

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE GEOLOGÍA Y PETRÓLEOS

Relación geodinámica y geomorfológica entre estructuras tectónicas recientes del Valle de Latacunga con domos cuaternarios entre Salcedo y San José de Poaló.

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERÍA
GEOLÓGICA**

LUIS DAVID MORALES CAICER

luis.morales04 @ epn.edu.ec

Directora MSc. PATRICIA ANN MOTHES

pmothes@igepn.edu.ec

DMQ, Febrero 2024

CERTIFICACIONES

Yo, Luis David Morales Caicer declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

Luis David Morales Caicer

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Luis David Morales Caicer, bajo mi supervisión.

MSc. Patricia Ann Mothes

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

Luis David Morales Caicer

MSc. Patricia Mothes Ann

DEDICATORIA

En honor al Dr. Minard Hall

AGRADECIMIENTO

A Dios

ÍNDICE

CERTIFICACIONES	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE	V
1 INTRODUCCIÓN.....	9
1.1 Objetivos	9
1.2 Área de Estudio	10
1.3 Geología Básica del Sector	11
1.4 Geología de Pisayambo	12
1.5 Metodología.....	12
2 MARCO GEOLÓGICO REGIONAL.....	14
2.1 Marco Geológico y Tectónico.....	14
2.1.1 Evolución geodinámica reciente	14
2.2 Los Grandes Dominios Morfogeológicos del Ecuador.....	15
2.3 Geología Regional	16
2.4 División Litotectónica	16
2.5 Neotectónica del VI	17
3 VOLCANISMO PLIO CUATERNARIO.....	20
3.1 Geocronología volcánica.....	22
3.1.1 El método argón-argón ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$).....	23
3.1.2 Datación Radiométrica para el Estudio Presente	23
4 ESTRATIGRAFÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO	25
4.1 Formación Pisayambo.....	25
4.2 Formación Latacunga.....	25
4.3 Deformaciones.....	28
5 ANÁLISIS GEOQUÍMICOS	30
5.1 Elementos Mayores.....	30
5.2 Elementos traza.....	32
5.3 Relación entre las muestras de la zona estudiada con putzulahua, Series Andesíticas (Cotopaxi) y Pisayambo	34
5.3.1 Cerro Putzulahua	34
5.3.2 Series Andesíticas.....	37
5.3.3 Pisayambo	37

5.4	Relación entre óxidos.....	39
5.4.1	Cristalización Fraccionada	40
6	DISCUSIÓN.....	45
6.1	Movilización de magma.....	45
6.2	Mush Riolítico	46
6.2.1	Riolita pobre en cristales.....	47
6.2.2	Riolita rica en cristales.....	48
6.3	Ascenso de magma a través de fallas Strike-slip inversa	48
7	CONCLUSIONES.....	51
8	RECOMENDACIONES	52
9	REFERENCIAS	53

RESUMEN

Este estudio analiza un complejo de domos riolíticos cuaternarios en el Valle Interandino Central de Ecuador. Se empleó trabajo de campo, análisis petrográfico y geoquímico, dataciones Ar-Ar y cartografía para comprender su origen y relación con la tectónica regional. Los resultados revelan que los domos son magmas evolucionados con alto contenido en sílice, diferenciados por cristalización fraccionada y asimilación de corteza continental. El ascenso del magma se produjo a través de fallas y fracturas, siendo el sistema CCPP un factor importante. Las dataciones Ar-Ar y las afinidades geoquímicas sugieren una relación con las series andesíticas del Cotopaxi, Pisayambo y Putzulahua. Se identificaron dos tipos de riolita: pobre en cristales y rica en cristales, con diferentes propiedades eruptivas. El estudio aporta información valiosa para la evaluación de la importancia volcánica en la región y la comprensión de los procesos magmáticos en general.

Palabras clave: Domos riolíticos, Valle Interandino Central, Ecuador, tectónica regional, análisis petrográfico, geoquímico, dataciones Ar-Ar, peligro volcánico.

ABSTRACT

This study analyzes a complex of Quaternary rhyolitic domes in the Central Interandean Valley of Ecuador. Fieldwork, petrographic and geochemical analysis, Ar-Ar dating, and cartography were used to understand their origin and relationship to regional tectonics. The results reveal that the domes are evolved magmas with high silica content, differentiated by fractional crystallization and assimilation of continental crust. The magma ascent occurred through faults and fractures, with the CCPP system being an important factor. Ar-Ar dating and geochemical affinities suggest a relationship with the andesitic series of Cotopaxi, Pisayambo, and Putzulahua. Two types of rhyolite were identified: crystal-poor and crystal-rich, with different eruptive properties. The study provides valuable information for the assessment of volcanic significance in the region and the understanding of magmatic processes in general.

Keywords: Rhyolitic domes, Central Interandean Valley, Ecuador, regional tectonics, petrographic analysis, geochemical analysis, Ar-Ar dating, volcanic hazard

1 INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se propone como punto de partida para futuras investigaciones. Se centra en el análisis de un complejo de domos emplazados en las estribaciones orientales del Valle Interandino (VI), entre Salcedo y la Cordillera Real, a los cuales se les atribuye un origen tectono-volcánico.

A pesar de la existencia de estudios previos sobre el Valle Interandino (Lavenu, Winter & Dávila, 1995), no se han realizado análisis geológicos detallados en el sector comprendido entre Salcedo y la Cordillera Oriental. Este trabajo busca brindar una primera aproximación geológica al conjunto de domos, basándose en el análisis petrográfico, petrológico y geoquímico, interpretación tectono-estratigráfica y dataciones radiométricas

La presente investigación se justifica porque Ecuador posee un extenso sistema de fallas que están posiblemente relacionadas con su actividad magmática. Este sistema de fallas puede generar estructuras como los domos que se estudian en este proyecto.

1.1 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es realizar un primer análisis geológico del complejo de domos ubicado entre Salcedo y la Cordillera Real.

Los objetivos específicos son:

- Determinar la contribución geodinámica a la existencia de estos domos cuaternarios.
- Analizar la relación entre los domos y los mecanismos de deformación cortical del Ecuador.
- Comprender la participación de la tectónica asociada a Salcedo y San José de Poaló en el ascenso de magma y la génesis de los domos.
- Generar perfiles topográficos que muestren las posibles relaciones entre los rasgos neotectónicos y el vulcanismo asociado.
- Recopilar información sísmica y analizar los mecanismos focales de la zona para confirmar la relación entre los sistemas de fallas, el ascenso de magma y los domos.

- Caracterizar petrográfica y geoquímicamente las principales unidades volcanoclásticas: flujos de lava, depósitos piroclásticos, avalanchas de escombros, entre otros, y determinar sus fuentes de origen.
- Realizar una carta topográfica de tipo geo-vulcanológica de los domos cuaternarios a escala 1:50000.
- Cartografiar estructuras tectónicas no identificadas previamente.

1.2 Área de Estudio

La región estudiada se ubica en el área comprendida entre Latacunga-Ambato (Figura 1). El análisis morfológico del Valle Interandino ha permitido identificar estructuras llamadas flexuras o plegamientos, creadas por el esfuerzo de la falla inversa La Victoria (N-S) y la falla inversa Pisayambo.

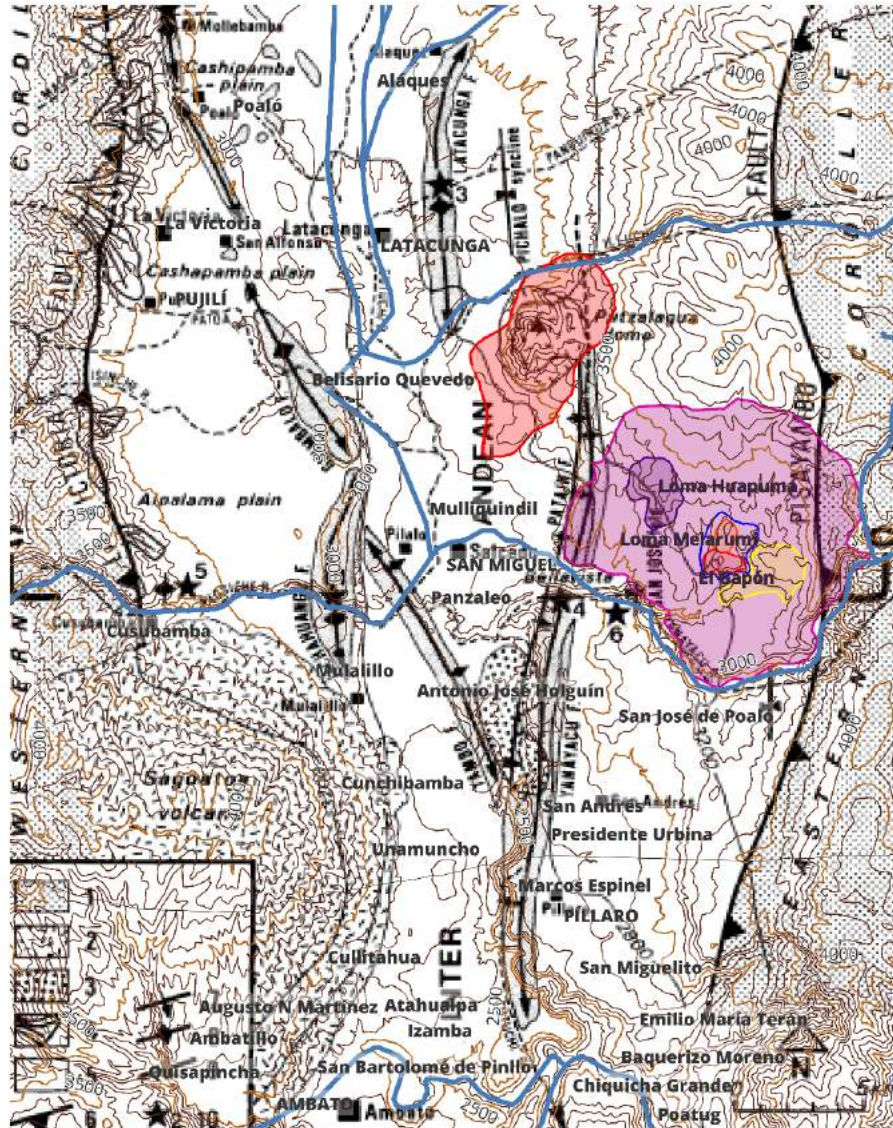


Figura 1. Cuenca de Latacunga-Ambato con sus respectivas unidades estructurales. Tomado y modificado de (Lavenu, Winter, & Dávila, 1995).

1.3 Geología Básica del Sector

Según (Lavenu, Winter, & Dávila, 1995), en el Valle Interandino entre Saquisilí y Mulalillo, se encuentran tres flexuras principales: Mollepamba, Guambaló y Jachahuangu, con espesores entre 500 y 1000 metros y alturas entre 3032 y 3133 msnm. Estas estructuras drenan sedimentos a través de los ríos Pujilí, Isinche y Nagsiche, que conectan con el río Cutuchi. Al este del Cutuchi, existen otras flexuras como el Anticlinal de Latacunga, la Flexura Patana, la Flexura Yambo y la Flexura Yanayacu, con características similares a las del oeste. Estas estructuras tectónicas

configuran el relieve del Valle Interandino y determinan el drenaje de las aguas superficiales.

