, HFSE) en el tras arco es explicado por una disminución en el ingreso de los agentes provenientes del slab en la cuña mantélica, provocando menores grados de fusión parcial; (2) el enriquecimiento de elementos móviles en fluidos sobre los inmóviles en fluidos en el frente del arco Ecuatoriano, indica una temprana liberación de dichos elementos móviles en fluidos lo cual es producto de la deshidratación de dicho slab.

La partición de los elementos traza durante la subducción del slab es marcada por su movilidad en los fluidos o su permanencia en los fundidos silicatados. De esta manera, las relaciones Ba/Th muestran un ingreso de un fluido acuoso en la cuña mantélica, debido a que el Ba es móvil en fluidos o fundidos y el Th es móvil solo en fundidos (Kessel et al., 2005; Ancellin et al., 2017). En el trabajo realizado por Narváez et al., (2018) también se observa que la relación entre un elemento móvil y uno inmóvil en un fluido indica el origen del componente del slab, sea este un fluido o fundido.

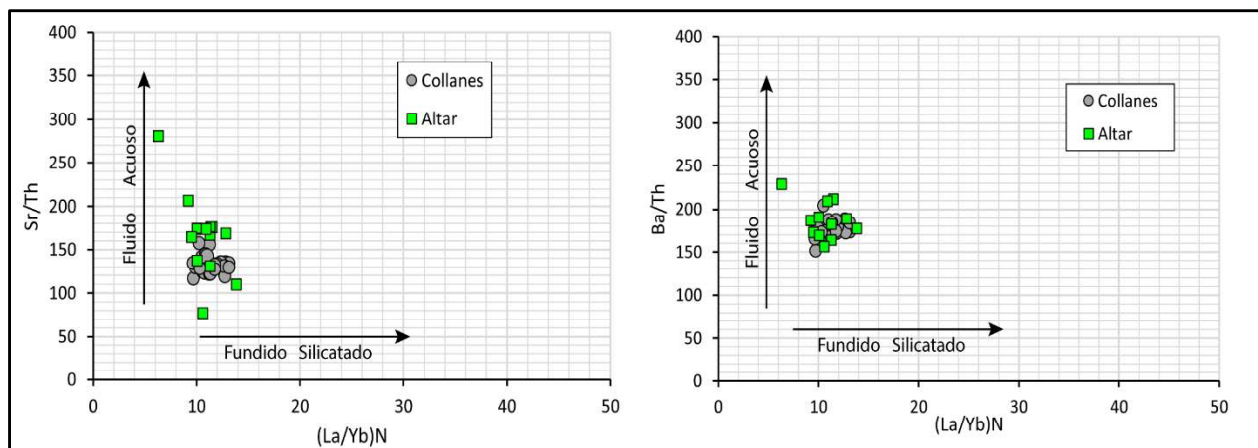


Figura 64. Diagrama (La/Yb) N normalizado a manto primitivo (Sun & McDonough, 1989) vs. Sr/Th, Ba/Th

Sr y Ba son elementos móviles en fluidos mientras que el Th es inmóvil. Estas relaciones tienen valores bajos en la cuña mantélica pre-metasomatizada. La adición de un fluido acuoso enriquecido en elementos móviles y empobrecido en elementos inmóviles aumentará la relación de la cuña mantélica pre-metasomatizada dejando un patrón vertical (Figura 64). Por el contrario,

al añadir un fundido hidratado silicatado, el cual es enriquecido tanto en elementos móviles e inmóviles, este no provocará un cambio en la relación previa existente, dejando así un patrón horizontal.

En comparación a magmas de arcos primitivos a nivel mundial (Elliott, 2003), los valores de Sr/Th (132 ± 9) y Ba/Th (178 ± 9) son medianamente bajos. En la Figura 64 se observa que la unidad *Brechas de Collanes* muestra una leve tendencia vertical, mientras que en las *Brechas del Altar* la tendencia es más explícita. Se concluye que la fuente de las unidades *Brechas de Collanes* y *Brechas del Altar* es una cuña mantélica que ha sido metasomatizada por fluidos acuosos.

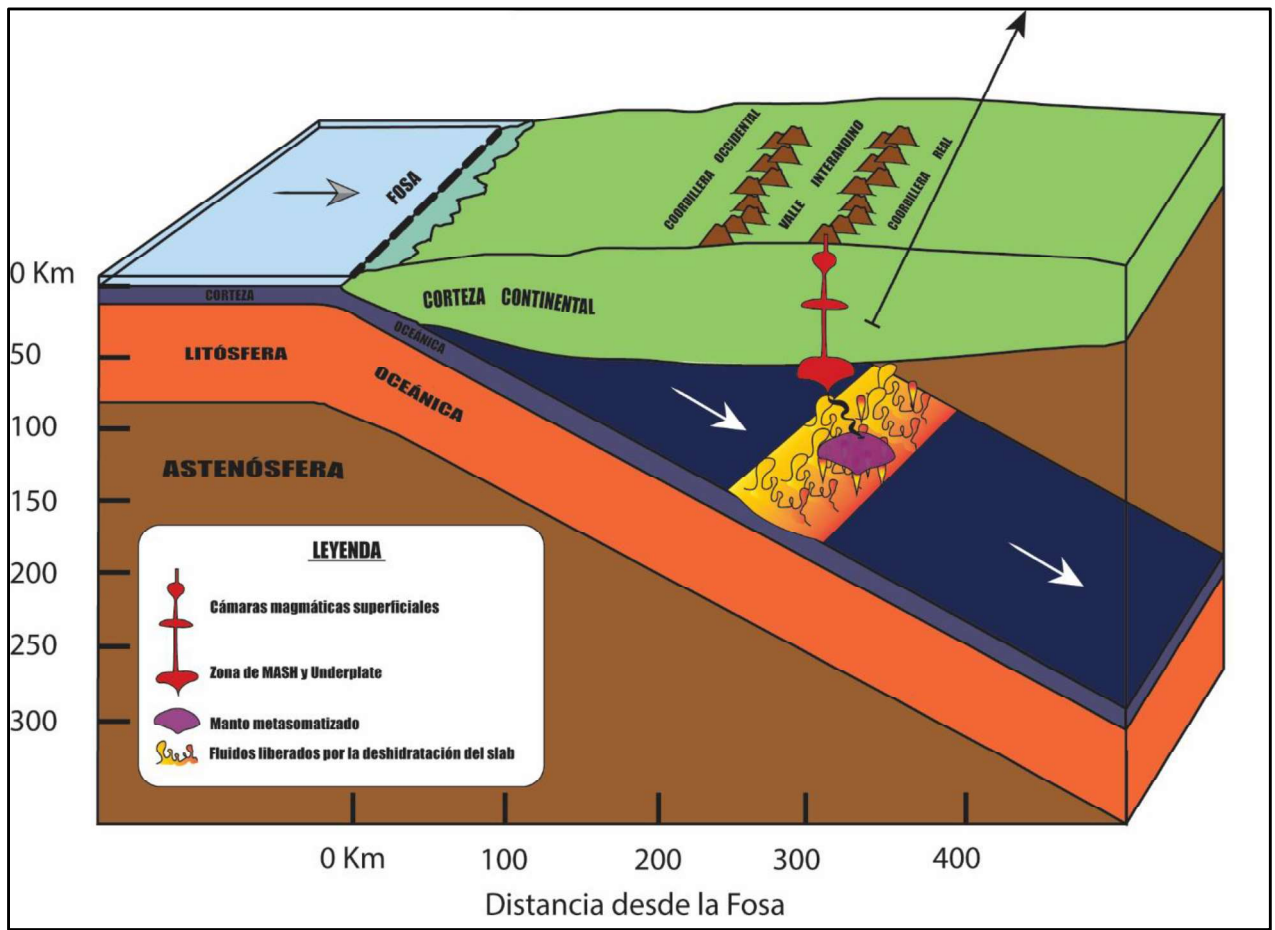
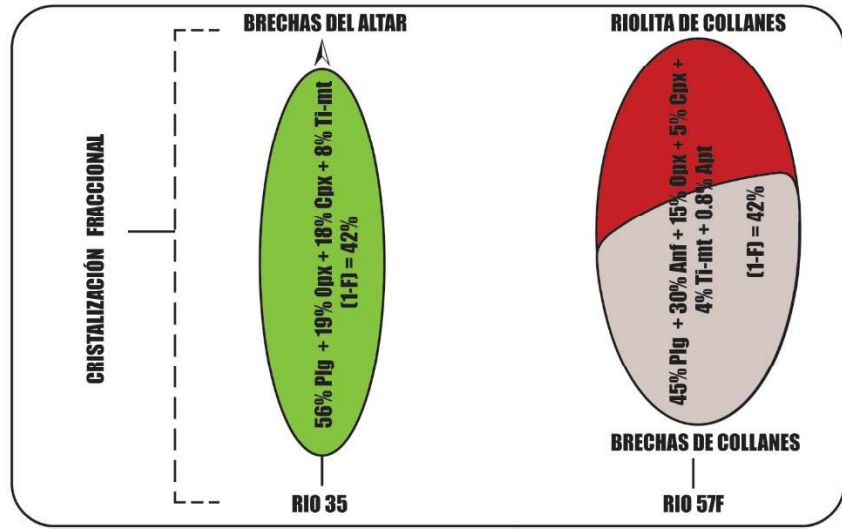


Figura 65. Modelo petrogenético del volcán El Altar.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- El Volcán El Altar presenta 4 unidades magmáticas de carácter calco alcalino y con un alto contenido de K: *Brechas de Collanes*, *Brechas del Altar*, *Riolita de Collanes* y *Gabro-Diorita*.
- La paragénesis mineral característica de cada unidad es: *Brechas de Collanes* ($cpx + plg + opx + Ti\text{-}mt \pm ilm \pm apt$), *Brechas del Altar* ($ol + cpx + plg + opx \pm anf \pm Ti\text{-}mt \pm Cr\text{-}sp$), *Riolita de Collanes* ($plg + anf + bt + Ti\text{-}mt$) y *Gabro-Diorita* ($cpx + plg + Ti\text{-}mt + bt + opx \pm ilm \pm fdK$).
- En las *Brechas de Collanes*, las plagioclasas son Labradoritas y Andesinas, con composiciones de (An_{68-39}). Los *cpx* se encuentran, casi en su totalidad, en el campo de la *augita*, con composiciones de ($Wo_{45.3-42.2}$, $En_{50.1-42.9}$, $Fs_{5.8-13.4}$). Los *opx* se encuentran en el campo de la *Bronzita* ($En_{81-67}\text{-}Fs_{16-29}$). Finalmente, los óxidos de Fe y Ti, se presentan como *Ti-mt* e *il*, con composiciones en $TiO_2 = 19\text{-}8$ wt%.
- Las *Brechas del Altar* presentan minerales con composiciones muy similares a los de las *Brechas de Collanes*. Los fenocristales de *cpx* se encuentran en el campo de la *augita* y del *diópsido* (Wo_{46-42} , En_{47-44} , Fs_{10-14}); y llegan a composiciones de pigeonita (Wo_9 , En_{61} , Fs_{30}) en la matriz. Las plagioclasas, además del rango que presentan aquellas en las *Brechas de Collanes*, muestran composiciones más ricas en An, llegando a *Bytownitas* en los centros de los cristales de sus miembros más básicos. Así, las plagioclasas de la unidad *Brechas del Altar* tienen composiciones de (An_{79-42}). La química de las *Ti-mt* está caracterizada por contenidos de $TiO_2 = 17\text{-}7$ wt%.
- Las *Brechas del Altar* se distinguen de las *Brechas de Collanes* por el *ol* y el *anf*, con composiciones de Fo_{89-60} y de $\#Mg \sim 63$, respectivamente.
- La *Riolita de Collanes* está caracterizada por *plg* ($An_{\sim 42}$), *anf* ($\#Mg = 70\text{-}60$), *bt* ($MgO \sim 16$ wt%) y *Ti-mt* con contenidos de TiO_2 bajos (~ 5 wt%).
- La *Gabro-Diorita* muestra *plg* con un amplio rango composicional (An_{58-25}), *cpx* del tipo *diópsido* y *augita* ($Wo_{49-42}\text{-}En_{46-43}\text{-}Fs_{7-14}$), *opx* con composiciones de ($En_{67}\text{-}Fs_{29}$) y *Ti-mt* con contenidos muy bajos de TiO_2 (1-2 wt%). Además, existe la presencia de *il* ($TiO_2 = 31\text{-}45$ wt%). La biotita muestra altas concentraciones de Mg ($MgO \sim 21$ wt%).

- Las condiciones magmáticas pre eruptivas son temperaturas entre 1050 y 950 °C, y presiones 400 y 300 kbar en El Altar.
- Las condiciones magmáticas de presión y temperatura para la unidad riolítica son: 300kbar y 750 °C.
- El proceso principal de diferenciación magmática, es la cristalización fraccional. Proceso que se da con porcentajes de cristalización de 30.52; y 41.8%; y cumulos compuestos por *plg, opx, cpx, Ti-mt* y *apt*; y *plg, cpx, opx* y *Ti-mt*; para las *Brechas de Collanes*; y para las *Brechas del Altar*, respectivamente.
- Los magmas de la unidad *Riolita de Collanes* (74.4 SiO₂ wt%) resultan de la cristalización fraccional a partir de los magmas de la unidad *Brechas de Collanes*, cuya tasa de cristalización es de 44.36% y el cumulo se compone de *plg, opx, anf, cpx* y *Ti-mt*.
- La fuente para las unidades *Brechas de Collanes* y *Brechas del Altar* es una peridotita metazomatizada por fluidos acuosos.

6.2 Recomendaciones

- Realizar análisis isotópicos de Sr, Nd y Pb los cuales permiten caracterizar de mejor manera la fuente magmática, debido a que estos son indicadores de procesos como contaminación y asimilación.
- La evolución de El Altar ha sido propuesta en base a datos geoquímicos y petrográficos, por lo cual para comprobar dicho modelo se recomienda realizar dataciones radiométricas en las distintas unidades del volcán.
- Se contó con un análisis del cuerpo gabrónico, por lo cual se recomienda realizar más análisis de este tipo, para así caracterizar de mejor manera a dicho cuerpo, su origen, características y evolución.
- Tomar este trabajo en conjunto con los trabajos realizados en los volcanes de la terminación sur de la NVZ para definir de mejor manera la fuente que da origen a los volcanes de esta zona.