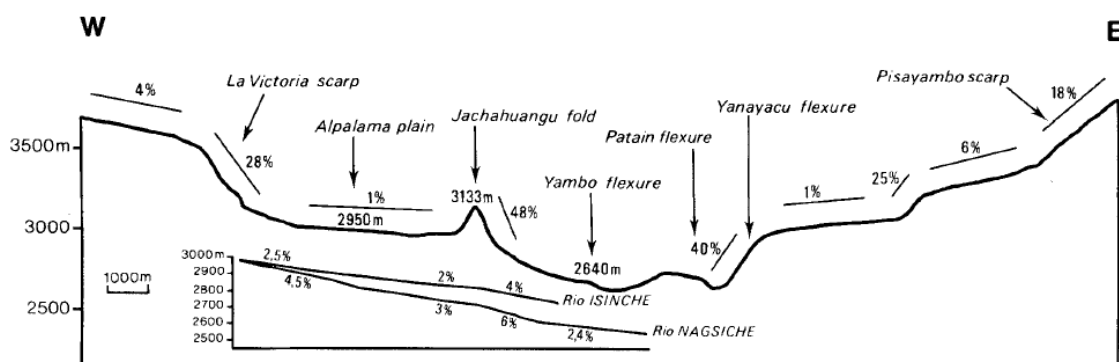


Figura 2. Perfil topográfico W-E que corta a través del Valle. (Lavenu, Winter, & Dávila, 1995)

1.4 Geología de Pisayambo

La geología de Pisayambo, en el Parque Nacional Llanganates, se caracteriza por la presencia de rocas metamórficas del Paleozoico y Mesozoico que conforman el basamento, sobre las cuales se depositaron rocas volcánicas de la Formación Pisayambo del Mio-Plioceno (Baldock, 1982). Esta formación se divide en dos secuencias: una inferior con piroclastos y lavas, y una superior con flujos de lavas andesíticas y basálticas. La edad de la Formación Pisayambo se estima entre 6 y 5 millones de años. Además de las rocas volcánicas, la zona presenta depósitos superficiales como flujos piroclásticos cuaternarios, depósitos glaciares, aluviales y coluviales. La composición de la Formación Pisayambo incluye lavas andesíticas-riolíticas porfíricas y flujos piroclásticos masivos, con un espesor que varía entre 500 y 1000 metros (Kennerley, 1971).

1.5 Metodología

Este estudio tiene como objetivo comprender el origen de los domos cuaternarios presentes entre Salcedo y San José de Poaló, en el flanco oriental del Valle Interandino Central (VIC) de Ecuador. Para ello, se analizará la relación entre la tectónica y la estratigrafía local y regional, enfocándose en la falla strike-slip Puná-Pallatanga-Cosanga-Chingual (PPCC). Se utilizará información bibliográfica, trabajo de

campo, análisis petrográfico y geoquímico de 10 muestras, relación tectono-vulcánica y dataciones Ar-Ar. Se espera obtener nuevos conocimientos sobre la geología del área, la relación entre los episodios tectónicos y la evolución de la deformación en superficie, brindando información útil sobre el comportamiento del VI y el estado de estrés en la corteza continental.

2 MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

2.1 Marco Geológico y Tectónico

Los Andes ecuatorianos, con una dirección N10° (Alvarado, 2012), se componen de dos cordilleras (Occidental y Oriental) separadas por el Valle Interandino. Este valle se divide en cuencas como la de Ibarra, Quito, Patate y Riobamba. La interacción de las placas tectónicas de Sudamérica, Nazca, Cocos y Caribe configura la geología y el relieve del país (Figura 3).

2.1.1 Evolución geodinámica reciente

La fragmentación de la placa Farallón hace 28-27 millones de años estableció la subducción de la placa Nazca bajo la placa Sudamericana (Lonsdale, 2005), proceso crucial en la formación de los Andes ecuatorianos desde el Mioceno (Spikings, Winkler, Seward, & Handler, 2005). La tasa de convergencia actual es de 58 mm/año (Guillier, 2001) y la Zona de Fractura Grijalva y la Cordillera Asísmica de Carnegie son elementos importantes de la placa Nazca que influyen en la geodinámica de la región.

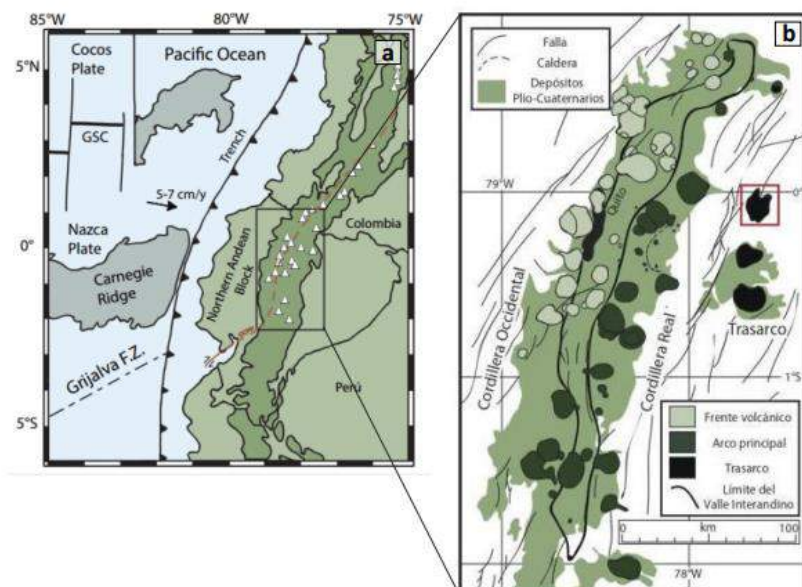


Figura 3. Marco geodinámico regional muestra la interacción de las placas Nazca-Cocos y Sudamericana en el margen ecuatoriano. (Litherland, Aspden, & Jemielita, 1994)

2.2 Los Grandes Dominios Morfogeológicos del Ecuador

El Ecuador se caracteriza por una notable diversidad de paisajes, producto de su compleja geología y la interacción de diferentes placas tectónicas. La Cordillera de los Andes divide al país en tres regiones: Costa, Sierra y Amazonía, cada una con características únicas en cuanto a relieve, clima, vegetación y biodiversidad.

Región Costanera: Planicies y llanuras con altitudes bajas bordean el Océano Pacífico. Se destaca la Cordillera Costanera, formada por un complejo volcánico Cretácico, y cuencas sedimentarias como Progreso, Manabí y Manta-Jama.

Región Sierra: Compuesta por dos cordilleras, la Occidental y la Real, que albergan en su interior el Valle Interandino. La Cordillera Occidental presenta un basamento oceánico del Cretácico Superior, mientras que la Cordillera Real se caracteriza por rocas metamórficas del Paleozoico.

Región Amazónica: Se extiende al este de la Cordillera Real y se caracteriza por una extensa llanura con una rica biodiversidad. La plataforma tectónica de la Cuenca Amazónica y la zona subandina con montañas de rocas del Paleozoico y Mesozoico inferior son sus principales características .

Adicionalmente, el Archipiélago de Galápagos, con su geología volcánica única y su alta biodiversidad, forma parte del territorio ecuatoriano.

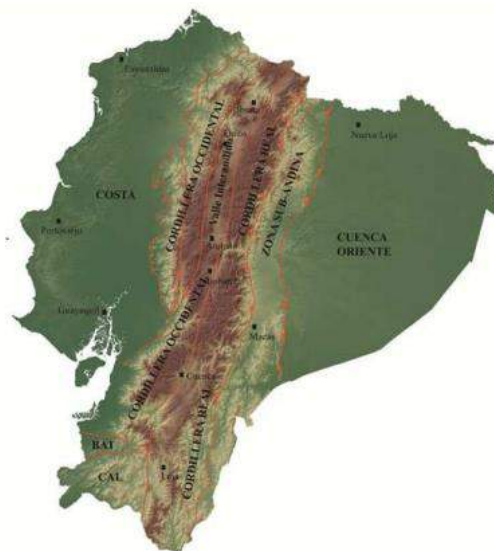


Figura 4. División fisiográfica del Ecuador. Tomado de (OBANDO, 2012)

2.3 Geología Regional

Las diferentes regiones del Ecuador presentan características geológicas distintivas. La Costa se caracteriza por un basamento Mesozoico acrecionado de afinidad oceánica y sedimentos producto de la erosión de la Cordillera Occidental. En cambio, el Oriente posee una plataforma tectónica en la Cuenca Amazónica, una zona subandina con montañas de rocas del Paleozoico y Mesozoico inferior, y un basamento del Precámbrico del Escudo Guayanés (Balkwill, Rodrigue, Predes, & Almeida, 1995). La Sierra, por su parte, se divide en dos cordilleras: la Occidental, con un basamento oceánico del Cretácico Superior y terrenos alóctonos de composición máfica e intermedia; y la Real, con un basamento metasedimentario del Paleozoico y rocas metamórficas de bajo a alto grado. Entre las cordilleras se encuentra el Valle Interandino, con un basamento controversial que podría ser un microcontinente acrecionado o rocas basálticas de la Formación Piñón (Aspden & Litherland, 1992). La Cordillera Real también presenta una zona Subandina con piel delgada tapada por depósitos del wedge-top.

2.4 División Litotectónica

Según (Aspden & Litherland, 1992) (Litherland, Aspden, & Jemielita, The Metamorphic Belts of Ecuador, 1994), la Cordillera Real, se divide en varias unidades litotectónicas que narran la historia de su formación. En la ladera occidental, la División Guamote, compuesta por rocas sedimentarias y volcánicas de edad jurásica, revela los efectos de la deformación tectónica. La Falla Peltetec, una línea tectónica fundamental, separa la División Guamote de la División Alao, compuesta por ofiolitas (corteza oceánica) y sedimentos de un arco de isla, evidenciando la colisión de placas que formó la cordillera.

En el flanco oriental, la División Zamora, con sus batolitos e intrusiones volcánicas, representa el magmatismo asociado a la formación de la cordillera. El Frente Baños, una falla recientemente descubierta, marca un cambio importante en la geología, separando rocas verdes de esquistos, gneises y granitos. La División Loja, con su granito Tres Lagunas, aporta un componente fundamental a la estructura de la cordillera. Finalmente, la División Salado, con su complejidad geológica, refleja las

múltiples fases de deformación y metamorfismo que ha experimentado la región (Figura 5).

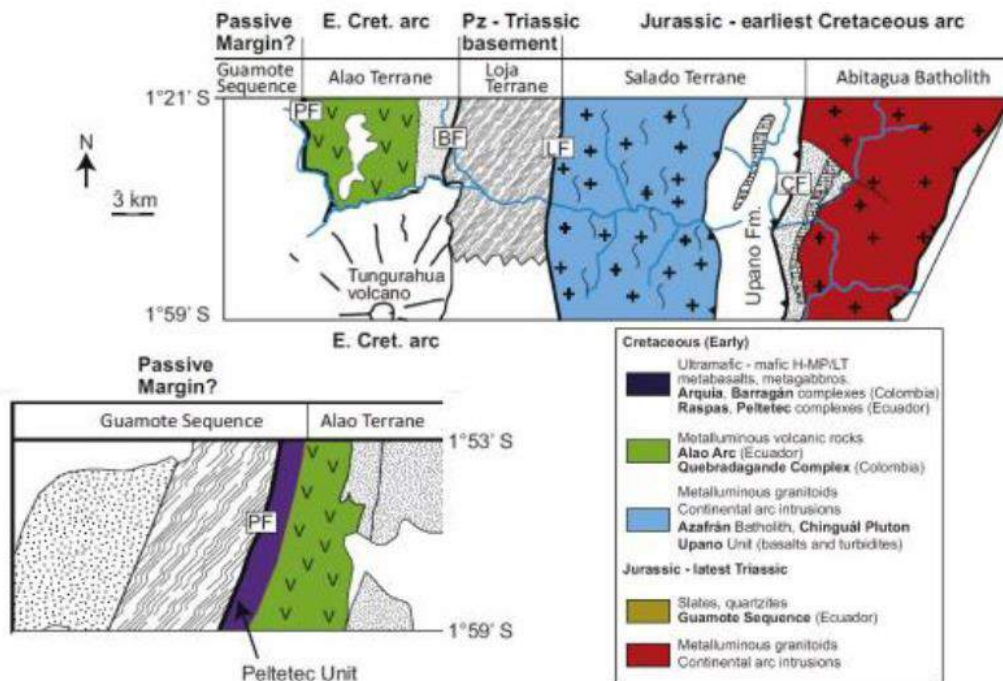


Figura 5. Corte geológico a través de la parte central de la Cordillera Real del Ecuador indicando los terrenos ilustrados por Litherland et al. (1994) (Modificado de Spikings et al., 2015)

2.5 Neotectónica del VI

Debido a la densa vegetación presente en Ecuador, el trabajo de identificar estructuras tectónicas ha resultado complicado. Sin embargo, el análisis sistemático del tamaño de fallas, la geometría y el desplazamiento geomorfológico revelan ciertas características tectónicas.