CAPÍTULO VII

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alderton, D. H. M., Pearce, J. A., & Potts, P. J. (1980). Rare earth element mobility during granite alteration: Evidence from southwest England. *Earth and Planetary Science Letters*, 49(1), 149–165. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(80\)90157-0](https://doi.org/10.1016/0012-821X(80)90157-0)
- Alvarado, A., Audin, L., Nocquet, J. M., Jaillard, E., Mothes, P., Jarrín, P., ... Cisneros, D. (2016). Partitioning of oblique convergence in the Northern Andes subduction zone: Migration history and the present-day boundary of the North Andean Sliver in Ecuador: EASTERN LIMIT OF THE NORTH ANDEAN SLIVER. *Tectonics*, 35(5), 1048–1065. <https://doi.org/10.1002/2016TC004117>
- Ancellin, M.-A., Samaniego, P., Vlastélic, I., Nauret, F., Gannoun, A., & Hidalgo, S. (2017). Across-arc versus along-arc Sr-Nd-Pb isotope variations in the Ecuadorian volcanic arc: ALONG-ARC ECUADOR. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18(3), 1163–1188. <https://doi.org/10.1002/2016GC006679>
- Andújar, J., Martel, C., Pichavant, M., Samaniego, P., Scaillet, B., & Molina, I. (2017). Structure of the Plumbing System at Tungurahua Volcano, Ecuador: Insights from Phase Equilibrium Experiments on July–August 2006 Eruption Products. *Journal of Petrology*, 58(7), 1249–1278. <https://doi.org/10.1093/petrology/egx054>
- Bacon, C. R., & Hirschmann, M. M. (1988). Mg/Mn partitioning as a test for equilibrium between coexisting Fe-Ti oxides. *American Mineralogist*, 73, 57–61. Retrieved from USGS Publications Warehouse.
- Baldock, J. W. (1982). *Boletín de la Explicación del Mapa Geológico de la República del Ecuador Escala 1:1000000*.
- Bonney, T. G. (1884). *bonney—Altar-ilini-coto ECUADOR.pdf* (Vol. 37). JSTOR.
- Bourdon, E., Eissen, J.-P., Gutscher, M.-A., Monzier, M., Hall, M. L., & Cotten, J. (2003). Magmatic response to early aseismic ridge subduction: The Ecuadorian margin case (South America). *Earth and Planetary Science Letters*, 205(3–4), 123–138. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(02\)01024-5](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(02)01024-5)
- Bourdon, E., Eissen, J.-P., Monzier, M., Robin, C., Martin, H., Cotten, J., & Hall, M. L. (2002). *Adakite-like Lavas from Antisana Volcano (Ecuador): Evidence for Slab Melt Metasomatism Beneath the Andean Northern Volcanic Zone*. 43(2), 19.
- Cabero, M. T., Mecoleta, S., & López-Moro, F. J. (2012). OPTIMASBA: A Microsoft Excel workbook to optimise the mass-balance modelling applied to magmatic differentiation processes and

- subsolidus overprints. *Computers & Geosciences*, 42, 206–211.
<https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.10.013>
- Chiaradia, M., Fontbot, L., & Beate, B. (2004). Cenozoic continental arc magmatism and associated mineralization in Ecuador. *Mineralium Deposita*, 39(2), 204–222.
<https://doi.org/10.1007/s00126-003-0397-5>
- Chiaradia, M., Müntener, O., Beate, B., & Fontignie, D. (2009). Adakite-like volcanism of Ecuador: Lower crust magmatic evolution and recycling. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 158(5), 563–588. <https://doi.org/10.1007/s00410-009-0397-2>
- Chiaradia, M., Vallance, J., Fontboté, L., Stein, H., Schaltegger, U., Coder, J., ... Gendall, I. (2009). U–Pb, Re–Os, and $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ geochronology of the Nambija Au-skarn and Panguí porphyry Cu deposits, Ecuador: Implications for the Jurassic metallogenic belt of the Northern Andes. *Mineralium Deposita*, 44(4), 371–387. <https://doi.org/10.1007/s00126-008-0210-6>
- Cochrane, R. (2013). *U-Pb thermochronology, geochronology and geochemistry of NW South America: Rift to drift transition, active margin dynamics and implications for the volume balance of continents*. 202.
- Cochrane, R., Spikings, R., Gerdes, A., Ulianov, A., Mora, A., Villagómez, D., ... Chiaradia, M. (2014). Permo-Triassic anatexis, continental rifting and the disassembly of western Pangaea. *Lithos*, 190–191, 383–402. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.12.020>
- Defant, M., & Drummond, M. (1990). *Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere*. Retrieved from <https://www.nature.com/articles/347662a0>
- Eissen, J.-P., Beate, B., Hall, M., Laraque, A., Francou, B., Cáceres, B., ... Muñoz, T. (2004). EL DESLAVE DEL 13 DE OCTUBRE DEL 2000 DEL VOLCÁN EL ALTAR. 1. Retrieved from <http://cidbimena.desastres.hn/docum/crid/Septiembre2007/CD3/pdf/spa/doc15666/doc15666-a.pdf>
- Elliott, T. (2003). Tracers of the slab. In J. Eiler (Ed.), *Geophysical Monograph Series* (Vol. 138, pp. 23–45). <https://doi.org/10.1029/138GM03>
- Ettinger, S., & Eissen, J.-P. (2001). *Retrosceso de glaciares, geomorfología glacial y depositos del deslave del 13 de octubre 2000 del volcán El Altar*. 134–138.
- Garrison, J., Davidson, J., Reid, M., & Turner, S. (2006). Source versus differentiation controls on U-series disequilibria: Insights from Cotopaxi Volcano, Ecuador. *Earth and Planetary Science Letters*, 244(3–4), 548–565. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.02.013>

- Garrison, J. M., Davidson, J. P., Hall, M., & Mothes, P. (2011). Geochemistry and Petrology of the Most Recent Deposits from Cotopaxi Volcano, Northern Volcanic Zone, Ecuador. *Journal of Petrology*, 52(9), 1641–1678. <https://doi.org/10.1093/petrology/egr023>
- GERM Partition Coefficient (Kd) Database. (n.d.). Retrieved June 17, 2019, from <https://earthref.org/KDD/#top>
- Ghiorso, M. S., & Evans, B. W. (2008). Thermodynamics of Rhombohedral Oxide Solid Solutions and a Revision of the FE-TI Two-Oxide Geothermometer and Oxygen-Barometer. *American Journal of Science*, 308(9), 957–1039. <https://doi.org/10.2475/09.2008.01>
- Grove, T. L., Gerlach, D. C., & Sando, T. W. (1982). Origin of calc-alkaline series lavas at Medicine Lake Volcano by fractionation, assimilation and mixing. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80(2), 160–182. <https://doi.org/10.1007/BF00374893>
- Gutscher, M.-A., Malavieille, J., Lallemand, S., & Collot, J.-Y. (1999). Tectonic segmentation of the North Andean margin: Impact of the Carnegie Ridge collision. *Earth and Planetary Science Letters*, 168(3–4), 255–270. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(99\)00060-6](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(99)00060-6)
- Hall, M. L., Samaniego, P., Le Pennec, J. L., & Johnson, J. B. (2008). Ecuadorian Andes volcanism: A review of Late Pliocene to present activity. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176(1), 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.06.012>
- Hall, M., & Mothes, P. (2008). The rhyolitic–andesitic eruptive history of Cotopaxi volcano, Ecuador. *Bulletin of Volcanology*, 70(6), 675–702. <https://doi.org/10.1007/s00445-007-0161-2>
- Harker, A. (1909). *The natural history of igneous rocks* (The Macmillan Company). New York.
- Hidalgo, S., Gerbe, M. C., Martin, H., Samaniego, P., & Bourdon, E. (2012). Role of crustal and slab components in the Northern Volcanic Zone of the Andes (Ecuador) constrained by Sr–Nd–O isotopes. *Lithos*, 132–133, 180–192. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.11.019>
- Hidalgo, S., Monzier, M., Martin, H., Chazot, G., Eissen, J.-P., & Cotten, J. (2007). Adakitic magmas in the Ecuadorian Volcanic Front: Petrogenesis of the Iliniza Volcanic Complex (Ecuador). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 159(4), 366–392. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2006.07.007>
- Hidalgo, S., Samaniego, P., Gerbe, M. C., Bourdon, E., Eissen, J. P., Martin, H., ... Pascal, U. B. (2006). *EXEMPLE DU COMPLEXE VOLCANIQUE ATACAZO – NINAHUILCA (EQUATEUR)*. 254.
- Im, C.-B., Koh, S.-M., Chang, H.-W., & Takagi, T. (2002). The geochemical behavior of altered igneous rocks in the Tertiary Gampo Basin, Kyongsang Province, South Korea. *GEOCHEMICAL JOURNAL*, 36(5), 391–407. <https://doi.org/10.2343/geochemj.36.391>

- Irvine, T. N., & Baragar, W. R. A. (1971). A Guide to the Chemical Classification of the Common Volcanic Rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(5), 523–548. <https://doi.org/10.1139/e71-055>
- Johnson, M. C., & Rutherford, M. J. (1989). Experimental calibration of the aluminum-in-hornblende geobarometer with application to Long Valley caldera (California) volcanic rocks. *Geology*, 17(9), 837. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1989\)017<0837:ECOTAI>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1989)017<0837:ECOTAI>2.3.CO;2)
- Kendrick, E., Bevis, M., Smalley, R., Brooks, B., Vargas, R. B., Lauría, E., & Fortes, L. P. S. (2003). The Nazca–South America Euler vector and its rate of change. *Journal of South American Earth Sciences*, 16(2), 125–131. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(03\)00028-2](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(03)00028-2)
- Kessel, R., Schmidt, M. W., Ulmer, P., & Pettke, T. (2005). Trace element signature of subduction-zone fluids, melts and supercritical liquids at 120–180 km depth. *Nature*, 437(7059), 724–727. <https://doi.org/10.1038/nature03971>
- Kress, V. C., & Carmichael, I. S. E. (1991). *The compressibility of silicate liquids containing Fe₂O₃ and the effect of composition, temperature, oxygen fugacity and pressure on their redox states*. 11.
- Kuritani, T. (2003). Shift and Rotation of Composition Trends by Magma Mixing: 1983 Eruption at Miyake-jima Volcano, Japan. *Journal of Petrology*, 44(10), 1895–1916. <https://doi.org/10.1093/petrology/egg063>
- Lavenu, A., Noblet, C., Bonhomme, M. G., Egüez, A., Dugas, F., & Vivier, G. (1992). New K–Ar age dates of Neogene and Quaternary volcanic rocks from the Ecuadorian Andes: Implications for the relationship between sedimentation, volcanism, and tectonics. *Journal of South American Earth Sciences*, 5(3–4), 309–320. [https://doi.org/10.1016/0895-9811\(92\)90028-W](https://doi.org/10.1016/0895-9811(92)90028-W)
- Le Bas, M. J., Maitre, R. W. L., Streckeisen, A., Zanettin, B., & IUGS Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. (1986). A Chemical Classification of Volcanic Rocks Based on the Total Alkali-Silica Diagram. *Journal of Petrology*, 27(3), 745–750. <https://doi.org/10.1093/petrology/27.3.745>
- Leake, B. E., Woolley, A. R., Arps, C. E. S., Birch, W. D., Gilbert, M. C., Grice, J. D., ... Maresch, W. V. (1997). NOMENCLATURE OF AMPHIBOLES: REPORT OF THE SUBCOMMITTEE ON AMPHIBOLES OF THE INTERNATIONAL MINERALOGICAL ASSOCIATION, COMMISSION ON NEW MINERALS AND MINERAL NAMES. *THE CANADIAN MINERALOGIST*, 28.
- Lintjewas, L., & Setiawan, I. (2018). Mobility of rare earth element in hydrothermal process and weathering product: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 118, 012076. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/118/1/012076>
- Litherland, M., Aspden, J. A., & Jemielita, R. (1994). *Litherland et al., 1994*. Keyworth Nottingham: British Geological Survey.

- Lonsdale, P. (2005). Creation of the Cocos and Nazca plates by fission of the Farallon plate. *Tectonophysics*, 404(3–4), 237–264. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.05.011>
- Lonsdale, P., & Klitgord, K. D. (1978). Structure and tectonic history of the eastern Panama Basin. *Geological Society of America Bulletin*, 89(7), 981. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1978\)89<981:SATHOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1978)89<981:SATHOT>2.0.CO;2)
- Maghraoui, M. E., Joron, J. L., Raimbault, L., & Treuil, M. (2002). Element mobility during metasomatism of granitic rocks in the Saint-Chély d'Apcher area (Lozère, France). *Environment International*, 28(5), 349–357. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(02\)00036-3](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(02)00036-3)
- Martel, C., Andújar, J., Mothes, P., Scaillet, B., Pichavant, M., & Molina, I. (2018). Storage conditions of the mafic and silicic magmas at Cotopaxi, Ecuador. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 354, 74–86. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.02.006>
- Martin, H., Smithies, R. H., Rapp, R., Moyen, J.-F., & Champion, D. (2005). An overview of adakite, tonalite–trondhjemite–granodiorite (TTG), and sanukitoid: Relationships and some implications for crustal evolution. *Lithos*, 79(1–2), 1–24. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.04.048>
- Miyashiro, A. (1974). *Volcanic Rock Series in Island Arcs and Active Continental Margins*. 274, 321–355.
- Monzier, M., Robin, C., Samaniego, P., Hall, M. L., Cotten, J., Mothes, P., & Arnaud, N. (1999). Sangay volcano, Ecuador: Structural development, present activity and petrology. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 90(1–2), 49–79. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(99\)00021-9](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(99)00021-9)
- Morimoto, N. (1988). Nomenclature of Pyroxenes. *Mineralogy and Petrology*, 22.
- Narvaez, D. F., Rose-Koga, E. F., Samaniego, P., Koga, K. T., & Hidalgo, S. (2018). Constraining magma sources using primitive olivine-hosted melt inclusions from Puñalica and Sangay volcanoes (Ecuador). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 173(10), 80. <https://doi.org/10.1007/s00410-018-1508-8>
- Nocquet, J.-M., Villegas-Lanza, J. C., Chlieh, M., Mothes, P. A., Rolandone, F., Jarrin, P., ... Yepes, H. (2014). Motion of continental slivers and creeping subduction in the northern Andes. *Nature Geoscience*, 7(4), 287–291. <https://doi.org/10.1038/ngeo2099>
- Parsapoor, A., Khalili, M., & Mackizadeh, M. A. (2009). The behaviour of trace and rare earth elements (REE) during hydrothermal alteration in the Rangan area (Central Iran). *Journal of Asian Earth Sciences*, 34(2), 123–134. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2008.04.005>
- Peccerillo, A., & Taylor, S. R. (1976). Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1), 63–81. <https://doi.org/10.1007/BF00384745>

- Pirajno, F. (2013). *Hydrothermal Mineral Deposits Principles and Fundamental Concepts for the Exploration Geologist*. Berlin: Springer Berlin.
- Pratt, W. T., Duque, P., & Ponce, M. (2005). An autochthonous geological model for the eastern Andes of Ecuador. *Tectonophysics*, 399(1–4), 251–278. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2004.12.025>
- Prouteau, G., Scaillet, B., Pichavant, M., & Maury, R. (2001). Evidence for mantle metasomatism by hydrous silicic melts derived from subducted oceanic crust. *Nature*, 410(6825), 197–200. <https://doi.org/10.1038/35065583>
- Pu, X., Lange, R. A., & Moore, G. (2017). A comparison of olivine-melt thermometers based on D_{Mg} and D_{Ni} : The effects of melt composition, temperature, and pressure with applications to MORBs and hydrous arc basalts. *American Mineralogist*, 102(4), 750–765. <https://doi.org/10.2138/am-2017-5879>
- Putirka, K. D. (2008). Thermometers and Barometers for Volcanic Systems. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 69(1), 61–120. <https://doi.org/10.2138/rmg.2008.69.3>
- Ridolfi, F., & Renzulli, A. (2012). Calcic amphiboles in calc-alkaline and alkaline magmas: Thermobarometric and chemometric empirical equations valid up to 1,130°C and 2.2 GPa. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 163(5), 877–895. <https://doi.org/10.1007/s00410-011-0704-6>
- Ridolfi, F., Renzulli, A., & Puerini, M. (2010). Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: An overview, new thermobarometric formulations and application to subduction-related volcanoes. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160(1), 45–66. <https://doi.org/10.1007/s00410-009-0465-7>
- Rollinson, H. R. (1993). *Using geochemical data: Evaluation, presentation, interpretation*. Harlow, Essex, England : New York: Longman Scientific & Technical ; Copublished in the U.S. with J. Wiley & Sons.
- Samaniego, P., Le Pennec, J.-L., Robin, C., & Hidalgo, S. (2011). Petrological analysis of the pre-eruptive magmatic process prior to the 2006 explosive eruptions at Tungurahua volcano (Ecuador). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 199(1–2), 69–84. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.10.010>
- Samaniego, P., Martin, H., Monzier, M., Robin, C., Fornari, M., Eissen, J.-P., & Cotten, J. (2005). Temporal Evolution of Magmatism in the Northern Volcanic Zone of the Andes: The Geology and Petrology of Cayambe Volcanic Complex (Ecuador). *Journal of Petrology*, 46(11), 2225–2252. <https://doi.org/10.1093/petrology/egi053>

- Samaniego, P., Martin, H., Robin, C., & Monzier, M. (2002). Transition from calc-alkalic to adakitic magmatism at Cayambe volcano, Ecuador: Insights into slab melts and mantle wedge interactions. *Geology*, *30*(11), 967. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2002\)030<0967:TFCATA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2002)030<0967:TFCATA>2.0.CO;2)
- Samaniego, P., Robin, C., Chazot, G., Bourdon, E., & Cotten, J. (2010). Evolving metasomatic agent in the Northern Andean subduction zone, deduced from magma composition of the long-lived Pichincha volcanic complex (Ecuador). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, *160*(2), 239–260. <https://doi.org/10.1007/s00410-009-0475-5>
- Schiano, P., Monzier, M., Eissen, J.-P., Martin, H., & Koga, K. T. (2010). Simple mixing as the major control of the evolution of volcanic suites in the Ecuadorian Andes. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, *160*(2), 297–312. <https://doi.org/10.1007/s00410-009-0478-2>
- Sillitoe, R. H. (2010). Porphyry Copper Systems. *Economic Geology*, *105*(1), 3–41. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.1.3>
- Spikings, R. A., Winkler, W., Seward, D., & Handler, R. (2001). Along-strike variations in the thermal and tectonic response of the continental Ecuadorian Andes to the collision with heterogeneous oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters*, *186*(1), 57–73. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(01\)00225-4](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00225-4)
- Spikings, R., Cochrane, R., Villagomez, D., Van der Lelij, R., Vallejo, C., Winkler, W., & Beate, B. (2015). The geological history of northwestern South America: From Pangaea to the early collision of the Caribbean Large Igneous Province (290–75Ma). *Gondwana Research*, *27*(1), 95–139. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.06.004>
- Sun, S. -s., & McDonough, W. F. (1989). Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. *Geological Society, London, Special Publications*, *42*(1), 313–345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
- Trenkamp, R., Kellogg, J. N., Freymueller, J. T., & Mora, H. P. (2002). Wide plate margin deformation, southern Central America and northwestern South America, CASA GPS observations. *Journal of South American Earth Sciences*, *15*(2), 157–171. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(02\)00018-4](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(02)00018-4)
- Winter, J. D. (2014). *Principles of igneous and metamorphic petrology* (Pearson new international ed., 2nd ed). Harlow: Pearson.
- Winther, K. T., & Newton, R. C. (1991). Experimental melting of hydrous low-K tholeiite: Evidence on the origin of Archaean cratons. *Bulletin of the Geological Society of Denmark*, *16*.

- Wolf, M. B., & Wyllie, P. J. (1994). Dehydration-melting of amphibolite at 10 kbar: The effects of temperature and time. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 115(4), 369–383. <https://doi.org/10.1007/BF00320972>
- Wood, S. (2002). *Behavior of Rare Earth Element In Geothermal Systems; A New Exploration/Exploitation Tool*. <https://doi.org/10.2172/792697>
- Yepes, H., Audin, L., Alvarado, A., Beauval, C., Aguilar, J., Font, Y., & Cotton, F. (2016). A new view for the geodynamics of Ecuador: Implication in seismogenic source definition and seismic hazard assessment: ECUADOR GEODYNAMICS AND PSHA. *Tectonics*, 35(5), 1249–1279. <https://doi.org/10.1002/2015TC003941>

ANEXOS

Anexo 1. Análisis de roca total.

Serie	Muestra	SiO2	TiO2	Al2O3	Fe2O3*	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	P2O5	LOI	Total	Sc	V	Cr	Ni	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Gd	Dy	Er	Yb	Th	
BRECHAS DE COLLANES	44A	59.00	0.76	16.15	6.53	0.11	4.52	6.12	3.53	2.04	0.22	1.05	98.98	16.7	170.0	165.0	22.0	68.0	52.0	730.0	15.8	125.0	6.5	970	20.50	39.00	21.50	4.25	1.08	5.55	3.00	1.40	1.36	5.25
	44B	58.30	0.76	16.65	6.25	0.10	4.57	6.25	3.66	1.95	0.22	1.12	98.71	16.2	165.0	180.0	22.0	75.0	46.0	780.0	14.5	120.0	6.4	920	19.00	37.00	18.50	3.80	1.03	3.40	2.50	1.35	1.21	5.00
	44C	62.00	0.62	16.60	5.25	0.10	2.90	5.05	4.10	2.29	0.22	1.02	99.13	11.7	122.0	92.0	14.0	35.0	56.5	790.0	15.6	132.0	7.4	1090	24.50	48.00	24.50	4.45	1.09	3.65	2.70	1.40	1.37	5.85
	44D	59.00	0.77	16.90	6.10	0.10	4.25	5.92	3.64	1.90	0.23	1.46	98.81	16.0	168.0	155.0	21.0	60.0	44.5	745.0	15.5	140.0	6.9	1000	20.70	40.00	20.50	4.15	1.09	3.65	2.80	1.40	1.32	5.70
	44E	62.00	0.62	16.55	5.23	0.10	2.77	5.00	3.90	2.28	0.23	1.45	98.68	11.0	115.0	82.0	14.0	32.0	55.0	805.0	15.0	132.0	7.1	1040	24.50	46.00	24.50	4.50	1.08	3.50	2.65	1.40	1.34	6.00
	44G	62.50	0.62	16.40	5.26	0.10	2.86	5.00	3.95	2.25	0.22	1.10	99.16	11.0	115.0	85.0	14.0	34.0	56.5	785.0	14.8	132.0	7.5	1070	23.50	44.50	23.00	4.35	1.07	3.20	2.55	1.40	1.34	6.00
	45	60.85	0.64	16.30	5.10	0.09	2.96	5.10	3.60	2.15	0.23	2.92	97.02	12.5	125.0	100.0	16.0	39.0	57.0	770.0	14.0	126.0	7.1	1000	21.50	42.00	20.50	3.75	1.03	3.20	2.50	1.30	1.25	5.70
	46A	60.40	0.66	16.25	5.75	0.10	3.48	5.40	3.87	2.11	0.22	1.40	98.24	13.4	140.0	105.0	18.0	43.0	51.5	745.0	14.4	132.0	6.8	980	20.80	40.00	21.00	3.90	1.02	3.40	2.50	1.30	1.26	5.70
	46B	58.40	0.74	16.15	6.68	0.24	4.26	6.00	3.36	1.92	0.24	1.88	97.99	15.6	150.0	154.0	27.0	67.0	58.0	736.0	15.5	120.0	6.6	1060	19.80	37.50	20.50	4.10	1.07	3.30	2.70	1.45	1.35	5.20
	55B	59.00	0.78	15.90	6.80	0.11	4.50	5.85	3.40	1.86	0.22	1.39	98.42	14.8	168.0	170.0	24.0	65.0	52.0	645.0	15.2	132.0	6.6	840	18.00	37.00	19.00	3.85	1.05	3.70	2.85	1.35	1.33	5.55
	55C	58.90	0.73	15.85	6.41	0.11	4.35	6.00	3.25	2.12	0.21	1.71	97.93	13.8	165.0	165.0	22.0	64.0	59.0	700.0	14.5	128.0	6.4	953	20.00	40.00	20.00	4.00	1.03	3.65	2.55	1.40	1.30	5.25
	56B	60.00	0.75	16.40	5.88	0.10	3.98	5.85	3.80	2.13	0.21	0.88	99.10	13.5	145.0	135.0	20.5	52.0	53.0	688.0	14.8	130.0	6.2	982	19.50	37.00	20.00	4.00	1.04	3.85	2.65	1.40	1.32	5.55
	57B	58.50	0.77	16.23	6.60	0.11	4.43	6.30	3.70	1.92	0.23	1.10	98.79	15.0	165.0	160.0	23.5	66.0	49.0	730.0	14.8	125.0	6.4	935	20.00	40.00	19.00	4.05	1.11	3.75	2.60	1.40	1.32	5.05
	57C	59.65	0.73	16.28	6.24	0.10	3.81	5.84	3.82	2.00	0.21	0.98	98.68	13.8	150.0	140.0	22.0	52.0	53.0	680.0	14.2	130.0	5.8	975	19.00	37.00	19.00	3.70	1.08	3.50	2.50	1.30	1.24	5.50
	57D	58.15	0.76	16.25	6.56	0.11	4.64	6.20	3.62	1.97	0.21	1.03	98.47	16.0	165.0	185.0	23.0	71.0	47.5	740.0	14.8	125.0	5.9	950	20.00	36.50	19.00	4.15	1.06	3.65	2.60	1.40	1.30	5.20
	57F	57.40	0.84	15.78	7.27	0.12	5.55	6.70	3.61	1.81	0.25	0.47	99.33	17.0	180.0	210.0	27.0	85.0	42.0	755.0	16.0	110.0	6.0	880	19.00	37.00	20.00	4.00	1.13	3.80	2.80	1.40	1.33	4.80
	58C	60.40	0.60	16.10	4.88	0.06	2.27	4.18	4.05	2.16	0.25	4.33	94.95	9.7	110.0	70.0	15.0	32.0	61.0	690.0	14.4	140.0	7.8	1000	22.00	44.00	22.00	4.10	1.03	3.65	2.45	1.30	1.24	5.80
	120A	59.30	0.72	16.35	6.26	0.11	4.00	6.00	3.65	2.19	0.22	1.08	98.80	15.0	152.0	144.0	22.0	55.0	52.0	680.0	16.5	128.0	6.5	980	21.50	40.00	21.00	4.05	1.14	4.05	2.80	1.60	1.38	5.30
	120C	58.30	0.81	16.55	6.30	0.10	4.02	5.98	3.75	1.97	0.23	1.73	98.01	16.0	162.0	146.0	22.0	62.0	44.0	685.0	16.2	129.0	6.4	950	19.00	37.50	20.00	3.85	1.11	3.70	2.85	1.60	1.38	5.30
	121B	57.20	0.73	15.75	6.60	0.26	4.80	6.46	3.50	1.88	0.21	2.49	97.39	15.0	158.0	156.0	20.0	62.0	48.0	646.0	14.8	104.0	6.1	815	18.50	35.00	18.00	3.50	1.01	3.25	2.55	1.40	1.26	4.80
	122A	60.15	0.72	16.60	6.10	0.11	3.84	5.35	3.85	2.07	0.22	0.75	99.01	14.0	147.0	125.0	19.0	49.0	52.5	710.0	15.0	127.0	6.8	930	20.00	41.00	20.50	3.95	1.07	3.35	2.60	1.45	1.30	5.55
	124A	59.50	0.75	16.55	5.95	0.10	3.97	5.65	3.62	2.01	0.21	1.34	98.31	14.5	142.0	142.0	20.0	53.0	52.5	675.0	15.8	130.0	6.7	960	21.00	40.50	21.00	4.15	1.14	3.85	2.90	1.60	1.40	5.50
	124B	59.50	0.76	16.85	6.35	0.10	3.87	5.52	3.83	2.04	0.21	0.40	99.03	14.5	160.0	139.0	20.0	52.0	53.0	685.0	15.6	130.0	6.7	950	21.00	40.50	22.00	4.40	1.18	3.90	2.95	1.50	1.34	5.65
	125	60.50	0.67	16.80	5.62	0.11	3.28	5.16	3.94	2.24	0.23	1.05	98.55	12.4	132.0	104.0	16.0	41.0	55.0	780.0	15.4	130.0	7.1	1050	22.00	44.50	21.40	4.20	1.08	3.45	2.65	1.45	1.32	5.85
	126A	61.60	0.62	16.70	5.17	0.10	2.81	4.96	4.01	2.46	0.23	1.12	98.66	11.0	116.0	87.0	15.0	33.0	59.0	802.0	15.7	135.0	7.2	1160	24.00	47.00	22.50	4.25	1.13	3.45	2.60	1.60	1.36	6.15
	127A	62.70	0.63	16.85	5.34	0.10	2.70	4.79	4.23	2.36	0.23	1.10	99.93	11.0	122.0	92.0	15.0	34.0	58.0	800.0	14.6	140.0	7.5	1140	23.80	48.00	22.00	4.20	1.09	3.35	2.50	1.45	1.30	6.20
	128	58.40	0.75	16.25	6.50	0.12	4.45	6.30	3.76	1.95	0.23	1.14	98.71	18.0	167.0	170.0	24.0	68.0	48.0	740.0	15.0	120.0	6.5	975	19.50	39.50	20.00	4.05	1.07	3.55	2.65	1.40	1.27	5.20
	129	60.00	0.68	16.35	5.63	0.10	3.43	5.50	3.63	2.30	0.23	1.64	97.85	14.0	144.0	117.0	19.0	44.0	54.0	740.0	14.8	132.0	7.0	1050	21.50	42.00	20.50	4.25	1.07	3.40	2.65	1.50	1.31	5.60
	130A	60.20	0.71	16.20	5.90	0.10	3.68	5.80	3.80	2.20	0.23	1.01	98.82	14.5	163.0	135.0	21.0	49.0	54.5	694.0	16.5	132.0	6.8	1050	22.00	43.00	22.00	4.40	1.11	3.70	2.90	1.55	1.39	5.70
	130B	61.00	0.67	16.30	5.60	0.10	3.40	5.40	3.95	2.16	0.23	0.98	98.81	13.0	144.0	110.0	18.0	41.0	54.5	738.0	14.5	132.0	7.0	1010	21.00	42.00	20.50	3.90	1.03	3.35	2.55	1.40	1.28	5.80
131A	57.50	0.83	16.38	6.90	0.11	4.62	6.50	3.70	1.90	0.25	0.93	98.69	17.5	178.0	162.0	24.0	68.0	45.5	698.0	17.5	132.0	7.3	860	19.50	40.00	21.00	4.35	1.14	3.90	3.00	1.65	1.45	5.20	
131C	58.80	0.79	16.65	6.29	0.10	4.04	6.24	3.70	2.02	0.23	0.79	98.86	16.0	167.0	130.0	22.0	57.0	51.5	685.0	16.6	130.0	6.8	925	20.00	40.00	20.50	4.15	1.12	3.80	2.90	1.50	1.39	5.55	
RIOLITAS DE COLLANES	9	67.00	0.36	15.15	3.14	0.08	1.05	3.08	4.00	2.71	0.12	3.06	96.69	3.7	49.0	6.0	5.0	4.0	74.0	476.0	9.8	1000	7.4	1190	22.50	45.00	18.50	3.00	0.77	2.45	1.60	0.90	0.88	5.50
	92	68.10	0.34	14.95	2.80	0.07	0.84	2.75	4.00	2.72	0.12	3.08	96.69	2.8	39.0	5.0	4.5	4.0	77.0	450.0	8.9	74.0	7.5	1210	23.00	41.50	16.50	2.90	0.74	2.60	1.60	0.80	0.74	8.70
	49B	73.50	0.18	14.35	1.45	0.06	0.33	1.55	4.11	3.52	0.05	0.52	99.10	2.3	15.0	3.0	1.5	2.5	128.0	320.0	11.8	120.0	10.0	1010	24.80	46.00	18.50	3.25	0.60	2.20	1.85	1.10	1.13	13.10
	49F	73.60	0.18	14.22	1.08	0.02	0.18	1.41	3.87	3.85	0.05	0.82	98.46	2.5	12.0	3.0	0.5	2.0	146.0	310.0	10.0	114.0	9.8	1020	25.00	43.00	15.60	3.05	0.65	2.80	1.80	0.90	0.93	12.70
	52C	72.50	0.18	14.00	1.45	0.06	0.33	1.46	3.95	3.60	0.05	1.76	97.58	2.6	13.0	2.5	1.0	2.0	128.0	310.0	11.5	127.0	9.1	970	24.50	44.50	17.00	2.90	0.61	2.60	1.90	1.00	1.10	12.80
	52D	73.00	0.18	14.00	1.44	0.06	0.32	1.50	4.00	3.65	0.05	1.65	98.20	2.6	13.0	2.5	2.0	2.0	128.0	312.0	11.5	138.0	9.5	1020	24.50	40.50								