El sistema de fallas Chingual-Cosanga-Pallatanga-Puná (CCPP) representa el sistema de fallas mejor desarrollado en Ecuador. Constituye el límite tectónico oriental del Bloque Norte Andino y conecta tres subsistemas transpresivos e inversos diferentes. El CCPP tiene unos 800 km de largo, desde el Golfo de Guayaquil en el suroeste de Ecuador hasta el lado oriental de la Cordillera Real en la frontera entre Ecuador y Colombia (Figura 6). Su geomorfología se expresa por uno o más segmentos de falla paralelos que tienen un rumbo N-S a NE-SW. Los segmentos de tendencia Norte-Sur

localizan los hipocentros de varios terremotos históricos importantes, así como la sismicidad instrumental como se describe a continuación.

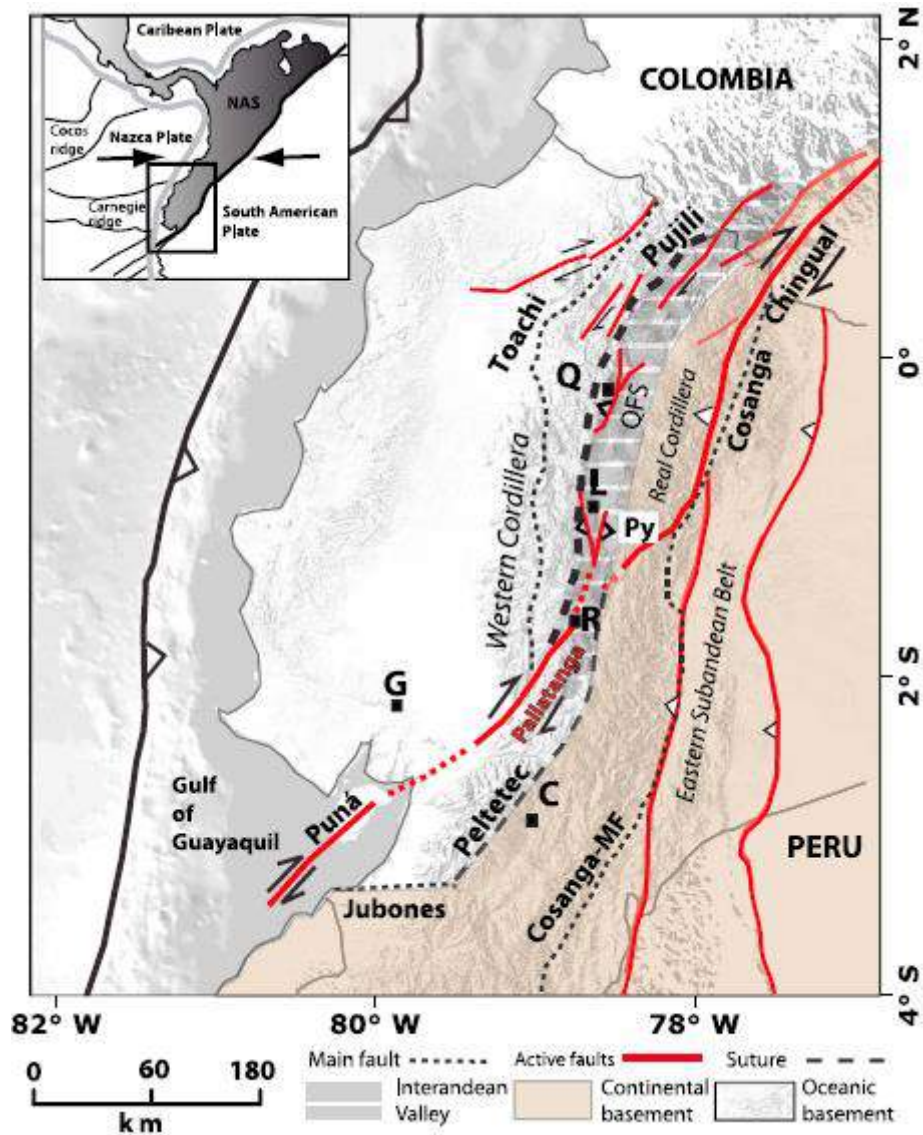


Figura 6. Mapa de tectónica activa del Ecuador. Tomado de (Alvarado A. L., 2016)

Sin embargo, la síntesis tectónica activa presentada anteriormente sugiere la existencia de un microbloque adicional: el Microbloque Quito-Latacunga (Figura 7), que se extiende de este a oeste entre los sistemas de fallas Cosanga y Quito-Latacunga. El límite sur del Microbloque Quito-Latacunga coincide con la zona de falla Pisayambo y su límite norte con los extremos SW de la falla Chingual, donde se producen microsistemas de fallas con prolongaciones de ramales con orientación NNE-SSW (Alvarado A. L., 2016).

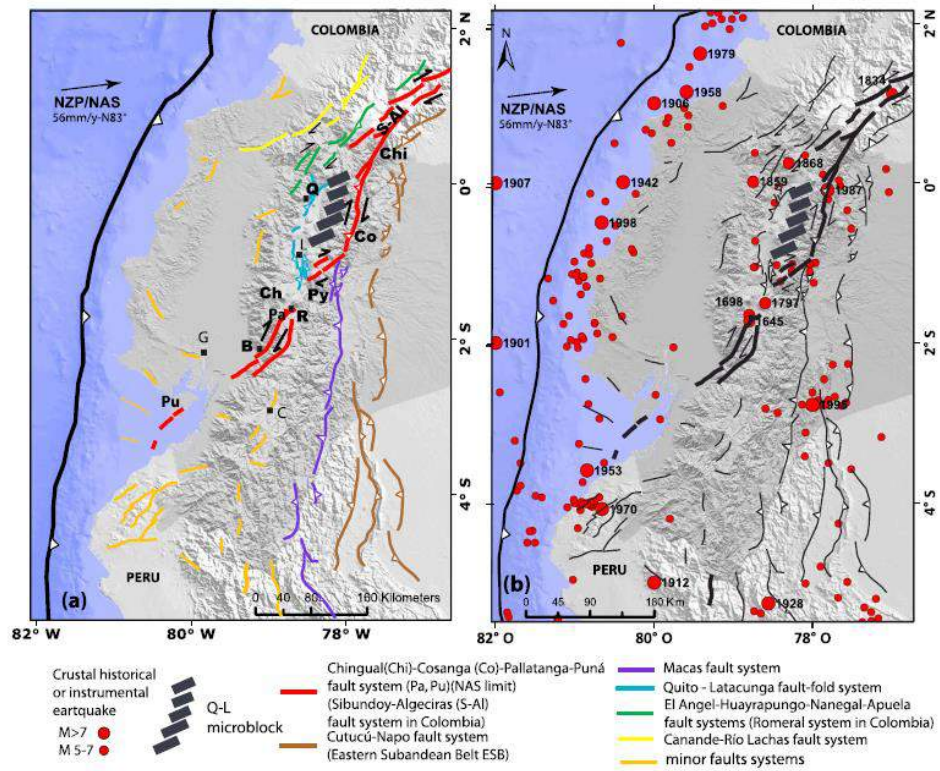


Figure 7. (a) Fallamiento activo del Ecuador: Major active fault systems and their Quaternary kinematics. (b) Sismicidad histórica crustal en Ecuador. Tomado de (Alvarado A. , 2012)

3 VOLCANISMO PLIO CUATERNARIO

El volcanismo plio-cuaternario en Ecuador es un fenómeno importante que ha moldeado el paisaje andino del país. El arco volcánico ecuatoriano se extiende desde $\sim 01^\circ$ N hasta $\sim 02^\circ$ S, con una longitud aproximada de 350 km y un ancho de 150 km. Se distingue por su arco volcánico compuesto por diversos grupos de volcanes con características distintivas (Figura 9).

Cordillera Occidental: Un conjunto de volcanes activos y potencialmente activos de composición silícica andesítica - dacítica (Hughes & Pilatasig, 2002) (Jaillard, 2002), algunos con calderas y conos prominentes, producto de miles de años de erupciones. Las erupciones pasadas generaron extensas capas de ceniza que moldearon el paisaje e impactaron las culturas locales.

Cordillera Oriental: Volcanes más activos y diversos que los de la Cordillera Occidental. Producen flujos de lava y de detritos con mayor frecuencia, y sus erupciones son más variadas, incluyendo andesitas y riolitas (Aspden & Litherland, 1992). Algunos centros riolíticos, como la caldera de Chalupas, son de gran tamaño.

Valle Interandino: Alberga volcanes andesíticos más antiguos y extintos, agrupados en zonas específicas. Sus características químicas sugieren una migración hacia el este en el pasado.