Anexo 2. Análisis mineralógico de microsonda electrónica

Unidad	Muestra	Mineral	SiO2	TiO2	Al2O3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	Cr2O3	P2O5	NiO	Total	
PLAGIOCLASA	BRECHAS DE COLLANES	125	plg-1	54.33	0.02	28.33	0.38	0.01	0.05	10.92	5.21	0.27	0.01	0.07	0.00	99.59
		125	plg-1	54.95	0.03	27.81	0.61	0.00	0.07	11.06	5.16	0.37	0.00	0.04	0.00	100.09
		125	plg-2	54.60	0.00	28.45	0.45	0.00	0.04	11.10	5.16	0.33	0.00	0.02	0.00	100.16
		125	plg-2	55.28	0.05	27.23	0.58	0.00	0.05	10.23	5.61	0.42	0.02	0.04	0.00	99.50
		125	plg-3	56.73	0.08	26.39	1.03	0.00	0.09	9.40	6.19	0.53	0.04	0.05	0.00	100.53
		128	plg-1	56.47	0.01	27.32	0.65	0.01	0.10	10.34	5.72	0.44	0.00	0.00	0.00	101.06
		128	plg-1	55.88	0.03	26.98	0.60	0.00	0.06	9.88	5.52	0.49	0.00	0.07	0.00	99.51
		128	plg-1	55.77	0.08	27.68	0.62	0.00	0.08	10.56	5.50	0.39	0.00	0.08	0.01	100.77
		128	plg-1	54.29	0.07	28.23	0.68	0.01	0.12	11.51	4.89	0.32	0.04	0.03	0.00	100.20
		128	plg-2	56.16	0.10	26.91	1.04	0.00	0.04	9.60	6.04	0.44	0.00	0.02	0.00	100.35
		128	plg-3	56.48	0.06	26.52	0.98	0.01	0.06	9.58	5.97	0.38	0.00	0.02	0.00	100.06
		120A	plg-1	55.69	0.08	26.76	0.41	0.03	0.03	9.66	5.85	0.52	0.00	0.00	0.01	99.04
		120A	plg-1	56.05	0.10	26.79	0.64	0.01	0.07	9.47	5.98	0.46	0.08	0.09	0.00	99.75
		120A	plg-2	54.42	0.05	27.97	0.56	0.02	0.09	11.02	5.22	0.38	0.00	0.00	0.01	99.73
		120A	plg-2	54.74	0.01	26.98	0.68	0.00	0.09	10.32	5.51	0.47	0.00	0.02	0.01	98.83
		120A	plg-3	55.70	0.05	28.35	0.30	0.00	0.06	11.01	5.12	0.39	0.04	0.00	0.00	101.01
		120A	plg-3	55.59	0.05	27.41	0.72	0.02	0.07	10.66	5.35	0.41	0.00	0.05	0.00	100.33
		120A	plg-4	56.37	0.02	27.75	0.52	0.01	0.05	10.30	5.50	0.51	0.00	0.02	0.00	101.05
		120A	plg-4	55.35	0.05	27.37	0.63	0.00	0.09	10.65	5.29	0.41	0.01	0.04	0.00	99.87
		120A	plg-5	55.32	0.10	26.29	0.84	0.00	0.09	9.60	5.44	0.68	0.02	0.03	0.02	98.44
		120A	plg-6	57.61	0.33	24.57	1.45	0.05	0.18	8.51	5.73	0.84	0.01	0.01	0.00	99.29
		120A	plg-7	56.59	0.08	26.59	0.88	0.00	0.14	9.78	5.66	0.58	0.01	0.00	0.00	100.30
		124A	plg-1	57.60	0.09	25.75	0.87	0.00	0.08	8.90	6.17	0.63	0.01	0.08	0.02	100.18
		124A	plg-2	55.74	0.04	27.37	0.62	0.01	0.08	10.18	5.74	0.39	0.04	0.02	0.02	100.25
		124A	plg-2	56.80	0.02	26.78	0.52	0.03	0.06	9.50	5.74	0.50	0.00	0.00	0.00	99.94
		124A	plg-2	54.80	0.04	28.11	0.66	0.02	0.07	11.22	5.10	0.39	0.03	0.07	0.00	100.50
		124A	plg-5	54.13	0.04	28.57	0.51	0.03	0.08	11.58	4.96	0.32	0.00	0.00	0.00	100.21
		124A	plg-5	55.45	0.04	28.45	0.68	0.00	0.02	11.02	5.23	0.38	0.00	0.00	0.00	101.27
		130A	plg-1	54.84	0.06	27.83	0.59	0.02	0.06	11.01	5.34	0.32	0.00	0.06	0.01	100.13
		130A	plg-1	53.76	0.04	28.16	0.76	0.00	0.07	11.24	4.96	0.31	0.04	0.04	0.01	99.39
		131C	plg-1	53.60	0.05	28.57	0.58	0.00	0.06	11.83	4.64	0.36	0.04	0.02	0.01	99.75
		131C	plg-1	51.38	0.03	30.09	0.71	0.00	0.07	13.78	3.83	0.23	0.00	0.02	0.02	100.14
		131C	plg-2	53.81	0.08	28.40	0.63	0.01	0.10	11.48	4.77	0.34	0.00	0.05	0.01	99.68
		131C	plg-2	53.22	0.08	29.02	0.62	0.01	0.10	12.24	4.29	0.32	0.01	0.00	0.01	99.93
		131C	plg-2	52.19	0.05	29.42	0.68	0.02	0.07	12.99	4.14	0.30	0.00	0.04	0.00	99.90
		131C	plg-3	54.36	0.08	28.36	0.62	0.00	0.06	11.27	4.91	0.40	0.00	0.00	0.00	100.06
		131C	plg-3	53.81	0.06	28.60	0.62	0.00	0.07	11.64	4.58	0.35	0.00	0.09	0.01	99.85
		131C	plg-3	52.14	0.03	28.80	0.75	0.00	0.08	12.81	4.15	0.28	0.00	0.03	0.03	99.10
		131C	plg-4	53.89	0.04	28.56	0.64	0.02	0.10	11.82	4.28	0.33	0.00	0.03	0.01	99.72
		131C	plg-4	50.79	0.07	30.40	0.73	0.00	0.07	14.07	3.53	0.19	0.03	0.00	0.00	99.87
		131C	plg-5	56.05	0.15	26.86	1.01	0.03	0.07	9.82	5.73	0.54	0.00	0.00	0.01	100.27
		44A	plg-1	55.42	0.04	26.73	0.58	0.03	0.07	10.19	5.53	0.38	0.00	0.00	0.03	98.98
		44A	plg-1	53.90	0.13	28.01	0.64	0.02	0.09	11.41	4.86	0.36	0.00	0.02	0.00	99.43
		44A	plg-2	56.03	0.07	27.33	0.63	0.04	0.05	10.03	5.46	0.53	0.00	0.00	0.00	100.17
		44A	plg-2	55.39	0.05	27.19	0.65	0.00	0.05	10.60	5.43	0.50	0.03	0.04	0.00	99.93
		44A	plg-3	52.72	0.05	29.21	0.74	0.01	0.08	12.39	4.36	0.31	0.03	0.01	0.01	99.91
		44A	plg-3	54.61	0.06	27.79	0.66	0.00	0.10	11.18	5.04	0.35	0.02	0.07	0.00	99.87
		44A	plg-4	56.08	0.05	26.77	0.62	0.02	0.09	10.24	5.60	0.46	0.01	0.08	0.00	100.01
		44A	plg-4	55.54	0.09	27.01	0.76	0.04	0.09	10.27	5.46	0.50	0.00	0.03	0.03	99.82
		44A	plg-5	53.17	0.02	28.40	0.69	0.01	0.07	11.63	4.79	0.34	0.05	0.01	0.01	99.19
		44A	plg-5	54.51	0.06	27.13	0.80	0.01	0.09	10.46	5.34	0.43	0.00	0.00	0.00	98.82
		44A	plg-6	55.35	0.09	26.70	0.95	0.04	0.11	10.15	5.56	0.57	0.00	0.10	0.00	99.62
		44A	plg-7	57.86	0.14	24.64	1.16	0.01	0.14	8.16	6.23	0.87	0.01	0.11	0.01	99.35
		44G	plg-1	58.34	0.01	26.00	0.66	0.00	0.03	8.07	6.71	0.41	0.00	0.07	0.00	100.29
44G	plg-2	60.58	0.18	23.53	0.95	0.00	0.10	6.78	7.14	0.81	0.00	0.01	0.00	100.06		
44G	plg-4	56.82	0.00	28.12	0.31	0.01	0.01	10.19	5.55	0.39	0.00	0.00	0.00	101.41		
44G	plg-4	55.13	0.05	28.14	0.62	0.00	0.05	10.69	5.22	0.36	0.02	0.01	0.00	100.28		
46A	plg-1	56.70	0.00	26.63	0.56	0.00	0.08	9.27	6.04	0.45	0.01	0.04	0.00	99.77		
46A	plg-1	54.24	0.05	27.78	0.68	0.03	0.07	11.51	5.05	0.33	0.04	0.00	0.02	99.80		
46A	plg-2	55.57	0.03	27.33	0.56	0.00	0.05	10.28	5.58	0.38	0.02	0.03	0.00	99.83		
46A	plg-2	54.15	0.07	27.83	0.76	0.01	0.06	11.51	5.09	0.31	0.00	0.06	0.00	99.85		
46A	plg-3	54.88	0.05	27.81	0.49	0.00	0.07	11.21	5.22	0.32	0.01	0.00	0.00	100.06		
46A	plg-3	54.64	0.08	27.84	0.72	0.00	0.07	11.18	5.12	0.29	0.00	0.00	0.01	99.96		
46A	plg-4	54.11	0.02	28.34	0.41	0.00	0.06	10.99	5.23	0.30	0.00	0.11	0.00	99.57		
46A	plg-4	54.02	0.06	27.99	0.81	0.00	0.10	11.28	4.93	0.30	0.03	0.02	0.01	99.55		
46A	plg-5	55.04	0.02	27.50	0.33	0.00	0.04	10.25	5.66	0.44	0.00	0.03	0.03	99.35		
46A	plg-5	53.93	0.03	27.97	0.70	0.00	0.07	11.33	4.95	0.30	0.00	0.00	0.00	99.29		
57F	plg-1	56.64	0.12	26.53	0.89	0.05	0.11	9.72	5.78	0.57	0.00	0.04	0.01	100.46		
57F	plg-2	54.67	0.05	27.90	0.76	0.00	0.09	11.59	5.02	0.35	0.00	0.04	0.00	100.46		
57F	plg-4	52.76	0.00	28.93	0.68	0.02	0.07	12.61	4.28	0.26	0.03	0.00	0.00	99.64		
57F	plg-4	54.89	0.11	27.59	0.64	0.03	0.12	11.28	5.26	0.40	0.00	0.07	0.00	100.37		
57F	plg-5	52.81	0.07	28.74	0.62	0.00	0.09	12.37	4.47	0.29	0.00	0.10	0.00	99.56		
57F	plg-5	54.05	0.00	28.47	0.79	0.00	0.08	11.57	4.88	0.36	0.00	0.04	0.02	100.27		
57F	plg-6	54.08	0.00	28.57	0.61	0.01	0.06	11.74	4.82	0.42	0.01	0.07	0.01	100.40		
57F	plg-6	57.47	0.19	25.46	1.02	0.00	0.08	9.33	5.12	1.73	0.00	0.06	0.00	100.45		

Unidad	Muestra	Mineral	PLAGIOCLASA													Total
			SiO2	TiO2	Al2O3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	Cr2O3	P2O5	NiO		
	34	plg-1	53.82	0.01	28.57	0.48	0.01	0.06	12.03	4.72	0.26	0.03	0.06	0.00	100.03	
	34	plg-1	54.25	0.00	28.62	0.53	0.04	0.03	11.26	4.63	0.25	0.00	0.04	0.02	99.66	
	34	plg-2	53.63	0.06	28.10	0.49	0.01	0.07	11.78	4.98	0.22	0.01	0.00	0.00	99.36	
	34	plg-2	53.47	0.02	28.44	0.57	0.00	0.04	11.60	4.81	0.31	0.03	0.03	0.00	99.32	
	35	plg-1	52.15	0.10	28.87	1.03	0.02	0.09	12.32	4.33	0.39	0.00	0.02	0.02	99.34	
	35	plg-2	47.86	0.06	32.39	0.68	0.02	0.07	16.21	2.52	0.18	0.02	0.00	0.00	100.01	
	35	plg-2	50.90	0.06	30.27	0.77	0.00	0.15	14.25	3.53	0.17	0.00	0.02	0.03	100.15	
	35	plg-3	47.67	0.04	32.08	0.59	0.01	0.09	16.07	2.55	0.16	0.06	0.05	0.00	99.35	
	35	plg-3	51.95	0.03	29.41	0.91	0.02	0.15	12.67	4.18	0.27	0.00	0.00	0.00	99.59	
	35	plg-4	51.42	0.09	29.57	0.72	0.02	0.10	13.14	4.15	0.28	0.01	0.00	0.02	99.52	
	35	plg-5	52.36	0.11	29.24	0.98	0.00	0.25	12.91	4.25	0.23	0.00	0.00	0.01	100.34	
	35	plg-6	52.15	0.10	28.90	0.90	0.03	0.26	12.83	4.21	0.21	0.05	0.09	0.00	99.70	
	35	plg-7	51.97	0.13	29.75	1.05	0.02	0.11	13.25	4.06	0.18	0.00	0.02	0.00	100.55	
	38	plg-1	56.59	0.09	27.01	0.55	0.05	0.07	9.56	5.84	0.65	0.00	0.00	0.00	100.40	
	38	plg-2	54.47	0.12	28.61	0.55	0.00	0.05	11.48	4.92	0.46	0.03	0.00	0.00	100.69	
	38	plg-2	53.86	0.03	28.17	0.76	0.02	0.08	11.49	5.06	0.42	0.00	0.07	0.00	99.95	
	38	plg-3	55.70	0.04	27.57	0.53	0.00	0.04	10.29	5.62	0.56	0.00	0.02	0.01	100.38	
	38	plg-3	55.13	0.10	27.82	0.83	0.03	0.07	10.89	5.18	0.46	0.00	0.00	0.02	100.53	
	40	plg-1	50.30	0.06	31.84	0.66	0.01	0.05	14.86	2.96	0.16	0.00	0.03	0.00	100.94	
	40	plg-1	48.68	0.07	33.20	0.67	0.00	0.08	16.27	2.41	0.12	0.01	0.00	0.00	101.51	
	40	plg-1	53.94	0.02	29.29	0.80	0.00	0.08	12.34	4.60	0.26	0.01	0.00	0.00	101.31	
	40	plg-2	53.38	0.05	29.48	0.70	0.01	0.10	12.30	4.61	0.37	0.01	0.11	0.00	101.11	
	40	plg-3	53.78	0.01	29.20	0.83	0.01	0.12	12.04	4.74	0.29	0.00	0.04	0.02	101.07	
	40	plg-3	60.77	0.93	19.88	3.70	0.05	0.59	5.17	5.74	2.30	0.01	0.38	0.00	99.50	
	40	plg-4	56.06	0.14	27.33	0.88	0.04	0.11	9.95	5.63	0.59	0.00	0.02	0.02	100.79	
	40	plg-5	53.54	0.07	29.55	0.56	0.02	0.06	12.03	4.69	0.24	0.00	0.12	0.00	100.88	
	40	plg-5	52.42	0.10	30.09	0.76	0.00	0.08	12.94	4.25	0.26	0.02	0.00	0.04	100.95	
	40	plg-6	52.83	0.07	29.85	0.54	0.02	0.09	12.92	4.45	0.20	0.00	0.00	0.00	100.96	
	40	plg-6	54.29	0.04	29.27	0.67	0.00	0.10	11.75	4.82	0.31	0.00	0.12	0.02	101.40	
	41	plg-1	47.84	0.00	32.20	0.55	0.03	0.06	16.09	2.48	0.09	0.03	0.03	0.00	99.40	
	41	plg-1	49.73	0.05	30.22	0.51	0.00	0.06	14.01	3.25	0.16	0.02	0.02	0.02	98.05	
	41	plg-3	51.56	0.02	30.68	0.52	0.00	0.05	14.03	3.60	0.17	0.01	0.06	0.02	100.72	
	41	plg-3	50.86	0.05	30.57	0.57	0.04	0.06	13.37	3.78	0.18	0.01	0.00	0.00	99.48	
	41	plg-4	53.06	0.04	29.07	0.75	0.01	0.08	12.12	4.44	0.30	0.00	0.00	0.01	99.88	
	41	plg-5	53.95	0.07	28.97	0.90	0.04	0.05	12.07	4.46	0.39	0.00	0.00	0.01	100.90	
	41	plg-5	59.78	0.22	22.70	1.09	0.00	0.05	5.52	7.26	1.62	0.01	0.12	0.01	98.38	
	31B	plg-1	55.60	0.05	27.82	0.42	0.03	0.04	10.52	5.27	0.44	0.02	0.04	0.00	100.24	
	31B	plg-1	54.05	0.04	28.53	0.68	0.03	0.02	11.62	4.74	0.40	0.01	0.05	0.00	100.17	
	31B	plg-2	54.66	0.06	28.43	0.47	0.00	0.03	11.72	4.77	0.32	0.00	0.02	0.00	100.47	
	31B	plg-2	54.22	0.02	28.53	0.53	0.08	0.03	11.45	4.90	0.35	0.00	0.07	0.01	100.20	
	31B	plg-3	55.13	0.06	28.13	0.46	0.00	0.06	11.18	5.08	0.30	0.00	0.03	0.03	100.46	
	31B	plg-3	55.12	0.03	28.17	0.56	0.00	0.04	10.98	4.96	0.39	0.00	0.00	0.03	100.27	
	33A	plg-1	52.77	0.04	28.99	0.48	0.01	0.07	12.76	4.33	0.23	0.00	0.01	0.02	99.70	
	33A	plg-1	53.43	0.00	28.47	0.53	0.02	0.06	12.37	4.49	0.18	0.00	0.01	0.00	99.57	
	33A	plg-2	52.32	0.05	28.91	0.54	0.03	0.06	12.90	4.19	0.21	0.00	0.07	0.00	99.27	
	33A	plg-2	53.78	0.01	28.22	0.60	0.00	0.05	11.66	4.82	0.30	0.02	0.07	0.00	99.53	
	33A	plg-3	52.64	0.00	29.15	0.56	0.03	0.05	12.85	4.25	0.18	0.01	0.05	0.01	99.78	
	33A	plg-3	53.52	0.02	29.01	0.57	0.00	0.09	12.07	4.53	0.24	0.00	0.01	0.00	100.04	
	33A	plg-4	56.80	0.09	26.39	0.97	0.03	0.06	9.45	5.89	0.65	0.02	0.09	0.04	100.45	
	33A	plg-5	56.61	0.10	25.76	1.40	0.03	0.70	9.51	5.62	0.50	0.00	0.14	0.04	100.42	
	36B	plg-1	48.62	0.00	32.14	0.67	0.00	0.07	16.29	2.41	0.14	0.02	0.00	0.01	100.36	
	36B	plg-1	51.61	0.00	29.48	0.83	0.00	0.10	13.38	3.98	0.15	0.01	0.07	0.00	99.62	
	36B	plg-2	48.18	0.04	32.18	0.60	0.04	0.09	16.39	2.39	0.09	0.00	0.02	0.02	100.03	
	36B	plg-2	52.67	0.06	29.57	0.79	0.00	0.12	13.12	4.38	0.20	0.00	0.03	0.01	100.96	
	36B	plg-3	50.07	0.05	31.54	0.67	0.00	0.08	15.16	3.27	0.10	0.00	0.02	0.00	100.96	
	36B	plg-3	49.22	0.00	32.37	0.75	0.00	0.09	15.85	2.76	0.17	0.00	0.02	0.00	101.22	
	36B	plg-4	57.27	0.12	26.31	1.29	0.00	0.14	9.42	6.06	0.57	0.01	0.06	0.02	101.27	
	36B	plg-5	53.41	0.06	28.64	1.04	0.03	0.11	12.55	4.48	0.36	0.03	0.03	0.00	100.74	
	39A	plg-1	56.15	0.10	26.32	0.43	0.00	0.03	8.78	6.06	0.81	0.00	0.02	0.00	98.69	
	39A	plg-2	48.26	0.04	31.65	0.62	0.00	0.05	15.42	2.80	0.08	0.01	0.00	0.00	98.94	
	39A	plg-2	48.77	0.04	31.09	0.60	0.00	0.04	15.07	3.01	0.19	0.00	0.00	0.00	98.81	
	39A	plg-3	49.73	0.03	31.97	0.57	0.00	0.06	15.05	3.04	0.11	0.02	0.06	0.00	100.63	
	39A	plg-3	53.81	0.02	27.57	0.82	0.00	0.07	10.84	5.18	0.37	0.00	0.00	0.01	98.70	
	39A	plg-4	56.60	0.12	26.20	0.98	0.02	0.05	9.20	6.16	0.47	0.01	0.02	0.00	99.84	
	39A	plg-5	54.14	0.09	27.86	0.84	0.04	0.05	11.05	4.54	0.39	0.00	0.05	0.00	99.06	
	39A	plg-6	55.68	0.13	27.41	1.08	0.00	0.04	10.35	5.54	0.49	0.02	0.02	0.00	100.74	

Unidad	Muestra	Mineral	SiO2	TiO2	Al2O3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	Cr2O3	P2O5	NiO	Total	
	PLAGIOCLASA	RIOLITA DE COLLANES														
145		plg-1	58.255	0.008	25.492	0.369	0.000	0.015	8.059	6.531	0.578	0.015	0.101	0.000	99.427	
145		plg-2	56.888	0.070	26.310	0.417	0.022	0.010	8.797	6.263	0.345	0.000	0.000	0.000	99.125	
145		plg-3	55.033	0.018	27.950	0.449	0.000	0.020	10.846	5.234	0.307	0.000	0.007	0.000	99.870	
145		plg-4	57.354	0.037	26.703	0.238	0.039	0.007	9.064	6.338	0.383	0.000	0.069	0.009	100.245	
145		plg-4	57.275	0.007	26.463	0.274	0.035	0.018	8.879	6.498	0.398	0.000	0.000	0.000	99.851	
145		plg-5	57.684	0.002	26.569	0.224	0.000	0.000	8.937	6.419	0.341	0.000	0.016	0.000	100.194	
145		plg-5	56.858	0.015	26.460	0.259	0.018	0.008	8.879	6.412	0.377	0.000	0.000	0.000	99.289	
52E		plg-1	56.635	0.007	26.817	0.242	0.001	0.000	9.243	6.434	0.334	0.000	0.032	0.050	99.796	
52E		plg-1	57.966	0.013	26.448	0.320	0.010	0.017	8.555	6.486	0.401	0.000	0.000	0.000	100.221	
52E		plg-2	57.741	0.065	26.146	0.324	0.015	0.013	8.443	6.690	0.402	0.000	0.078	0.005	99.927	
52E		plg-2	57.780	0.000	26.163	0.229	0.008	0.010	8.780	6.550	0.425	0.001	0.007	0.004	99.961	
137		plg-1	59.849	0.065	24.502	0.515	0.000	0.020	6.467	7.666	0.564	0.020	0.030	0.003	99.703	
137		plg-2	61.081	0.017	23.752	0.395	0.000	0.012	5.370	8.386	0.534	0.010	0.062	0.000	99.621	
137		plg-3	53.685	0.028	28.755	0.455	0.000	0.056	11.749	4.696	0.360	0.000	0.037	0.000	99.828	
137		plg-4	55.283	0.073	27.761	0.471	0.001	0.032	10.720	5.386	0.334	0.000	0.000	0.010	100.076	
137		plg-5	60.901	0.127	23.956	0.736	0.014	0.010	6.314	8.065	0.452	0.000	0.016	0.011	100.606	
137		plg-6	58.773	0.088	25.479	0.426	0.030	0.023	7.744	6.833	0.737	0.016	0.000	0.000	100.152	
137	plg-7	53.258	0.105	29.165	0.497	0.026	0.020	12.152	4.641	0.332	0.000	0.016	0.006	100.221		
137	plg-8	54.828	0.042	27.720	0.560	0.000	0.046	10.478	5.245	0.685	0.000	0.082	0.000	99.691		
137	plg-9	55.395	0.088	28.041	0.482	0.000	0.018	11.000	5.221	0.420	0.022	0.007	0.000	100.699		

Unidad	Muestra	Mineral	SiO2	TiO2	Al2O3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	Cr2O3	P2O5	NiO	Total	
	CLINOPIROXENO	GABRO - DIORITA														
137		cpx-1	53.38	0.20	0.61	8.27	0.34	15.00	22.02	0.33	0.03	0.00	0.00	0.00	100.17	
137		cpx-2	52.03	0.70	1.83	8.19	0.29	14.61	21.82	0.33	0.00	0.10	0.00	0.02	99.93	
137		cpx-3	53.51	0.01	0.34	6.49	0.32	15.63	23.60	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	100.21	
137		cpx-4	52.11	0.64	1.19	9.19	0.31	15.47	20.10	0.34	0.02	0.04	0.06	0.00	99.45	
137		cpx-5	51.39	0.91	2.07	9.31	0.32	15.67	19.51	0.37	0.01	0.09	0.10	0.01	99.76	
137		cpx-6	52.59	0.61	1.19	9.29	0.22	15.15	20.34	0.40	0.00	0.07	0.00	0.01	99.88	
137	cpx-7	52.43	0.68	1.35	9.73	0.36	15.25	20.13	0.36	0.02	0.01	0.00	0.04	100.35		

Unidad	Muestra	Mineral	SiO2	TiO2	Al2O3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	Cr2O3	P2O5	NiO	Total	
CLINOPIROXENO	BRECHAS DEL ALTAR	35	cpx-1	50.75	0.70	2.71	8.96	0.27	14.66	20.26	0.38	0.00	0.26	0.00	0.00	98.94
		35	cpx-1	50.09	1.15	3.30	9.22	0.24	14.28	20.38	0.39	0.01	0.08	0.00	0.03	99.17
		35	cpx-2	51.45	0.32	2.88	5.92	0.16	16.54	20.43	0.30	0.00	0.48	0.07	0.01	98.56
		35	cpx-2	51.87	0.35	2.97	5.65	0.11	16.64	20.41	0.30	0.00	0.52	0.10	0.02	98.94
		35	cpx-2	51.53	0.49	2.13	7.15	0.24	16.34	20.43	0.31	0.00	0.38	0.03	0.00	99.02
		35	cpx-3	51.85	0.29	2.61	6.09	0.16	16.68	20.43	0.29	0.00	0.34	0.00	0.00	98.75
		35	cpx-3	50.45	0.46	4.75	5.73	0.13	15.13	21.37	0.37	0.00	0.70	0.00	0.00	99.10
		35	cpx-4	49.93	0.83	3.70	7.92	0.19	14.67	20.61	0.32	0.00	0.48	0.02	0.00	98.66
		35	cpx-5	50.10	1.07	3.73	9.34	0.26	14.18	20.59	0.41	0.00	0.00	0.08	0.01	99.77
		35	cpx-6	52.35	0.52	1.85	7.59	0.22	16.59	19.91	0.29	0.00	0.23	0.00	0.00	99.56
		38	cpx-1	51.03	0.88	3.34	9.61	0.20	14.38	19.67	0.59	0.00	0.16	0.00	0.01	99.89
		38	cpx-1	51.28	0.81	2.85	8.81	0.25	14.92	20.55	0.38	0.01	0.04	0.00	0.01	99.91
		38	cpx-2	50.91	0.72	3.46	9.12	0.19	15.21	19.67	0.43	0.01	0.02	0.08	0.00	99.82
		38	cpx-2	50.75	0.80	2.97	8.77	0.26	15.13	20.93	0.32	0.02	0.02	0.08	0.00	100.06
		38	cpx-3	51.41	0.75	2.79	10.26	0.33	14.68	19.58	0.52	0.01	0.00	0.01	0.01	100.34
		40	cpx-1	51.00	0.85	3.85	9.67	0.25	14.57	19.37	0.61	0.00	0.07	0.00	0.03	100.27
		40	cpx-1	51.21	0.64	3.24	8.51	0.26	15.27	20.30	0.39	0.02	0.18	0.00	0.01	100.04
		40	cpx-2	50.48	0.88	4.01	8.61	0.23	14.70	20.07	0.47	0.00	0.08	0.02	0.04	99.59
		40	cpx-2	50.88	0.79	3.90	8.69	0.15	14.84	19.80	0.52	0.00	0.15	0.01	0.07	99.80
		40	cpx-3	50.58	0.77	3.57	8.93	0.24	15.04	19.12	0.60	0.00	0.12	0.07	0.00	99.05
		40	cpx-3	51.69	0.72	2.58	8.63	0.20	15.32	20.17	0.35	0.02	0.04	0.00	0.00	99.70
		40	cpx-4	50.76	0.74	1.35	15.13	0.50	18.28	10.98	0.44	0.08	0.02	1.74	0.00	100.04
		40	cpx-5	51.01	0.71	3.24	7.76	0.18	14.90	21.08	0.40	0.00	0.16	0.00	0.07	99.50
		40	cpx-5	51.39	0.84	2.93	8.43	0.24	15.28	20.85	0.38	0.02	0.04	0.00	0.01	100.39
		40	cpx-6	49.45	0.83	5.56	7.86	0.15	14.16	20.30	0.50	0.00	0.19	0.04	0.12	99.15
		40	cpx-6	51.04	0.57	3.25	8.66	0.23	14.99	20.10	0.51	0.00	0.11	0.00	0.08	99.52
		31B	cpx-1	52.72	0.30	1.45	8.46	0.46	15.13	20.87	0.35	0.01	0.01	0.00	0.01	99.77
		31B	cpx-1	51.24	0.64	2.93	9.50	0.36	14.87	19.78	0.36	0.01	0.01	0.03	0.00	99.73
		31B	cpx-2	51.87	0.44	2.15	9.22	0.37	14.71	20.42	0.53	0.00	0.03	0.06	0.01	99.82
		31B	cpx-2	51.64	0.56	2.62	8.70	0.36	14.76	20.78	0.46	0.04	0.03	0.00	0.03	99.98
		31B	cpx-3	52.11	0.60	2.38	8.69	0.38	14.79	20.81	0.40	0.00	0.00	0.05	0.00	100.20
		31B	cpx-3	50.96	0.68	3.28	9.80	0.34	14.16	20.31	0.40	0.00	0.00	0.10	0.00	100.04
		31B	cpx-4	52.59	0.41	1.46	8.51	0.41	15.22	20.54	0.27	0.00	0.00	0.02	0.00	99.44
		31B	cpx-4	51.97	0.54	2.27	8.73	0.35	14.80	20.31	0.41	0.02	0.00	0.04	0.00	99.44
		33A	cpx-1	51.05	0.59	4.35	6.47	0.15	15.17	21.41	0.43	0.01	0.74	0.00	0.01	100.36
		33A	cpx-1	52.07	0.52	3.27	6.24	0.19	15.87	20.99	0.36	0.00	0.16	0.00	0.05	99.71
		33A	cpx-2	50.22	0.76	4.11	10.10	0.37	13.66	19.87	0.49	0.00	0.02	0.06	0.01	99.69
		33A	cpx-2	50.32	0.72	4.40	9.79	0.27	13.61	20.28	0.45	0.00	0.03	0.03	0.00	99.93
		36B	cpx-1	50.15	0.98	3.97	9.00	0.28	14.87	20.47	0.44	0.00	0.04	0.01	0.00	100.21
		36B	cpx-1	50.63	0.72	4.25	8.12	0.18	14.49	21.57	0.40	0.00	0.09	0.09	0.01	100.56
		36B	cpx-2	52.34	0.49	2.52	8.82	0.23	15.54	20.11	0.40	0.00	0.06	0.00	0.01	100.54
		36B	cpx-2	50.30	0.86	4.43	8.34	0.19	14.65	20.78	0.43	0.04	0.12	0.07	0.00	100.22
		36B	cpx-3	50.61	1.06	2.83	11.45	0.31	14.80	18.34	0.38	0.00	0.02	0.07	0.02	99.89
36B	cpx-4	49.50	1.33	2.95	11.95	0.38	14.50	17.60	0.36	0.05	0.01	0.10	0.00	98.73		
39A	cpx-1	49.77	0.89	4.05	8.77	0.17	14.51	20.31	0.53	0.00	0.08	0.07	0.06	99.22		
39A	cpx-1	49.90	0.79	4.20	9.13	0.26	14.58	20.19	0.44	0.01	0.00	0.00	0.01	99.53		
39A	cpx-2	51.38	0.67	3.17	8.16	0.26	15.52	19.74	0.54	0.01	0.12	0.04	0.03	99.63		
39A	cpx-2	49.92	0.74	3.56	8.66	0.23	14.75	20.90	0.44	0.00	0.00	0.06	0.00	99.25		
39A	cpx-4	52.71	0.43	0.67	19.42	0.74	21.27	4.22	0.10	0.05	0.00	0.00	0.00	99.61		
39A	cpx-5	50.64	1.05	2.14	12.40	0.36	15.43	16.56	0.37	0.05	0.00	0.05	0.03	99.08		