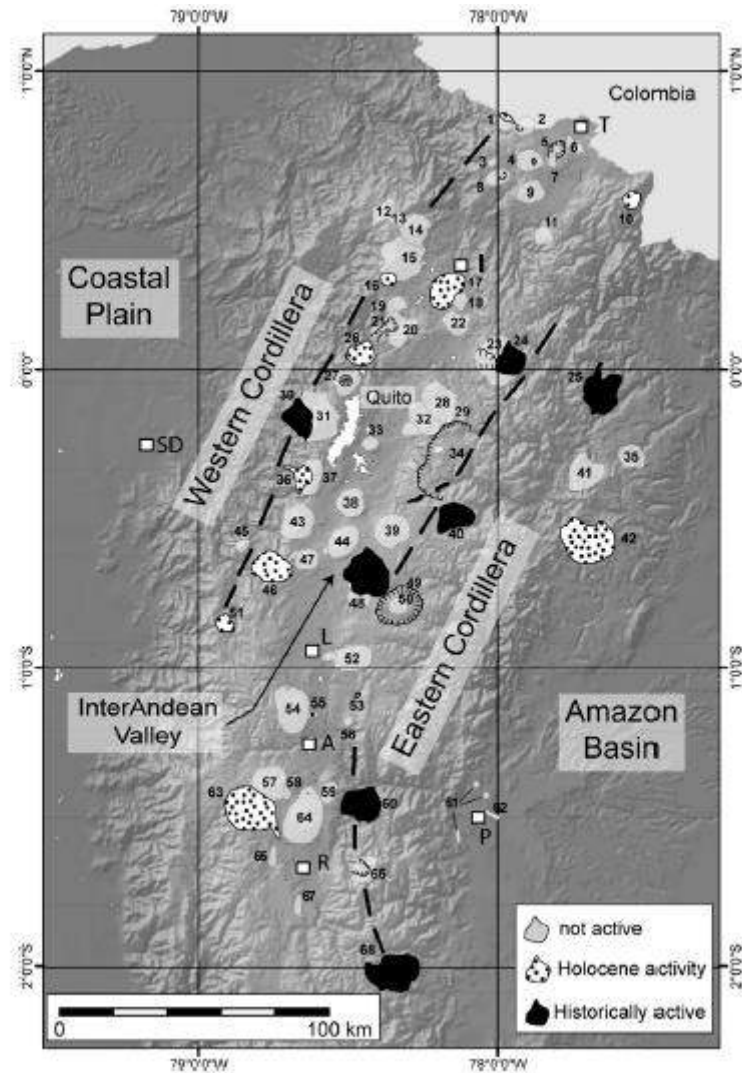


Figura 9. La distribución de los volcanes continentales de Ecuador. Los nombres de los edificios volcánicos son: (1) Cerro Negro de Mayasquer; (2) Chiles; (3) Chiltazón; (4) Potrerillos; (5) Chalpatán; (6) Chulamuez; (7) Horqueta; (8) Iguán; (9) Chaquilulo; (10) Soche; (11) Mangus; (12) Pilavo; (13) Yanaurcu de Piñan; (14) Huanguillaro; (15) Cotacachi; (16) Cuicocha; (17) Imbabura; (18) Cubilche; (19) Cushnirumi; (20) Mojanda; (21) Fuya Fuya; (22) Cusín; (23) Viejo Cayambe; (24) Nevado Cayambe; (25) El Reventador; (26) Pululahua; (27) Casitagua; (28) Pambamarca; (29) Izambi; (30) Guagua Pichincha; (31) Rucu Pichincha; (32) Puntas; (33) Ilaló; (34) Chacana; (35) Yanaurcu; (36) Ninahuilca; (37) Atacazo; (38) Paschocha; (39) Sincholagua; (40) Antisana; (41) Pan de Azúcar; (42) Sumaco; (43) Corazón; (44) Rumiñahui; (45) Almas Santas; (46) Ilinizas; (47) Tres Marías; (48) Cotopaxi; (49) Chalupas; (50) Quilindaña; (51) Quilotoa; (52) Chinibano; (53) Angahuana; (54) Sagoatoa; (55) Larcapungo; (56) Huicutambo; (57) Carihuarazo; (58) Puñalica; (59) Huisla; (60) Tungurahua; (61) Mera; (62) Puyo; (63) Chimborazo; (64) Igualata; (65) Calpi; (66) Altar; (67) Tulabug; (68)

Sangay. Las ciudades incluyen: Tulcán (T), Ibarra (I), Quito (Q), Latacunga (L), Ambato (A), Riobamba (R), Puyo (P) y Sto. Domingo (SD).

Los volcanes del Ecuador albergan rocas de diversas composiciones, desde calc-alkalinas hasta adakíticas (Tabla 1). Este patrón de distribución podría estar relacionado con la profundidad de la fusión, los fluidos liberados por la placa subducida y la interacción variable con la corteza terrestre. Las lavas adakíticas de la Cordillera Occidental presentan firmas isotópicas distintivas en comparación con la Cordillera Oriental, reflejando diferencias en la corteza subyacente. Explicar el componente adakítico involucra diversos modelos como la fusión de la placa, la interacción con la corteza inferior o la separación de minerales a alta presión.

Tabla 1 Principales características del Arco Volcánico Ecuatoriano, según (Hall M.L., 2008)

	Cordillera Occidental	Valle Interandino	Cordillera Real	Tras-Arco
Petrografía	Andesitas de bajo sílice, Andesitas silíceas y Dacitas	Andesitas básicas de 2 piroxenos	Andesitas de bajo y alto sílice, con afinidad calco-alkalina; dacitas y riolitas	Basanitas y Tefritas
Fenocristales	Plagioclasa, Anfíbol, Ortopiroxeno, escasa Biotita y Cuarzo	Plagioclasa, Clinopiroxeno, Ortopiroxeno y escaso Anfíbol	Plagioclasa, Clinopiroxeno, Ortopiroxeno, Biotita y Óxidos de Fe/Ti, escaso Olivino	Piroxeno sódico, Hauyina, Plagioclasa, Óxidos de Fe/Ti, Olivino, Noseano
Geoquímica	60 - 66 % SiO ₂ 0,9 - 1,5 % K ₂ O	57 - 60 % SiO ₂ 0,5 - 1,0 % K ₂ O	56 - 75 % SiO ₂ 1,0 - 4,3 % K ₂ O	42 - 53 % SiO ₂ 0,5 - 1,0 % K ₂ O
Edades	Pleistoceno Tardío a Reciente	Mayor que Pleistoceno Medio hasta Holoceno	Pleistoceno Temprano a Reciente	Pleistoceno Medio a Holoceno
Erupciones importantes	Quilotoa: 800 a AP; Pululahua y Ninahuilca: 2,3-2,4 ka AP; Cuicocha: 2,9-3,0 ka AP; Guagua Pichincha: 1600 DC, 900 DC.	Imbabura: Holoceno	Sangay: erupciones permanentes desde tiempos pre-hispánicos - Reciente Tungurahua: 1640 DC, 1773DC, 1886 DC, 1916-1918 DC, 1999 DC-Presente Cotopaxi: 4,5 y 2,2 ka AP; Yarangala: 165-180 ka; Chalupas: 211 ka	Reventador: 2002 - actualidad

3.1 Geocronología volcánica

Los métodos de datación en geocronología volcánica se dividen en dos grupos: absolutos y relativos. Los métodos absolutos, como el radiocarbono (¹⁴C) y el potasio-argón (K/Ar), proporcionan una edad numérica exacta. Los métodos relativos, como la ley de superposición y el principio de intersección, establecen la relación temporal entre diferentes unidades geológicas.

3.1.1 El método argón-argón ($40\text{Ar}/39\text{Ar}$)

Es una técnica de datación radiométrica que ofrece mayor precisión que el método K/Ar. Se basa en la medición de la relación entre los isótopos de argón 40Ar y 39Ar . Este método permite datar una amplia variedad de rocas volcánicas, incluyendo lavas, piroclastos y rocas sedimentarias de origen volcánico.

3.1.2 Datación Radiométrica para el Estudio Presente

La presente sección analiza los datos de datación radiométrica de dos muestras del área de estudio. Se muestra la ubicación de las muestras, el tipo de roca y la edad obtenida con el método Ar-Ar, los datos fueron proporcionados por (Mothes, 2023)

Tabla 2. Geocronología Volcánica Ar-Ar de la zona de estudio. El Autor.

GEOCRONOLOGÍA VOLCÁNICA				
Muestra	UTM X	UTM Y	Edad Aprox	Tipo de Roca
WP-309	775900	9887700	1-2M	Toba Biotítica
WP-290	780900	9883300	1-2M	Andesita Plagio-Hornblenda

Se realizó un mapa representando la ubicación de las muestras, así como su edad respectiva

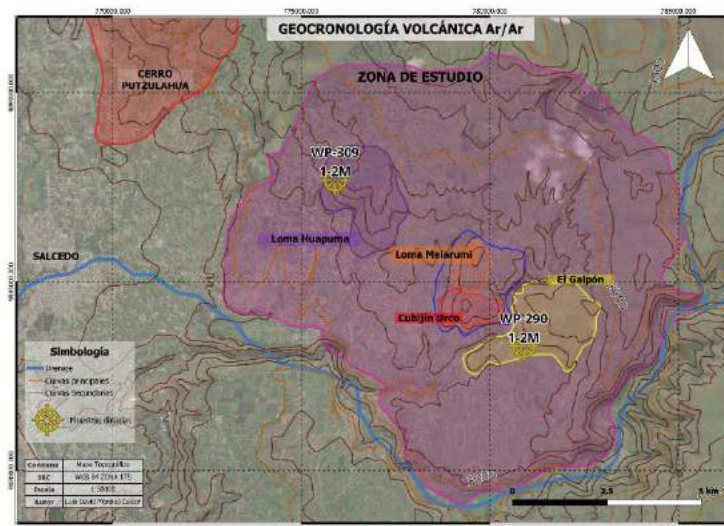


Figura 10. Representación de la ubicación de las muestras WP-309 y WP-290 en la zona de estudio; se observa el mismo rango de edades (1-2M) en las zonas de “Loma

Huapuma” y “El Galpón” por lo que se interpreta que para la “Loma Melarumi” y “Cubijín Urco” las edades son similares. El Autor

Las muestras analizadas abarcan un rango temporal de 1 a 2 millones de años, lo que evidencia una actividad volcánica continua en la región durante el Pleistoceno Temprano lo que concuerda con los datos obtenidos por (Hall M.L., 2008) en la Tabla 1 . Esta actividad se caracterizó por diferentes fases eruptivas que dieron lugar a una variedad de rocas volcánicas, desde tobas biotíticas hasta andesitas plagio-hornblenda. La diversidad de tipos rocosos presentes indica una composición variable del magma que alimentó el vulcanismo en la zona, permitiendo inferir cambios en las condiciones geológicas del subsuelo durante el período estudiado.

4 ESTRATIGRAFÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO

4.1 Formación Pisayambo

La Formación Pisayambo, aflorando al este de la Cuenca Latacunga-Ambato, se extiende desde Píllaro hasta la Laguna de Antejos y cubre la Cordillera Real del Parque Nacional Llanganates. Su origen volcánico, aún sin precisar, se asocia a fisuras de la Cordillera Real. De edad Pliocénica, se encuentra sobre las Formaciones Macuchi o Yunguilla y bajo la Formación Latacunga, con discordancia erosiva y se encuentra compuesta por rocas afaníticas grisáceas con cristales de anfíbol y plagioclasas, presenta en sección delgada una textura traquítica andesítica.



Figura 11. Contacto estratigráfico entre la Fm Pisayambo y la Fm Cangahua en la Loma Huapuma

4.2 Formación Latacunga

La Formación Latacunga aflora en la Cuenca Latacunga-Ambato, extendiéndose desde Latacunga hasta el sur de Ambato. Se originó como una secuencia de depósitos fluvio-lacustres en la cuenca que lleva su nombre. Dataciones K-Ar indican que la formación tiene una edad de 1.4 a 1.85 millones de años, reposando en

discordancia angular sobre la Formación Pisayambo y siendo sobreyacida por la ignimbrita Chalupas. (Dávila, 1990) la divide en dos unidades:

- Unidad Volcanosedimentaria: compuesta por una facies volcánica en la base y una sedimentaria en la parte superior.
- Unidad Fluvio-Lacustre: formada por sedimentos fluviales y lacustres, incluyendo limos, areniscas y conglomerados.