Unidad	Muestra	Mineral	SiO2	TiO2	Al2O3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	Cr2O3	P2O5	NiO	Total
	125	cpx-1	52.33	0.30	2.18	5.15	0.13	17.18	21.07	0.31	0.04	0.67	0.06	0.04	99.46
	125	cpx-1	50.45	0.57	2.61	9.11	0.22	14.63	20.53	0.45	0.00	0.00	0.00	0.00	98.58
	125	cpx-2	50.99	0.53	2.59	8.88	0.34	14.50	20.89	0.18	0.02	0.14	0.00	0.03	99.10
	125	cpx-2	50.92	0.58	2.22	8.98	0.33	14.78	20.45	0.41	0.01	0.03	0.01	0.00	98.72
	128	cpx-1	51.56	0.54	2.07	9.58	0.29	15.34	20.09	0.39	0.01	0.02	0.00	0.03	99.91
	128	cpx-1	50.96	0.67	2.56	8.61	0.18	15.36	19.82	0.41	0.01	0.12	0.00	0.02	98.72
	128	cpx-2	52.48	0.48	2.08	9.14	0.37	15.46	20.17	0.43	0.03	0.00	0.00	0.02	100.68
	128	cpx-2	51.40	0.65	2.28	9.40	0.24	15.74	19.34	0.42	0.00	0.15	0.00	0.02	99.64
	128	cpx-2	52.64	0.31	2.17	6.79	0.18	17.45	19.17	0.27	0.03	0.51	0.00	0.06	99.56
	128	cpx-2	51.94	0.65	2.58	9.01	0.22	15.29	19.50	0.47	0.00	0.10	0.01	0.02	99.80
	128	cpx-3	52.33	0.58	1.02	13.90	0.47	15.06	16.42	0.28	0.04	0.04	0.05	0.02	100.23
	120A	cpx-1	51.01	0.55	2.51	9.24	0.30	14.61	20.35	0.43	0.00	0.12	0.01	0.01	99.16
	120A	cpx-1	50.78	0.78	2.54	10.39	0.23	14.39	19.33	0.43	0.00	0.09	0.03	0.00	98.99
	120A	cpx-2	52.08	0.58	2.01	9.15	0.27	15.02	20.08	0.40	0.00	0.03	0.04	0.01	99.68
	120A	cpx-2	51.16	0.73	2.86	8.88	0.24	15.04	20.22	0.39	0.00	0.16	0.00	0.05	99.73
	124A	cpx-1	51.01	0.70	3.24	7.52	0.16	15.15	20.49	0.44	0.00	0.19	0.02	0.01	98.93
	124A	cpx-1	52.80	0.39	2.92	6.09	0.13	16.54	21.14	0.35	0.00	0.28	0.01	0.01	100.67
	124A	cpx-2	52.01	0.43	2.11	8.98	0.31	15.14	20.26	0.45	0.01	0.01	0.04	0.07	99.81
	124A	cpx-2	51.42	0.68	2.56	9.88	0.29	14.25	19.98	0.45	0.03	0.10	0.00	0.00	99.64
	124A	cpx-3	51.72	0.57	1.95	9.01	0.28	15.24	20.08	0.39	0.00	0.03	0.00	0.05	99.33
	124A	cpx-3	51.35	0.64	2.38	8.52	0.26	15.28	20.52	0.32	0.03	0.09	0.01	0.03	99.41
	130A	cpx-1	50.57	0.61	2.94	9.09	0.28	14.59	20.68	0.48	0.00	0.11	0.01	0.02	99.38
	130A	cpx-1	50.90	0.57	1.88	9.50	0.26	15.01	20.02	0.36	0.00	0.01	0.00	0.05	98.56
	130A	cpx-2	51.76	0.50	2.17	9.10	0.29	14.86	19.93	0.48	0.00	0.00	0.00	0.02	99.13
	130A	cpx-2	51.16	0.63	2.32	9.63	0.30	14.46	19.76	0.48	0.00	0.00	0.05	0.01	98.80
	131C	cpx-1	50.87	0.58	2.11	8.85	0.26	15.31	19.95	0.39	0.00	0.13	0.04	0.00	98.48
	131C	cpx-1	51.39	0.62	2.30	8.74	0.22	15.41	19.90	0.37	0.01	0.15	0.02	0.05	99.19
	131C	cpx-1	50.87	0.84	2.44	11.65	0.26	14.62	18.77	0.39	0.00	0.04	0.03	0.00	99.91
	131C	cpx-1	50.95	0.74	2.78	9.25	0.20	14.98	20.24	0.35	0.04	0.09	0.09	0.04	99.74
	131C	cpx-2	49.87	0.80	3.42	9.58	0.22	14.52	20.13	0.39	0.01	0.23	0.06	0.03	99.25
	131C	cpx-2	52.19	0.45	1.83	9.10	0.27	15.77	19.74	0.30	0.00	0.04	0.06	0.03	99.79
	44A	cpx-1	50.70	0.81	2.73	9.13	0.22	14.95	20.00	0.41	0.00	0.12	0.07	0.00	99.13
	44A	cpx-2	52.31	1.01	2.88	15.68	0.33	16.25	10.40	0.40	0.46	0.03	0.22	0.00	99.96
	44A	cpx-3	50.31	0.72	2.77	9.65	0.22	15.01	19.80	0.50	0.00	0.17	0.04	0.03	99.21
	44A	cpx-3	50.53	0.79	2.86	10.82	0.30	14.09	18.84	0.57	0.00	0.09	0.00	0.03	98.93
	44A	cpx-4	51.47	0.45	2.10	9.69	0.36	14.93	19.87	0.47	0.00	0.10	0.03	0.00	99.46
	44A	cpx-4	50.71	0.67	2.58	9.36	0.26	14.86	19.65	0.45	0.00	0.18	0.00	0.03	98.76
	44A	cpx-5	50.51	0.66	2.14	10.07	0.31	14.78	19.54	0.46	0.01	0.06	0.07	0.03	98.67
	44A	cpx-5	50.34	0.73	2.72	10.77	0.28	14.48	18.76	0.56	0.02	0.14	0.00	0.02	98.81
	44A	cpx-6	50.29	0.77	2.65	9.04	0.22	14.74	19.74	0.42	0.02	0.09	0.00	0.03	97.99
	44A	cpx-7	50.92	0.63	2.66	9.58	0.27	14.85	19.85	0.45	0.00	0.05	0.04	0.00	99.30
	44A	cpx-7	51.97	0.40	1.95	7.46	0.22	16.90	19.79	0.34	0.01	0.29	0.06	0.05	99.45
	44G	cpx-1	51.44	0.38	2.10	9.42	0.40	14.44	20.52	0.48	0.01	0.00	0.04	0.04	99.26
	44G	cpx-1	51.30	0.60	2.50	8.96	0.32	14.65	20.94	0.43	0.04	0.07	0.00	0.01	99.82
	44G	cpx-2	52.73	0.31	2.48	5.80	0.19	16.40	21.27	0.39	0.00	0.65	0.04	0.02	100.28
	44G	cpx-2	50.65	0.58	2.54	9.35	0.34	14.42	20.53	0.52	0.01	0.02	0.00	0.02	98.97
	44G	cpx-3	52.46	0.58	1.04	10.33	0.50	15.24	19.52	0.44	0.07	0.02	0.00	0.00	100.21
	44G	cpx-4	49.66	1.04	3.04	10.81	0.45	13.77	19.39	0.43	0.05	0.00	0.09	0.01	98.73
	46A	cpx-1	51.48	0.55	2.28	9.20	0.33	14.62	20.33	0.33	0.00	0.03	0.01	0.04	99.21
	46A	cpx-1	51.77	0.49	1.83	9.08	0.28	15.81	19.84	0.35	0.02	0.01	0.06	0.00	99.53
	46A	cpx-2	50.90	0.47	2.74	9.13	0.39	14.39	21.07	0.47	0.00	0.08	0.00	0.02	99.67
	46A	cpx-2	51.06	0.65	2.55	9.11	0.24	15.07	20.35	0.42	0.02	0.09	0.00	0.00	99.57
	46A	cpx-3	50.65	0.58	2.13	9.30	0.34	14.58	20.36	0.44	0.00	0.02	0.01	0.03	98.45
	46A	cpx-3	51.35	0.62	2.31	10.09	0.32	14.67	18.82	0.46	0.00	0.03	0.00	0.03	98.70
	57F	cpx-1	51.34	0.70	2.99	8.79	0.28	14.83	20.19	0.45	0.00	0.16	0.03	0.00	99.76
	57F	cpx-1	51.41	0.76	1.90	12.19	0.37	16.26	16.39	0.31	0.01	0.08	0.01	0.01	99.68
	57F	cpx-2	51.04	0.61	3.29	9.46	0.23	14.75	19.45	0.49	0.01	0.21	0.01	0.02	99.58
	57F	cpx-2	51.20	0.44	4.62	6.60	0.14	15.60	20.40	0.51	0.02	0.53	0.00	0.03	100.09
	57F	cpx-2	51.44	0.83	2.35	10.58	0.28	14.97	18.34	0.36	0.02	0.08	0.02	0.02	99.30
	57F	cpx-3	51.75	0.55	3.20	7.91	0.26	15.44	20.37	0.44	0.02	0.17	0.05	0.00	100.17
	57F	cpx-3	52.69	0.25	2.68	5.29	0.21	16.74	21.42	0.44	0.00	0.60	0.00	0.04	100.36
	57F	cpx-3	52.14	0.85	2.07	11.25	0.30	15.94	17.64	0.33	0.05	0.04	0.01	0.05	100.67

Unidad	Muestra	Mineral	SiO2	TiO2	Al2O3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	Cr2O3	P2O5	NiO	Total
	125	opx-1	53.54	0.05	1.01	18.11	0.78	25.07	0.67	0.01	0.00	0.00	0.01	0.03	99.26
	125	opx-1	53.19	0.28	1.28	17.97	0.51	24.55	1.42	0.03	0.00	0.00	0.00	0.03	99.26
	125	opx-2	55.40	0.12	1.86	9.31	0.24	30.96	1.74	0.07	0.05	0.60	0.00	0.10	100.45
	125	opx-2	52.43	0.27	1.31	17.96	0.50	24.66	1.53	0.02	0.03	0.00	0.00	0.03	98.76
	125	opx-3	51.90	0.81	6.24	19.41	0.47	17.01	2.24	0.02	0.06	0.02	0.60	0.00	98.79
	125	opx-4	50.66	0.42	0.54	18.77	0.67	22.17	3.94	0.04	0.02	0.00	1.55	0.03	98.82
	128	opx-1	53.14	0.34	1.60	16.86	0.45	25.52	1.50	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	99.50
	128	opx-1	52.62	0.34	1.46	18.25	0.54	24.21	1.49	0.05	0.01	0.04	0.00	0.02	99.03
	128	opx-1	53.80	0.26	1.65	15.39	0.37	26.12	1.70	0.02	0.00	0.07	0.02	0.06	99.46
	128	opx-2	53.53	0.41	1.02	17.64	0.41	24.35	2.08	0.03	0.00	0.01	0.10	0.02	99.60
	120A	opx-1	53.60	0.32	1.36	17.89	0.54	24.45	1.38	0.02	0.01	0.06	0.00	0.00	99.63
	120A	opx-1	52.30	0.39	1.71	18.90	0.39	23.53	1.73	0.04	0.04	0.02	0.08	0.04	99.16
	120A	opx-2	53.42	0.20	1.23	18.21	0.45	23.98	1.57	0.05	0.00	0.05	0.02	0.01	99.20
	120A	opx-2	53.99	0.32	1.27	18.10	0.46	24.06	1.67	0.08	0.01	0.05	0.02	0.07	100.09
	120A	opx-3	53.42	0.41	0.82	19.56	0.49	22.72	1.98	0.09	0.04	0.03	0.05	0.01	99.60
	120A	opx-4	53.35	0.52	1.41	16.50	0.40	24.50	2.53	0.03	0.04	0.04	0.00	0.02	99.34
	124A	opx-1	53.61	0.22	2.78	12.57	0.30	28.35	1.33	0.02	0.01	0.02	0.00	0.01	99.22
	124A	opx-1	53.51	0.30	1.26	15.91	0.35	25.30	1.60	0.01	0.02	0.06	0.00	0.04	98.34
	124A	opx-2	54.49	0.24	2.13	12.52	0.29	27.95	1.45	0.02	0.00	0.06	0.00	0.00	99.15
	124A	opx-2	53.39	0.21	1.74	14.82	0.28	26.33	1.35	0.01	0.03	0.45	0.00	0.02	98.64
	124A	opx-3	53.03	0.35	2.09	18.28	0.47	23.67	1.57	0.05	0.02	0.18	0.00	0.00	99.71
	124A	opx-4	53.03	0.16	1.89	18.66	1.13	24.08	0.57	0.04	0.00	0.05	0.00	0.03	99.64
	124A	opx-4	53.72	0.30	1.33	17.08	0.44	24.98	1.62	0.02	0.02	0.04	0.04	0.06	99.66
	124A	opx-5	53.74	0.40	1.02	18.45	0.54	23.08	2.12	0.06	0.01	0.02	0.02	0.06	99.51
	130A	opx-1	52.85	0.21	1.36	19.16	0.55	23.90	1.10	0.06	0.00	0.00	0.00	0.03	99.21
	130A	opx-1	54.97	0.18	2.19	11.66	0.27	28.89	1.58	0.00	0.00	0.31	0.06	0.06	100.16
	130A	opx-2	53.59	0.26	1.23	18.11	0.50	24.39	1.47	0.01	0.01	0.01	0.00	0.05	99.64
	131C	opx-1	53.34	0.21	1.86	15.83	0.33	25.95	1.68	0.05	0.01	0.36	0.04	0.06	99.71
	131C	opx-2	53.00	0.10	1.61	18.54	0.62	24.47	0.64	0.01	0.01	0.00	0.00	0.03	99.04
	131C	opx-2	53.38	0.27	1.33	16.43	0.36	25.79	1.62	0.06	0.03	0.07	0.06	0.03	99.43
	131C	opx-3	52.64	0.45	1.11	19.71	0.51	22.43	2.32	0.03	0.03	0.00	0.01	0.03	99.26
	44A	opx-1	52.48	0.18	0.98	17.85	0.46	24.07	2.42	0.04	0.00	0.04	0.61	0.04	99.15
	44A	opx-2	53.00	0.18	1.90	18.70	0.62	24.34	0.82	0.03	0.02	0.00	0.00	0.03	99.63
	44A	opx-3	52.57	0.22	1.63	18.52	0.75	23.92	1.01	0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	98.65
	44A	opx-3	53.07	0.30	1.62	16.30	0.37	25.16	1.76	0.03	0.00	0.09	0.04	0.05	98.79
	44A	opx-4	53.13	0.33	1.54	17.41	0.52	24.15	1.69	0.05	0.01	0.03	0.00	0.05	98.90
	44A	opx-4	52.89	0.39	1.63	18.00	0.38	24.10	1.80	0.04	0.00	0.06	0.00	0.05	99.34
	44A	opx-5	53.79	0.21	1.09	17.53	0.44	24.27	1.63	0.05	0.04	0.02	0.03	0.00	99.09
	44A	opx-5	53.25	0.33	1.25	17.36	0.39	24.74	1.77	0.09	0.00	0.16	0.03	0.05	99.42
	44A	opx-6	52.97	0.50	2.73	15.30	0.40	24.13	3.78	0.08	0.06	0.15	0.07	0.05	100.23
	44A	opx-7	53.22	0.20	1.00	17.36	0.35	24.90	1.77	0.06	0.00	0.00	0.05	0.07	98.96
	44G	opx-1	52.86	0.05	1.21	19.89	1.67	23.55	0.60	0.03	0.00	0.00	0.00	0.03	99.89
	44G	opx-1	53.51	0.20	1.11	17.93	0.67	24.80	1.39	0.02	0.03	0.03	0.00	0.01	99.71
	44G	opx-2	53.19	0.21	2.84	13.23	0.34	27.40	2.09	0.05	0.01	0.22	0.00	0.00	99.58
	44G	opx-2	54.58	0.17	1.72	10.43	0.31	29.73	1.53	0.01	0.01	0.68	0.00	0.08	99.25
	44G	opx-2	53.59	0.31	1.29	17.48	0.48	25.05	1.34	0.05	0.00	0.06	0.02	0.02	99.69
	46A	opx-1	53.67	0.11	0.94	18.62	1.29	24.58	0.54	0.00	0.01	0.06	0.05	0.00	99.87
	46A	opx-1	53.81	0.25	1.26	17.28	0.49	25.11	1.51	0.05	0.01	0.00	0.00	0.01	99.78
	46A	opx-2	53.21	0.16	1.11	17.92	0.74	24.67	1.26	0.00	0.02	0.02	0.03	0.01	99.16
	46A	opx-2	53.77	0.30	1.27	17.12	0.43	25.05	1.49	0.04	0.03	0.00	0.00	0.01	99.51
	46A	opx-3	50.79	0.27	3.70	17.57	0.48	23.78	1.42	0.03	0.00	0.02	0.00	0.00	98.07
	46A	opx-3	53.41	0.30	1.33	17.43	0.44	24.92	1.43	0.05	0.00	0.04	0.03	0.05	99.44
	57F	opx-1	52.74	0.21	2.64	15.96	0.34	25.84	1.47	0.07	0.00	0.08	0.00	0.02	99.37
	57F	opx-2	53.89	0.38	0.99	17.62	0.43	24.15	2.21	0.06	0.00	0.02	0.05	0.05	99.86
	57F	opx-3	52.82	0.32	1.65	17.46	0.40	24.39	1.83	0.06	0.01	0.10	0.00	0.05	99.07
	57F	opx-4	53.92	0.16	2.26	16.13	0.33	24.53	1.51	0.04	0.06	0.22	0.01	0.08	99.25
	57F	opx-4	53.66	0.29	1.53	17.48	0.39	25.06	1.73	0.05	0.02	0.08	0.00	0.05	100.35
	57F	opx-5	54.49	0.17	2.01	12.06	0.26	28.30	1.44	0.04	0.00	0.31	0.02	0.09	99.18
	57F	opx-5	53.61	0.32	1.53	15.97	0.39	25.76	1.76	0.08	0.00	0.07	0.04	0.03	99.57