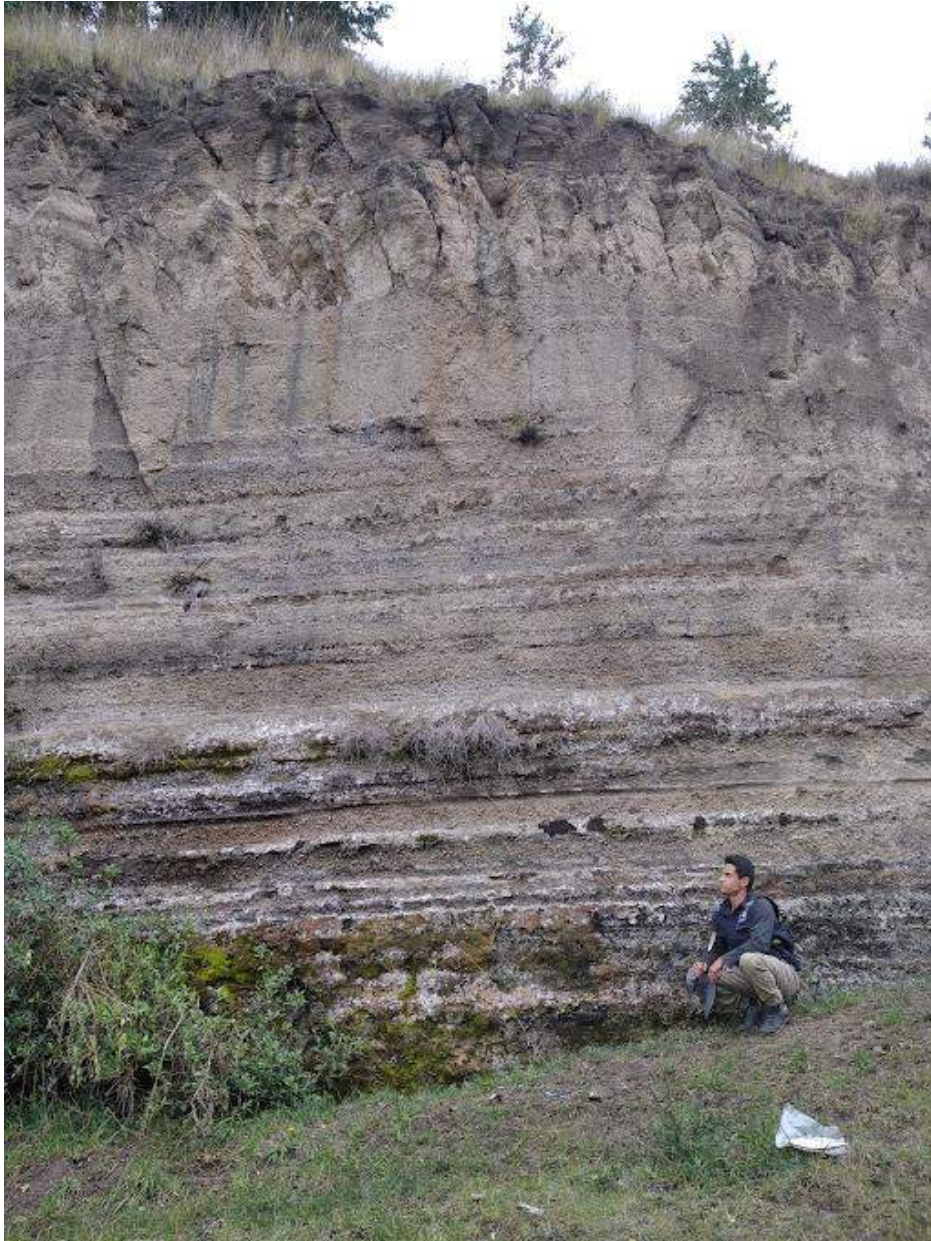


Figura 12. Series volcanosedimentarias .Bajando Loma Melarumi. El Autor



Figura 13. Se observan en la Figura 12 distintos estratos volcansedimentarios de grano grueso a medida que se aleja del tope de los domos. El Autor



Figura 14. Contacto entre Fm Pisayambo y Unidad Volcanosedimentaria. Bajando de los domos. El Autor



Figura 15. Se observan en la Figura 14 distintos estratos volcansedimentarios de grano fino a medida que se aleja del tope de los domos. El Autor

4.3 Deformaciones

La Formación Latacunga ha experimentado diversos tipos de deformaciones a lo largo de su historia geológica. La más notable es la Flexura de Yanayacu, una estructura monoclinical que genera un desnivel de 200 metros en la cuenca Latacunga-Ambato. Asociadas a esta flexura se encuentran fallas inversas menores. La Unidad Fluvio-Lacustre de la formación presenta evidencia de deformación sinsedimentaria, indicando inestabilidad durante la sedimentación. Fracturas de cantos en los conglomerados revelan deformación posterior a la acumulación de estos materiales. Finalmente, se observan fallas normales en los Volcánicos pre-Chalupas, posiblemente relacionadas con procesos extensionales asociados al volcanismo o con fenómenos gravitacionales.

Unidades posteriores a la Formación Latacunga:

- Volcánicos pre-Chalupas: Depósitos laminados de tobas de ceniza y tobas de lapilli.
- Ignimbrita de Chalupas: Depósito volcánico de gran extensión.
- Formación Cangahua: Depósitos lacustres.



Figura 16. Estratigrafía de la zona de estudio. Modificado de (OBANDO, 2012)

5 ANÁLISIS GEOQUÍMICOS

5.1 Elementos Mayores

Se realizaron estudios geoquímicos en la zona de estudio y posteriormente se comparó con datos de la zona de Pisayambo, Cerro Putzulahua y Volcán Cotopaxi con el fin de analizar las distintas firmas geoquímicas de dichas series. Debido a que estas zonas se encuentran afectadas por el sistema de fallas CCPP, se esperan obtener resultados sintéticos que permitan llegar a una conclusión razonable sobre el mecanismo de ascenso magmático y generación del conjunto de domos.

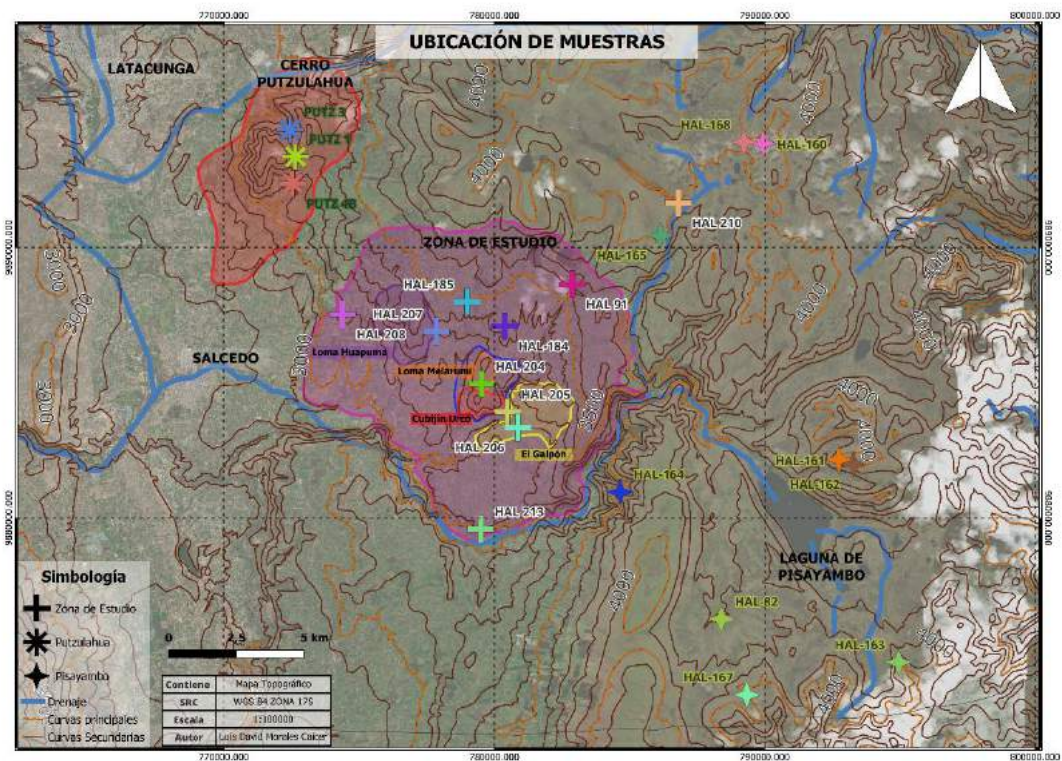


Figura 17. Representación de la ubicación de las muestras de: zona de estudio, zona de Pisayambo y Cerro Putzulahua. El Autor

Mediante el estudio de los óxidos mayores otorgado por (Mothes, 2023) se determinó la clasificación petrológica mediante , afinidad geoquímica y composición mineralógica.

Tabla 3. Datos de óxidos mayores del área de estudio. El Autor

Samples	UTM X	UTM Y	Z	SiO2	TiO2	Al2O3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	P2O5
HAL-184	780380	9887100	3410	70.1060121	0.32423697	16.6712738	2.1045561	0.08779181	0.53448503	2.46788737	4.44806658	3.14191821	0.11376174
HAL-185	779000	9888000	3460	56.7939319	0.88855103	16.9366691	7.24664703	0.12638041	5.26391146	7.63287062	3.44164147	1.4718154	0.19758165
HAL 204	779530	9884960	3390	68.5309656	0.40662153	16.5941091	2.71901358	0.09903095	0.78721766	3.02424191	4.42927789	3.24579388	0.16371773
HAL 205	780480	9883920	3190	68.6618899	0.39621201	16.4973641	2.73160131	0.09678237	0.92102552	2.98154237	4.88820265	2.67659041	0.14878937
HAL 206	780872	9883350	3161	67.3555966	0.46312033	16.7879225	3.18236789	0.10125702	1.01193543	3.4956913	4.56915906	2.82590017	0.20705986
HAL 207	777850	9886900	3302	57.4373532	0.7446253	15.7631515	6.8075131	0.11489541	6.34245929	7.58649478	3.65091599	1.35637522	0.19622621
HAL 208	774386	9887536	3140	58.0462509	0.78333194	16.2810575	6.851062	0.11126863	5.05216794	7.30484475	3.73362242	1.62245206	0.21394183
HAL 210	786800	9891660	4080	59.4896454	0.93655583	18.0935367	6.34063214	0.10003885	2.66667986	5.90408887	4.12361737	2.08995502	0.25523988
HAL 213	779500	9879590	3200	62.2878314	1.47065288	15.2042846	6.7518733	0.09977246	1.68628332	4.14237785	4.17772777	3.64174505	0.53744138
HAL 91	782872	9888650	3600	66.0013283	0.5156358	19.3818163	4.16332872	0.08444597	0.85418521	2.96636952	3.60175212	2.28468828	0.14784514