ORTOPIROXENO	Unidad	Muestra	Mineral	SiO2	TiO2	Al2O3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	Cr2O3	P2O5	NiO	Total	
	BRECHAS DEL ALTAR	38	opx-1	52.87	0.32	2.13	18.60	0.44	23.96	1.55	0.07	0.00	0.07	0.13	0.01	100.15	
		38	opx-1	53.73	0.28	1.20	17.58	0.41	24.90	1.78	0.05	0.00	0.05	0.06	0.02	100.06	
		40	opx-1	52.77	0.13	2.84	16.69	0.32	25.16	1.35	0.07	0.00	0.15	0.00	0.16	99.62	
		40	opx-1	53.82	0.24	1.79	15.04	0.41	26.01	1.51	0.03	0.01	0.05	0.01	0.08	98.99	
		40	opx-2	52.96	0.30	2.59	16.62	0.41	25.11	1.55	0.06	0.01	0.04	0.04	0.04	99.71	
		40	opx-2	53.54	0.33	1.97	15.94	0.37	25.45	1.56	0.03	0.02	0.02	0.06	0.03	0.04	99.32
		31B	opx-1	53.51	0.27	1.16	18.15	0.69	24.61	1.29	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	99.70	
		31B	opx-1	53.51	0.33	1.56	18.09	0.65	24.51	1.47	0.03	0.00	0.03	0.00	0.00	100.19	
		31B	opx-2	53.87	0.26	1.12	17.66	0.73	24.73	1.60	0.04	0.00	0.02	0.00	0.02	100.05	
		31B	opx-2	54.34	0.18	1.13	16.41	0.50	25.84	1.36	0.00	0.03	0.01	0.00	0.03	99.83	
		33A	opx-1	53.03	0.29	1.99	19.43	0.67	22.08	2.25	0.10	0.09	0.01	0.20	0.00	100.15	
		33A	opx-2	53.44	0.36	1.45	18.83	0.72	23.13	1.81	0.04	0.03	0.01	0.08	0.02	99.93	
		39A	opx-1	53.65	0.34	1.89	15.93	0.37	26.44	1.68	0.06	0.01	0.00	0.00	0.03	100.39	
	39A	opx-2	53.92	0.27	1.43	15.56	0.40	26.81	1.52	0.00	0.00	0.04	0.02	0.02	100.00		
	39A	opx-3	52.25	0.46	2.19	17.66	0.36	24.57	1.94	0.05	0.00	0.10	0.02	0.05	99.67		
	RIOLITA	145	opx-1	51.87	0.26	2.45	25.36	1.68	17.74	0.42	0.04	0.02	0.03	0.02	0.02	99.91	
GABRO	137	opx-1	53.55	0.52	0.84	18.88	0.49	23.91	1.88	0.04	0.00	0.01	0.07	0.00	100.19		
DIORITA	137	opx-1	54.24	0.41	0.61	18.40	0.56	24.17	1.66	0.04	0.03	0.02	0.00	0.01	100.15		

ANFÍBOL	Unidad	Muestra	Mineral	SiO2	TiO2	Al2O3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	Cr2O3	P2O5	NiO	Total
	BRECHAS DEL ALTAR	31B	anf-1	41.98	2.75	13.26	10.45	0.06	14.60	11.45	2.56	0.66	0.02	0.09	0.01	97.89
		31B	anf-1	42.03	2.44	12.48	12.17	0.17	13.76	11.34	2.38	0.54	0.00	0.03	0.01	97.36
		33A	anf-1	42.61	2.99	11.65	12.67	0.21	13.63	10.84	2.51	0.63	0.03	0.08	0.05	97.89
		33A	anf-1	42.35	3.03	11.73	12.81	0.21	13.28	11.02	2.45	0.78	0.00	0.01	0.00	97.68
		33A	anf-2	42.28	3.08	11.54	12.86	0.20	13.46	11.26	2.51	0.65	0.00	0.05	0.00	97.89
		33A	anf-2	42.26	3.20	12.12	13.10	0.19	13.03	11.02	2.41	0.68	0.00	0.06	0.00	98.07
		34	anf-1	41.55	3.24	12.00	13.46	0.18	12.89	11.13	2.31	0.79	0.03	0.03	0.00	97.61
		34	anf-1	41.67	3.38	12.05	13.18	0.22	13.02	11.17	2.57	0.85	0.01	0.00	0.03	98.17
		145	anf-1	41.62	2.76	12.58	11.18	0.17	14.27	11.26	2.36	0.72	0.00	0.04	0.03	96.99
		145	anf-1	41.86	2.70	12.39	10.79	0.15	14.66	11.29	2.39	0.74	0.05	0.00	0.00	97.01
	RIOLITA DE COLLANES	145	anf-2	41.70	2.70	12.45	11.30	0.16	14.00	11.19	2.43	0.74	0.01	0.05	0.21	96.94
		145	anf-2	42.17	2.81	12.30	10.54	0.15	14.69	11.49	2.36	0.68	0.02	0.07	0.00	97.27
		145	anf-3	42.26	2.65	11.64	12.64	0.26	13.42	11.12	2.27	0.67	0.00	0.05	0.02	97.01
		145	anf-3	41.78	2.71	12.33	10.74	0.16	14.51	11.16	2.42	0.70	0.01	0.01	0.04	96.57
		145	anf-4	40.84	2.20	11.98	16.46	0.25	11.25	10.67	1.98	0.77	0.00	0.34	0.00	96.75
		145	anf-5	41.53	2.67	12.55	11.29	0.16	14.07	11.34	2.57	0.75	0.02	0.00	0.00	96.94
		145	anf-5	41.53	2.78	12.53	11.68	0.19	14.06	11.51	2.53	0.66	0.03	0.10	0.03	97.64
		145	anf-6	41.33	2.59	12.54	11.06	0.13	13.98	11.15	2.35	0.79	0.01	0.16	0.00	96.08
		145	anf-6	41.51	2.57	12.27	11.41	0.12	14.23	11.52	2.43	0.70	0.01	0.01	0.02	96.80
		145	anf-7	40.79	2.05	13.00	14.51	0.21	12.58	10.55	2.18	0.66	0.00	0.21	0.00	96.75
		52E	anf-1	40.91	2.92	13.11	13.01	0.19	12.97	11.25	2.34	0.67	0.00	0.07	0.00	97.45
		52E	anf-1	42.33	2.19	12.00	12.87	0.18	13.20	10.88	2.13	0.76	0.00	0.04	0.02	96.60
		52E	anf-2	41.18	2.64	12.96	13.11	0.20	13.07	11.35	2.39	0.68	0.00	0.02	0.00	97.61
		52E	anf-2	42.45	2.85	12.85	10.85	0.14	13.97	11.52	2.43	0.78	0.00	0.03	0.03	97.90
		52E	anf-3	44.50	1.92	10.98	13.79	0.29	12.58	10.64	1.91	0.71	0.00	0.13	0.00	97.46

	Unidad	Muestra	Mineral	SiO2	TiO2	Al2O3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	Cr2O3	P2O5	NiO	Total
		Ti-MAGNETITA														
Ti-MAGNETITA	BRECHAS DE COLLANES	125	Ti-mt-1	0.12	9.83	2.51	78.09	0.37	2.24	0.01	0.00	0.00	0.99	0.00	0.05	94.21
		125	Ti-mt-2	0.11	9.77	2.85	78.18	0.35	2.43	0.00	0.00	0.03	0.89	0.00	0.10	94.70
		125	Ti-mt-3	0.14	13.68	1.91	75.36	0.49	0.95	0.08	0.03	0.08	0.03	0.00	0.03	92.78
		128	Ti-mt-1	0.15	9.85	0.64	79.45	0.68	0.18	0.16	0.02	0.05	0.01	0.04	0.00	91.22
		120A	Ti-mt-1	0.51	14.46	1.30	75.19	0.48	1.03	0.13	0.00	0.12	0.08	0.04	0.01	93.36
		120A	Ti-mt-2	4.48	16.15	1.72	65.59	0.49	1.52	0.50	0.08	0.14	0.14	0.05	0.02	90.87
		124A	Ti-mt-1	0.08	12.63	2.61	71.19	0.28	2.29	0.05	0.05	0.04	4.11	0.00	0.13	93.46
		124A	Ti-mt-2	0.10	12.23	2.60	71.79	0.38	2.58	0.07	0.00	0.03	3.55	0.01	0.19	93.53
		124A	Ti-mt-3	4.08	15.88	2.35	67.71	0.42	1.37	0.30	0.24	0.33	0.06	0.11	0.00	92.84
		130A	Ti-mt-1	0.08	10.32	3.26	75.77	0.32	2.00	0.06	0.00	0.02	2.45	0.03	0.15	94.43
		131C	Ti-mt-1	1.20	19.10	2.18	67.88	0.43	1.15	0.13	0.10	0.05	0.61	0.00	0.02	92.85
		131C	Ti-mt-2	4.76	18.97	1.89	62.37	0.45	0.74	0.42	0.14	0.41	0.07	0.07	0.03	90.32
		44A	Ti-mt-1	3.64	17.29	2.06	70.81	0.43	1.09	0.50	0.19	0.19	0.01	0.02	0.02	96.26
		44A	Ti-mt-2	11.77	14.63	4.07	64.48	0.42	0.89	0.36	0.42	0.83	0.00	0.17	0.01	98.05
		44G	Ti-mt-1	0.10	8.56	3.52	77.79	0.58	2.31	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	0.04	93.00
		44G	Ti-mt-2	0.12	12.14	1.46	77.65	0.68	1.27	0.13	0.00	0.06	0.01	0.00	0.01	93.52
		44G	Ti-mt-3	0.14	8.97	2.81	78.05	0.46	2.90	0.00	0.00	0.00	0.95	0.01	0.12	94.41
		46A	Ti-mt-1	0.09	10.45	3.10	75.07	0.33	2.49	0.06	0.00	0.01	1.30	0.06	0.05	93.02
		57F	Ti-mt-1	0.13	15.58	2.23	73.30	0.51	1.54	0.02	0.00	0.03	2.25	0.00	0.00	95.58
		57F	Ti-mt-2	0.08	16.29	2.07	73.45	0.47	1.45	0.04	0.02	0.04	1.98	0.06	0.03	95.97
	35	Ti-mt-1	0.09	16.70	1.45	74.82	0.48	1.94	0.13	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	95.62	
	35	Ti-mt-2	0.08	16.84	0.55	75.23	0.42	1.25	0.08	0.04	0.01	0.07	0.00	0.06	94.63	
	36B	Ti-mt-1	0.08	8.80	5.56	73.39	0.35	5.20	0.03	0.00	0.00	1.00	0.11	0.03	94.53	
	36B	Ti-mt-2	0.16	7.87	5.63	74.14	0.31	3.98	0.06	0.00	0.01	0.63	0.03	0.06	92.88	
	36B	Ti-mt-3	0.17	14.54	2.06	74.87	0.57	1.52	0.13	0.00	0.05	0.03	0.02	0.00	93.95	
	40	Ti-mt-1	0.15	12.61	3.04	72.71	0.37	3.64	0.00	0.02	0.00	0.98	0.01	0.02	93.55	
	40	Ti-mt-2	0.07	9.38	4.99	71.49	0.30	4.06	0.00	0.01	0.00	1.98	0.04	0.14	92.46	
	40	Ti-mt-3	0.18	10.52	4.65	72.46	0.29	3.74	0.00	0.00	0.01	0.91	0.00	0.09	92.84	
	40	Ti-mt-4	0.11	10.97	4.33	73.05	0.38	3.38	0.00	0.00	0.02	0.94	0.00	0.10	93.28	
	40	Ti-mt-5	0.23	14.68	2.46	71.12	0.34	2.95	0.39	0.02	0.04	0.02	0.32	0.07	92.64	
	41	Ti-mt-1	0.07	6.82	4.67	79.74	0.40	3.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	94.72	
	41	Ti-mt-2	0.14	8.22	2.64	78.82	0.49	2.94	0.05	0.00	0.03	0.04	0.03	0.01	93.41	
	41	Ti-mt-3	0.10	8.16	2.91	78.70	0.43	3.00	0.04	0.02	0.03	0.01	0.00	0.00	93.39	
	41	Ti-mt-4	0.17	9.57	3.23	77.44	0.39	2.83	0.02	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	93.67	
	41	Ti-mt-5	0.23	12.09	1.91	77.16	0.42	1.50	0.16	0.04	0.06	0.03	0.00	0.03	93.63	
	39A	Ti-mt-1	0.03	9.80	5.24	75.79	0.44	2.97	0.12	0.01	0.00	0.34	0.01	0.04	94.77	
	39A	Ti-mt-2	0.37	11.52	0.69	74.68	0.34	0.44	0.19	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	88.31	
31B	Ti-mt-1	0.11	8.90	3.91	79.37	0.46	2.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.06	95.14		
31B	Ti-mt-2	0.08	9.26	3.73	78.63	0.45	2.55	0.00	0.00	0.01	0.05	0.03	0.00	94.79		
33A	Ti-mt-1	0.11	7.90	4.49	78.73	0.34	2.89	0.05	0.01	0.00	0.02	0.03	0.00	94.57		
33A	Ti-mt-2	0.93	8.18	4.71	76.20	0.36	2.55	0.04	0.00	0.01	0.00	0.05	0.00	93.03		
33A	Ti-mt-3	0.13	7.72	4.91	78.79	0.32	2.73	0.00	0.00	0.02	0.00	0.02	0.02	94.66		
33A	Ti-mt-4	0.92	13.80	2.27	74.97	0.63	2.24	0.10	0.00	0.06	0.00	0.04	0.00	95.03		
33A	Ti-mt-5	3.29	13.70	2.16	72.09	0.55	2.49	0.30	0.00	0.05	0.03	0.06	0.32	95.04		
34	Ti-mt-1	0.10	8.23	4.57	78.48	0.39	2.83	0.01	0.00	0.01	0.03	0.02	0.01	94.67		
145	Ti-mt-1	0.30	5.38	4.62	80.71	0.68	0.72	0.15	0.00	0.08	0.00	0.04	0.02	92.69		
145	Ti-mt-2	0.07	4.85	2.26	84.46	0.74	1.00	0.02	0.00	0.02	0.08	0.01	0.00	93.50		
137	Ti-mt-1	0.07	1.21	0.65	89.16	0.16	0.24	0.00	0.00	0.00	0.42	0.03	0.01	91.95		
137	Ti-mt-2	0.03	0.75	0.27	90.00	0.10	0.03	0.14	0.00	0.04	0.57	0.04	0.06	92.03		
137	Ti-mt-3	0.00	2.15	0.63	88.37	0.14	0.27	0.00	0.03	0.01	0.28	0.02	0.06	91.97		
137	Ti-mt-4	0.08	1.30	0.94	88.56	0.16	0.40	0.07	0.00	0.00	0.48	0.00	0.07	92.06		
ILLMENITA	BRECHAS DE COLLANES	125	ilm-1	0.03	32.74	0.47	59.28	0.19	2.21	0.03	0.02	0.03	0.05	0.00	0.02	95.07
		125	ilm-2	0.03	34.81	0.44	57.98	0.27	2.39	0.04	0.00	0.02	0.05	0.00	0.04	96.06
	GABRO-DIORITA	137	ilm-1	0.00	45.11	0.05	51.13	1.19	1.40	0.01	0.00	0.00	0.04	0.03	0.01	98.96
		137	ilm-2	0.08	40.86	0.02	53.31	1.56	0.34	0.06	0.02	0.08	0.08	0.03	0.05	96.48
		137	ilm-3	0.01	37.61	0.06	56.61	0.43	1.81	0.00	0.02	0.00	0.13	0.03	0.02	96.72
		137	ilm-4	0.45	31.31	0.35	62.42	2.67	1.30	0.02	0.00	0.04	0.59	0.00	0.04	99.18
137	ilm-5	0.03	41.49	0.12	52.67	0.98	2.16	0.04	0.00	0.00	0.11	0.00	0.01	97.61		