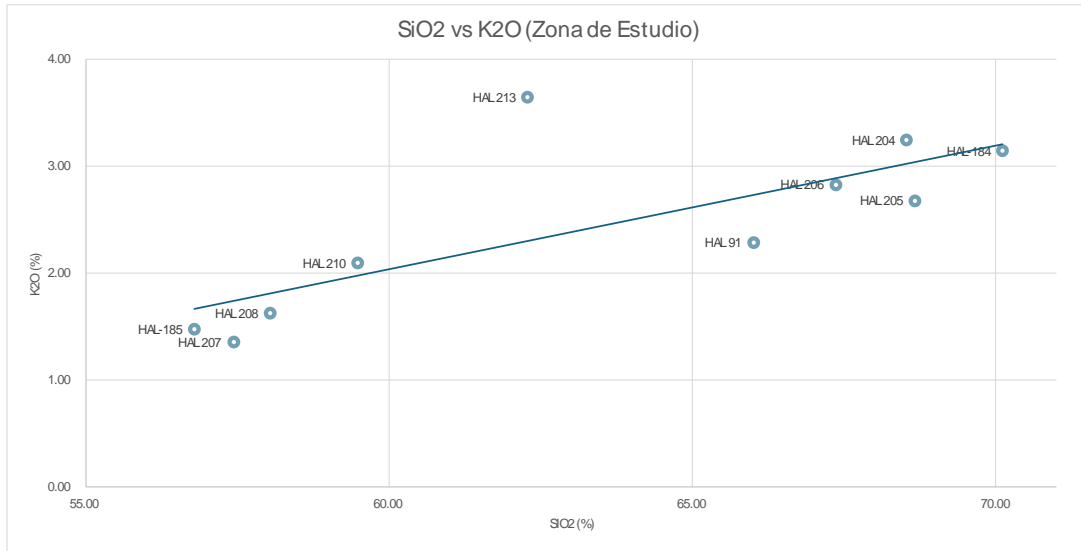


Figura 18. Diagrama SiO2 vs K2O. El Autor

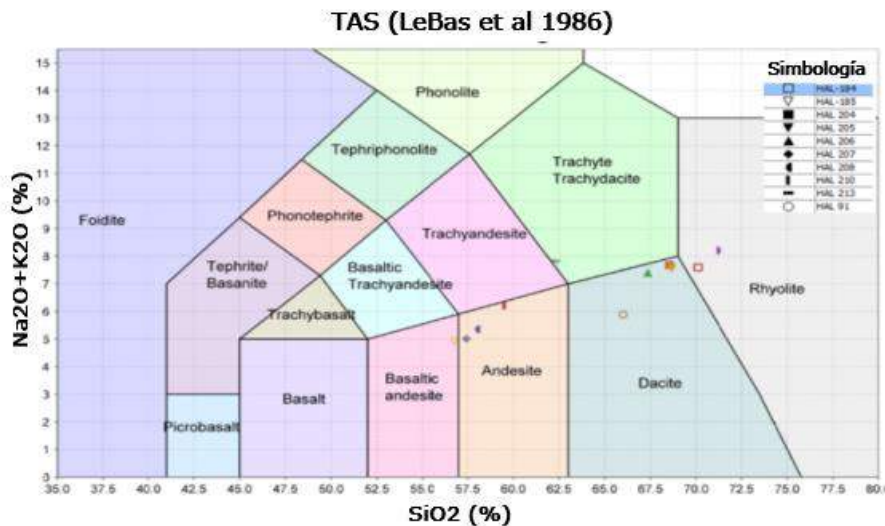


Figura 19. Diagrama TAS de los datos geoquímicos de la zona estudiada. El Autor

Según las Figuras 18 y 19, el contenido de potasio es alto, lo que sugieren series de afinidad calco-alcalina (Pecerillo, 1976). Mientras que en el diagrama TAS se obtienen rocas andesíticas a riolíticas, lo que indica un magmatismo de tipo bimodal, con magmas ácidos a intermedios

5.2 Elementos traza

Se realizó el análisis de elementos traza mediante diagramas multielementos normalizado a condrita y corteza superior mediante el uso de la tabla:

Tabla 4. Datos de elementos traza para la zona de estudio. El Autor

Samples	Ni	Cr	Sc	V	Ba	Rb	Sr	Zr	Y	Nb	Ga	Cu	Zn	Pb	La	Ce	Th	Nd	U
HAL 204	2.5	2.8	4	14.9	886.1	90.4	459.2	178.3	14.9	9.3	18.3	2.3	67.9	17.5	21.9	45.3	10.5	20.5	5.7
HAL 205	2.7	3.6	5.2	8.5	897.7	77.1	462.2	176.2	16.4	9.1	18.1	4.1	70	18.1	21.4	43	9.4	23.7	3.1
HAL 206	2.8	2.7	4.5	25.9	826.3	85.7	487.1	167.5	15.4	8.5	18.6	0.6	72.6	16.9	21.9	38.7	9.1	17	5.5
HAL 207	97.4	360	22.1	171.8	540.4	30.8	644.1	107.1	13.1	4.3	17.6	53.6	82.5	6.6	17.8	35.9	5.4	18.3	1
HAL 209	7.2	2.4	4.1	3.8	1322.9	91.2	256.3	293.4	19.6	16.8	19.8	1.7	90.1	22.7	38.8	80.5	13.1	36.4	3
HAL 210	25.7	28.9	13.9	173.1	795.5	67.5	593	159	18.6	7.4	19.8	53.7	80.7	11	24.2	47.7	9.1	24.9	4.1
HAL 213	9.3	2.3	13.9	164.1	1173.7	128.9	370.9	355.4	37.4	18.5	20.1	85	100.4	22.5	40.6	88.5	16.7	44.9	6.4
HAL-184	4.4	4.3	3.1	9.5	953.8	92.7	411.1	190	12.6	8.3	18.4	4.5	64.6	18.9	22.3	41	11.1	18.8	5.4
HAL-185	55.8	110.9	20.9	194	597.9	35.4	538.1	109.2	16.4	5.4	17.4	42.6	80.8	10	17.2	30	3.9	18.1	1.3
HAL 91	10.7	9.3	4.8	26	887.2	81.7	431.4	164.3	19.1	7.7	19.6	18.6	70.6	17.4	22.5	38.5	10.8	24.6	5.3

Diagrama Multielementos

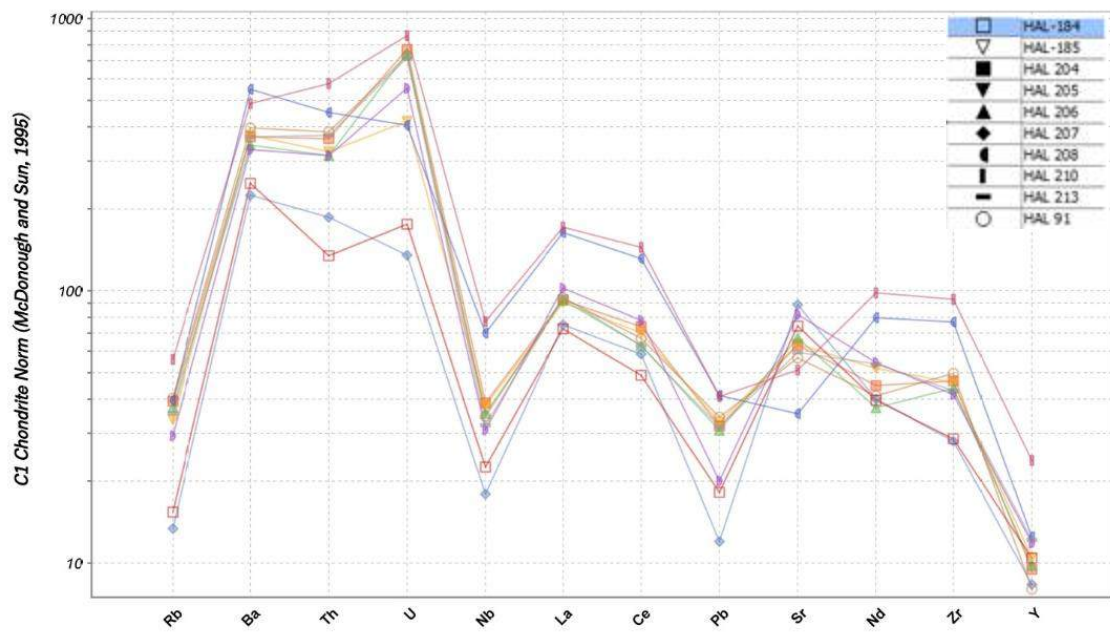


Figura 20. Diagrama multielementos de la zona de estudio comparado a condrita. Se observa una tendencia decreciente con un alto contenido de Ba y U y bajo contenido de Rb, Nb, Pb e Y. El Autor

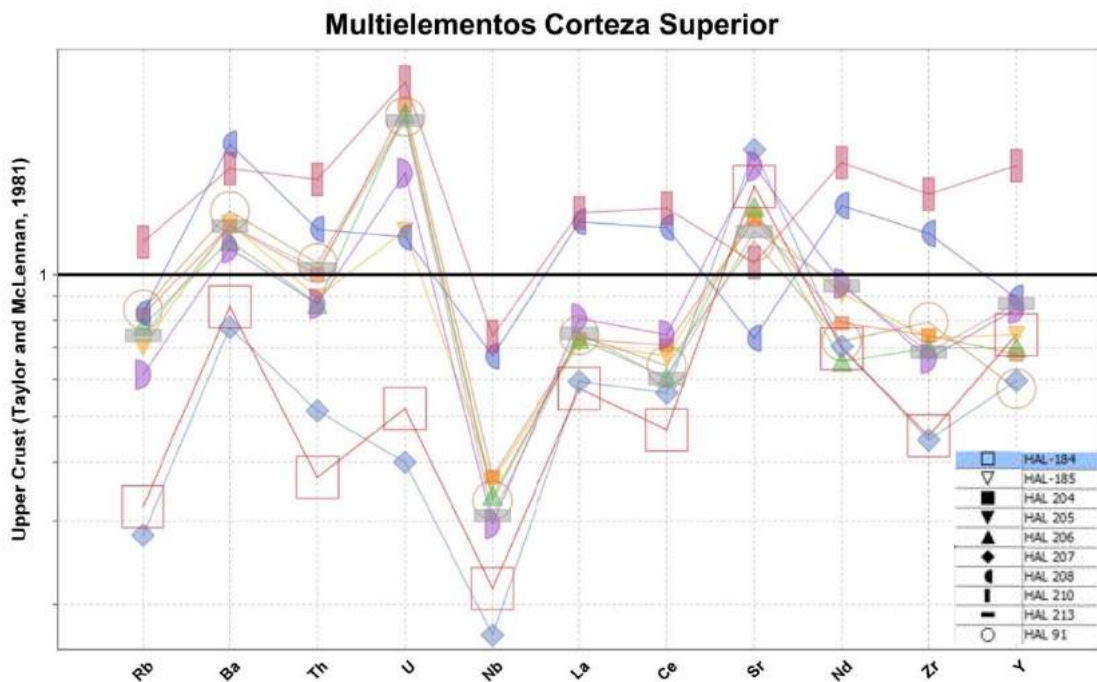


Figura 21. Diagrama multielementos de la zona de estudio comparado a Corteza Superior. Se observan los mismo patrones que la Figura 15. El Autor

Los diagramas muestran un magma con alto Ba, U, Sr, Nd, Y y bajo contenido de Rb, Nb y Zr en un diagrama spider de corteza superior indica un magma calco-alcálico que se originó en la corteza continental, probablemente a partir de la fusión de corteza. El magma ha experimentado un proceso de fraccionamiento magmático y ha asimilado material de la corteza continental durante su ascenso (McLennan, 1985).

5.3 Relación entre las muestras de la zona estudiada con putzulahua, Series Andesíticas (Cotopaxi) y Pisayambo

5.3.1 Cerro Putzulahua

Se realizó el análisis de cuatro muestras del Cerro Putzulahua con información provista por parte de (Mothes, 2023), donde se determinó su clasificación petrológica y afinidad geoquímica.

Tabla 5. Datos de óxidos mayores para Putzulahua. La Figura 11 muestra la ubicación de las rocas estudiadas. El Autor

Samples	UTM X	UTM Y	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	Mgo	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
PUTZ 1	772400	9893000	64	0.52	16.3	5.09	0.11	2.03	5.6	3.27	1.73	0.17
PUTZ 3	772200	9894000	74.6	0.11	13.8	1.05	0.05	0.22	1.32	3.86	3.09	0.04
PUTZ 4B	772300	9892000	75.8	0.1	13.55	1.01	0.05	0.21	1.36	4.1	3.15	0.05
PUTZ 4A	772300	9892000	75.9	0.1	13.5	1	0.05	0.22	1.37	4.06	3.12	0.05

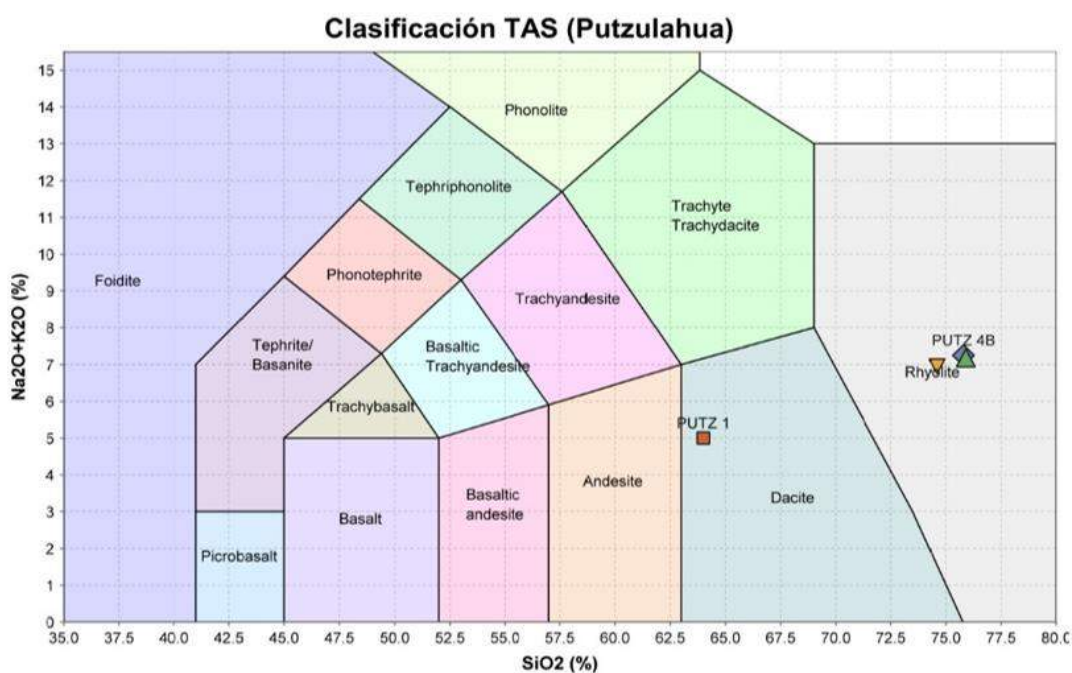


Figura 22. Diagrama de clasificación TAS obtenido para el Cerro Putzulahua. El Autor

La clasificación TAS sugiere que la composición magmática del Cerro Putzulahua es de características dacíticas a riolíticas, que comparativamente con la zona de estudio se representa como un magma mas uniforme y que ha sufrido mejor diferenciación magmática.

Tabla 6. Datos de Elementos traza del Cerro Putzulahua. El Autor

Samples	UTM X	UTM Y	Ni	Cr	Sc	V	Ba	Rb	Sr	Zr	Y	Nb	La	Ce	Th	Nd
PUTZ 1	772400.00	9893000.00	25.00	19.00	15.40	132.00	535.00	63.00	445.00	88.00	10.00	4.00	12.70	25.50	2.90	12.60
PUTZ 3	772200.00	9894000.00	1.50	3.50	1.80	1.80	1115.00	117.00	262.00	41.00	6.60	7.70	20.80	40.00	8.80	15.50
PUTZ 4B	772300.00	9892000.00	1.50	3.00	1.80	1.80	1180.00	117.00	266.00	43.00	7.80	7.80	22.60	39.50	10.00	16.00
PUTZ 4A	772300.00	9892000.00	0.50	3.00	1.60	1.60	1160.00	115.00	270.00	44.00	8.00	8.40	22.00	40.00	10.00	16.00

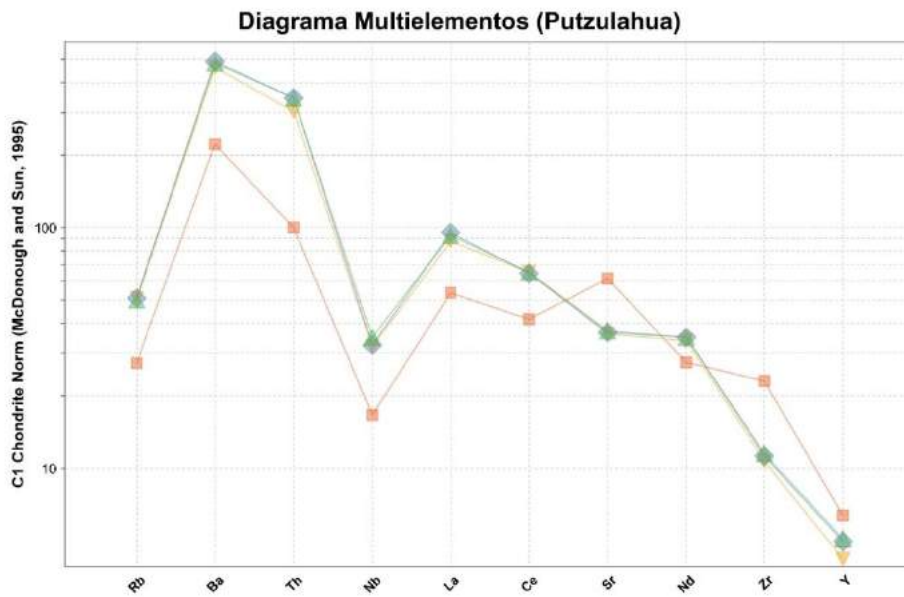


Figura 23. Diagrama multielementos del Cerro Putzulahua comparado a Condrita. El Autor

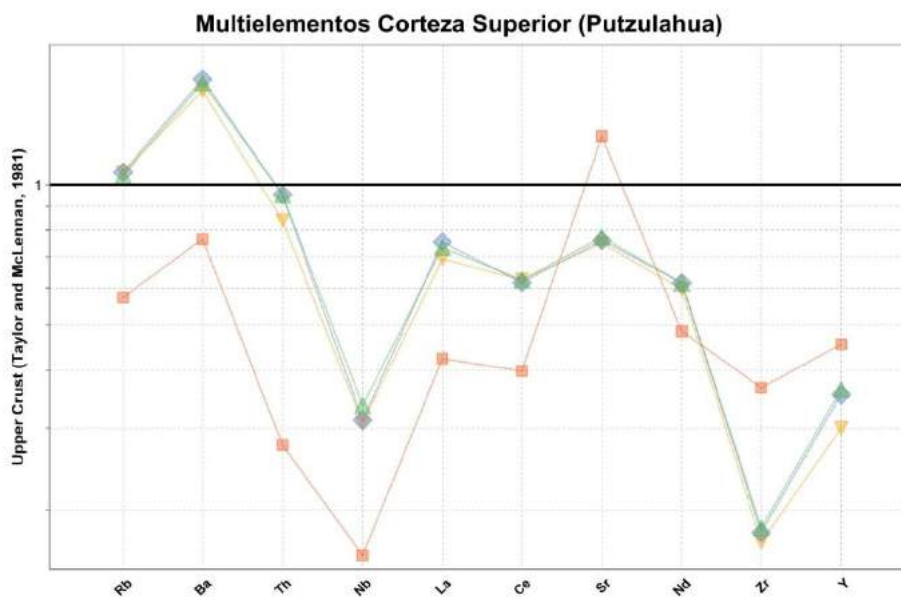


Figura 24. Diagrama multielementos del Cerro Putzulahua comparado a Corteza Superior. Se observan los mismos patrones que la Figura 18. El Autor

Los diagramas Spider con coherentes con la clasificación petrográfica del Cerro Putzulahua. Se obtienen picos de elementos incompatibles (Ba, Th y Sr) que sugieren

que se ha producido cristalización fraccionada y las tendencias obtenidas indican un tipo de magma evolucionado con características félsicas, en este caso rocas ígneas ricas en sílice.

5.3.2 Series Andesíticas

Corresponde a un conjunto de muestras de carácter calco-alcalino (Ancellin, 2017) de volcanes como: Tungurahua, Reventador, Antisana, entre otros. Sin embargo, para el estudio presente se realizó el análisis rocas obtenidas en el volcán Cotopaxi (Mothes, 2023).

Tabla 7. Datos de óxidos mayores del Volcán Cotopaxi

SAMPLES	UTM X	UTM Y	SiO ₂	TiO ₂	AL ₂ O ₃	FeO	MnO	Mgo	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
Cotopaxi 1	772200	9924100	56.6	0.77	17.7	7.75	0.12	4.2	7.62	3.72	1.07	0.18
Cotopaxi 2	781000	9929000	56.7	0.85	17.57	8.08	0.12	3.81	6.95	4	1.24	0.25
Cotopaxi 3	789400	9933100	57.25	0.81	18.3	7.78	0.11	3.42	6.9	4	1.29	0.2
Cotopaxi 4	789400	9925200	57.25	0.83	17.23	7.92	0.11	4.35	7.02	3.9	1.23	0.21
Cotopaxi 5	788000	9932500	57.4	0.82	18.35	7.85	0.11	3.3	6.85	3.89	1.21	0.19
Cotopaxi 6	785000	9932000	57.5	0.79	17.9	7.7	0.12	3.55	6.88	3.83	1.37	0.24
Cotopaxi 7	772200	9924100	57.4	0.8	17.6	7.7	0.11	3.62	6.8	3.82	1.33	0.2
Cotopaxi 8	785300	9933900	57.6	0.8	17.2	7.38	0.11	4.09	6.88	3.82	1.39	0.22
Cotopaxi 9	772200	9924100	58	0.85	17.8	6.86	0.1	3.04	6.56	4.12	1.44	0.26
Cotopaxi 10	785400	9930400	59.3	0.82	17.36	7.11	0.1	3.27	6.44	4.1	1.46	0.23

5.3.3 Pisayambo

Según (Muñoz, 2022) en un estudio realizado en las estribaciones de la laguna Pisayambo (Figura 17), comprenden rocas Andesíticas-Riolíticas que representan una variedad de tipos de rocas volcánicas con afinidad calco-alcalina y series con alto potasio.