	Unidad	Muestra	Mineral	SiO2	TiO2	Al2O3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	Cr2O3	P2O5	NiO	Total
				OLIVINO												
BRECHAS DEL ALTAR	RIO-35	ol-1	36.79	0.01	0.02	26.32	0.56	34.97	0.14	0.00	0.01	0.00	0.01	0.08	98.90	
	RIO-35	ol-1	37.11	0.01	0.05	26.44	0.51	35.07	0.33	0.00	0.00	0.00	0.07	0.04	99.64	
	RIO-35	ol-2	39.49	0.00	0.03	15.60	0.25	43.60	0.15	0.00	0.00	0.01	0.00	0.19	99.32	
	RIO-35	ol-2	36.86	0.02	0.04	27.97	0.46	33.89	0.25	0.03	0.01	0.00	0.17	0.08	99.77	
	RIO-35	ol-3	39.99	0.00	0.04	12.01	0.13	46.56	0.16	0.00	0.00	0.06	0.21	0.32	99.48	
	RIO-35	ol-3	37.32	0.03	0.02	26.11	0.46	34.89	0.22	0.00	0.01	0.02	0.04	0.09	99.22	
	RIO-35	ol-4	38.79	0.00	0.05	16.84	0.31	42.55	0.13	0.00	0.02	0.04	0.08	0.15	98.97	
	RIO-35	ol-4	37.61	0.05	0.06	25.29	0.44	36.45	0.22	0.00	0.02	0.02	0.05	0.06	100.25	
	RIO-35	ol-5	39.33	0.03	0.03	15.30	0.28	43.67	0.17	0.02	0.01	0.00	0.00	0.20	99.03	
	RIO-35	ol-6	40.26	0.00	0.01	11.36	0.18	46.72	0.13	0.00	0.00	0.08	0.02	0.34	99.10	
	RIO-35	ol-7	35.13	0.09	0.08	34.71	0.65	27.38	0.26	0.01	0.00	0.01	0.34	0.06	98.71	
	RIO-35	ol-8	35.41	0.06	0.06	35.33	0.70	26.89	0.28	0.06	0.05	0.01	0.30	0.00	99.14	
	RIO-35	ol-9	36.42	0.09	0.06	31.49	0.61	30.17	0.34	0.03	0.01	0.04	0.16	0.03	99.44	
	RIO-36B	ol-1	37.95	0.07	0.01	23.90	0.40	36.98	0.12	0.00	0.00	0.00	0.06	0.06	99.57	
	RIO-36B	ol-1	38.41	0.00	0.02	22.99	0.36	37.94	0.23	0.00	0.05	0.01	0.06	0.00	100.07	
	RIO-36B	ol-2	37.53	0.00	0.06	27.71	0.62	33.80	0.27	0.00	0.00	0.02	0.00	0.06	100.07	
	RIO-36B	ol-3	38.54	0.03	0.02	23.42	0.39	37.56	0.15	0.00	0.03	0.00	0.04	0.09	100.29	
	RIO-36B	ol-3	37.87	0.07	0.02	25.09	0.47	35.96	0.24	0.01	0.01	0.02	0.09	0.05	99.89	
	RIO-40	ol-1	38.11	0.03	0.03	24.46	0.43	36.68	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	99.98	
	RIO-40	ol-1	37.59	0.04	0.04	26.67	0.46	33.91	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	99.04	
	RIO-40	ol-2	38.43	0.06	0.00	24.18	0.43	36.49	0.13	0.00	0.00	0.03	0.00	0.07	99.83	
	RIO-40	ol-2	37.34	0.00	0.03	28.73	0.58	32.12	0.23	0.02	0.00	0.00	0.05	0.06	99.15	
	RIO-40	ol-3	38.44	0.00	0.03	23.85	0.40	36.74	0.15	0.00	0.00	0.00	0.09	0.15	99.86	
	RIO-40	ol-4	38.36	0.05	0.02	24.15	0.34	36.34	0.13	0.03	0.00	0.00	0.06	0.15	99.62	
	RIO-40	ol-6	38.13	0.05	0.06	26.22	0.45	34.59	0.13	0.02	0.00	0.00	0.12	0.12	99.88	
	RIO-38	ol-1	38.08	0.08	0.00	24.17	0.40	37.33	0.16	0.00	0.00	0.03	0.07	0.15	100.49	
	RIO-38	ol-2	37.37	0.06	0.00	26.97	0.46	34.04	0.19	0.01	0.01	0.04	0.02	0.08	99.24	
	RIO-38	ol-3	37.68	0.00	0.03	27.80	0.44	33.51	0.17	0.00	0.00	0.01	0.02	0.07	99.74	
	RIO 41	ol-1	37.10	0.03	0.00	27.59	0.59	33.92	0.16	0.00	0.00	0.00	0.14	0.03	99.57	
	RIO 41	ol-2	37.21	0.02	0.03	27.06	0.57	34.02	0.17	0.05	0.15	0.00	0.28	0.00	99.57	
RIO 41	ol-3	37.54	0.01	0.01	25.49	0.55	35.77	0.07	0.00	0.00	0.03	0.10	0.02	99.59		

	Unidad	Muestra	Mineral	SiO2	TiO2	Al2O3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	Cr2O3	P2O5	NiO	Total
				Biotita												
BRECHAS DEL ALTAR	Riolita de Collanes	145	bt-1	37.10	3.65	14.62	14.12	0.12	15.45	0.00	0.66	8.71	0.01	0.00	0.01	94.46
		145	bt-2	37.81	3.43	13.99	14.45	0.18	15.30	0.02	0.67	8.70	0.01	0.04	0.01	94.60
		145	bt-3	37.18	3.34	14.53	14.15	0.17	15.60	0.04	0.54	8.46	0.02	0.00	0.00	94.04
		145	bt-4	37.09	3.69	14.35	14.84	0.16	14.91	0.00	0.63	8.65	0.00	0.03	0.00	94.34
	Gabro-Diorita	137	Mg-bt-1	40.58	3.84	11.36	7.49	0.07	20.92	0.00	0.40	9.87	0.00	0.00	0.01	94.53
		137	Mg-bt-2	40.54	3.72	11.41	7.30	0.09	20.87	0.01	0.49	9.55	0.00	0.07	0.02	94.07
		137	Mg-bt-3	40.65	3.66	11.41	7.51	0.08	21.05	0.06	0.25	9.92	0.00	0.00	0.04	94.63
		137	Mg-bt-4	40.28	3.26	11.34	7.28	0.04	21.46	0.03	0.27	10.03	0.03	0.05	0.00	94.07
		137	Mg-bt-5	41.41	3.38	11.20	7.14	0.00	21.80	0.05	0.43	9.58	0.00	0.00	0.03	95.02

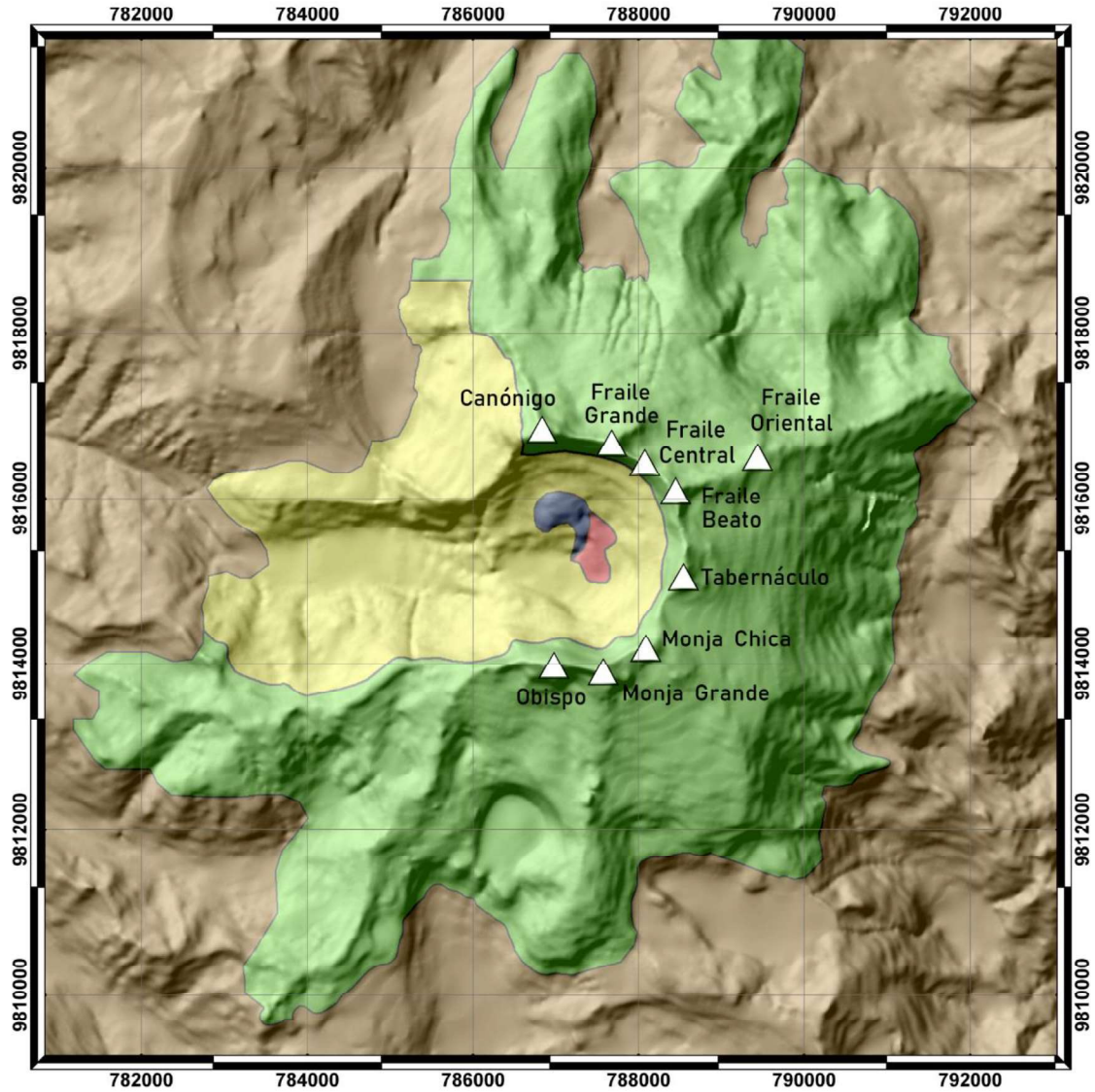
	Unidad	Muestra	Mineral	SiO2	TiO2	Al2O3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	Cr2O3	P2O5	NiO	Total
				Cr-ESPINELA												
BRECHAS DEL ALTAR	BRECHAS DEL ALTAR	35	Cr-esp 1	0.13	4.18	14.36	52.95	0.26	7.20	0.06	0.00	0.00	17.54	0.00	0.13	96.80
		35	Cr-esp 2	0.00	0.63	20.28	29.20	0.20	10.69	0.03	0.00	0.01	37.70	0.00	0.14	98.89
		35	Cr-esp 3	0.09	1.11	16.85	34.04	0.26	9.37	0.00	0.00	0.00	36.51	0.00	0.10	98.33
		35	Cr-esp 4	0.12	0.66	21.94	23.17	0.19	12.72	0.04	0.00	0.01	38.42	0.00	0.22	97.50

	Unidad	Muestra	Mineral	SiO2	TiO2	Al2O3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	Cr2O3	P2O5	NiO	Total
				PIGEONITA												
BRECHAS DEL ALTAR	BRECHAS DEL ALTAR	41	pig-1	52.65	0.32	0.60	19.62	0.79	21.24	3.93	0.06	0.04	0.00	0.31	0.01	99.56
		41	pig-2	52.58	0.50	1.17	18.39	0.76	19.65	5.91	0.17	0.11	0.00	0.00	0.03	99.27
		41	pig-3	53.26	0.28	1.60	19.54	0.71	20.54	3.49	0.46	0.07	0.01	0.01	0.00	99.97

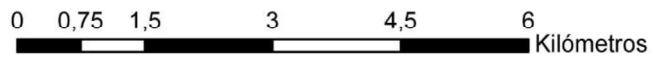
	Unidad	Muestra	Mineral	SiO2	TiO2	Al2O3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	Cr2O3	P2O5	NiO	Total
				Apatito												
BRECHAS DEL ALTAR	BRECHAS DEL ALTAR	44G	apt-1	0.14	0.00	0.00	0.82	0.15	0.33	53.83	0.18	0.03	0.00	43.78	0.00	99.27
		137	apt-1	0.50	0.00	0.00	0.10	0.06	0.08	54.29	0.08	0.00	0.02	41.59	0.01	96.73

Anexo 3. Mapa geológico del volcán El Altar.






MAPA GEOLÓGICO VOLCÁN EL ALTAR



△ picos del Altar



Unidad

-  Brechas del Altar
-  Domo Riolítico
-  Brechas de Collanes
-  Gabro-Diorita
-  Fm. Pisayambo (Basamento)