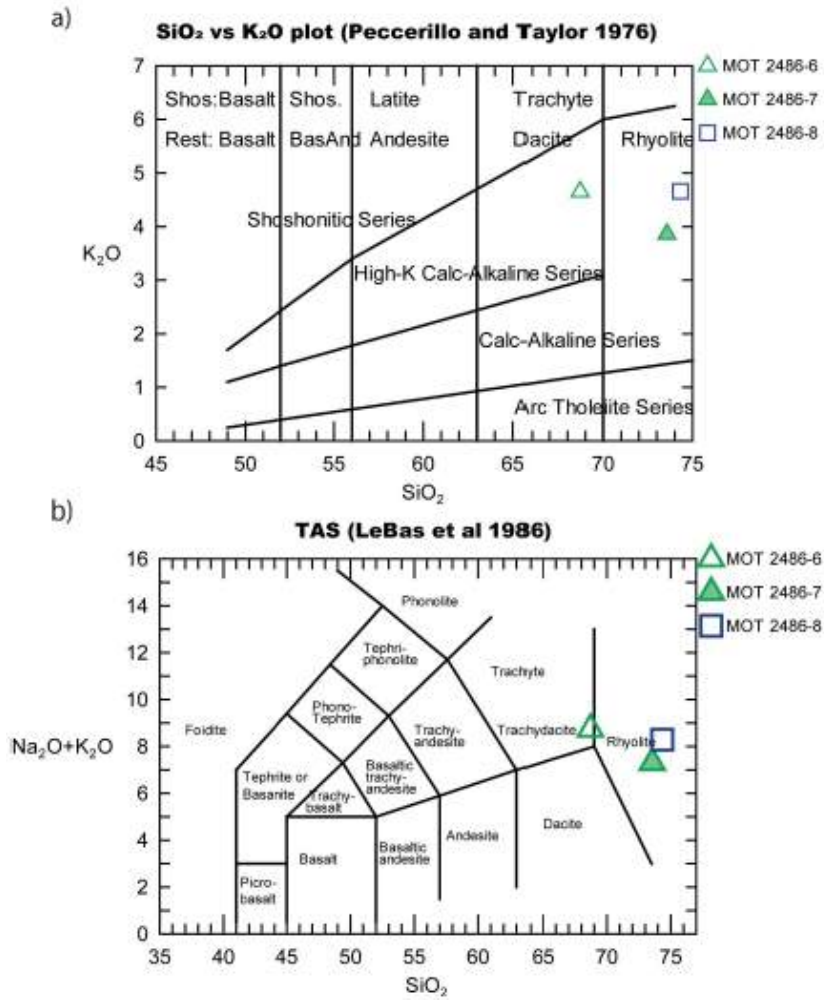


Figura 25. Diagramas de óxidos mayores. SiO₂ vs K₂O y TAS. Tomado de (Muñoz, 2022)

Mediante la obtención de datos geoquímicos (óxidos mayores) otorgados por (Mothes, Geoquímica Pisayambo, 2023)

Tabla 8. Datos de óxidos mayores de la zona de Pisayambo. El Autor

SAMPLES	UTM X	UTM Y	Clasificación	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
HAL-82	788144	9875900	Pisayambo-Younger Pyroclasts	74.52	0.25	14.09	1.41	0.04	0.24	1.22	3.39	4.78	0.05
HAL-161	792487	9881795	Pisayambo-Younger Pyroclasts	61.36	0.82	17.22	6.15	0.09	2.34	5.14	4.21	2.42	0.25
HAL-162	793030	9881621	Pisayambo-Younger Pyroclasts	57.23	0.93	16.44	7.65	0.12	4.76	7.15	3.72	1.76	0.24
HAL-163	794700	9874300	Pisayambo-Younger Pyroclasts	54.73	1.23	19	8.77	0.14	2.2	8.35	3.81	1.45	0.32
HAL-167	789090	9873100	Pisayambo-Younger Pyroclasts	68.01	0.61	15.74	3.71	0.06	0.59	1.97	4.58	4.6	0.12
HAL-160	789686	9893488	Pisayambo-Lavas-Older	57.11	0.89	17.1	7.85	0.12	4.17	7.01	3.54	1.94	0.27
HAL-164	784400	9880600	Pisayambo-Lavas-Older	70.54	0.28	15.75	2.54	0.06	0.63	2.67	4.63	2.75	0.14
HAL-165	785890	9890090	Pisayambo-Lavas-Older	63.27	0.96	17.21	5.65	0.09	1.34	3.9	4.87	2.34	0.37
HAL-168	788989	9893537	Pisayambo-Lavas-Older	57.22	0.88	16.99	7.73	0.13	4.27	7.05	3.55	1.92	0.26

5.4 Relación entre óxidos

Mediante el análisis de óxidos mayores se interpreta que las rocas pertenecientes al conjunto de domos presentan mayor diferenciación magmática que las series de Putzulahua y Cotopaxi.

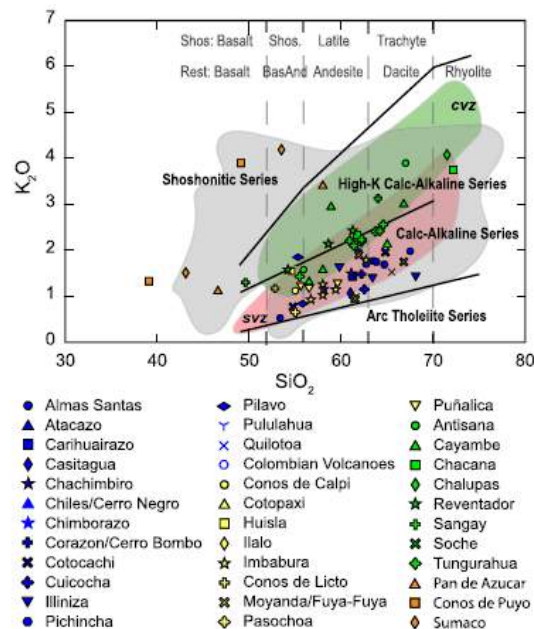


Figura 26. Diagrama SiO₂ vs K₂O realizado para los volcanes del Ecuador. Nótese que las series andesíticas de Cotopaxi se ubican en un ambiente calco-alcalino.

Tomado de (Ancellin, 2017)

Al igual que las series de Pisayambo, las muestras del presente estudio exhiben alto rango de composición magmática (coherente con los datos obtenidos anteriormente) y señalan afinidades calco-alcalinas con alto potasio.

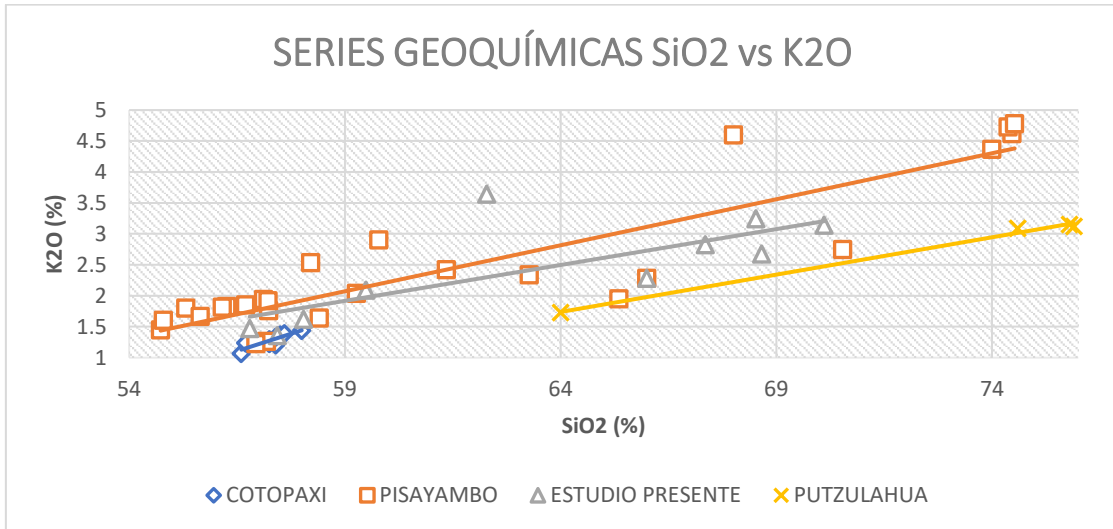


Figura 27. Comparación SiO₂ vs K₂O entre el estudio presente y series geoquímicas: Cotopaxi, Pisayambo y Putulagua. El Autor

5.4.1 Cristalización Fraccionada

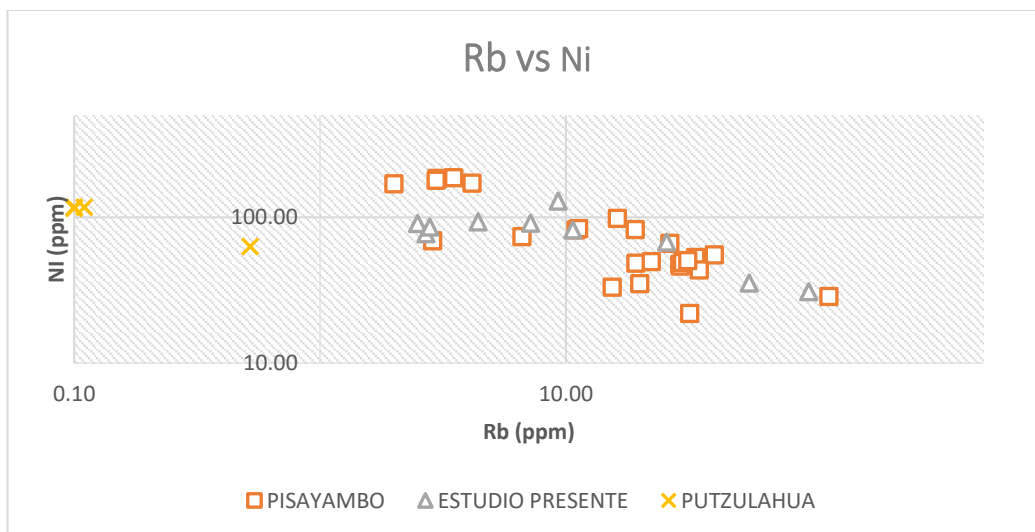


Figura 28. Comparación Rb vs Ni entre el estudio presente y series geoquímicas: Pisayambo y Putulagua. El Autor

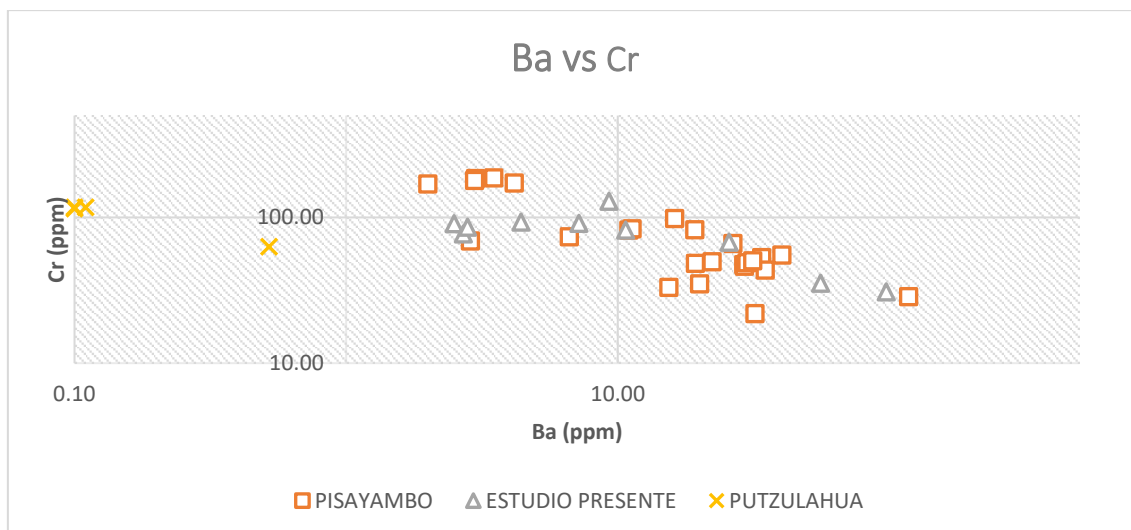


Figura 29. Comparación Ba vs Cr entre el estudio presente y series geoquímicas: Pisayambo y Putulahua. El Autor

Según las Figuras 28 y 29 la tendencia decreciente puede indicar un proceso de fraccionamiento cristalino. A medida que el magma se enfría y cristaliza, los minerales que se forman primero (como los que contienen Rb y Ba) son incompatibles con los elementos que se encuentran en mayor abundancia en el magma residual (como Ni y Cr). Estos últimos elementos se concentran en el magma residual, lo que genera una disminución en la relación $X(\text{Rb})/Y(\text{Ni})$ y $X(\text{Ba})/Y(\text{Cr})$ a medida que avanza la cristalización.

El tipo de mineral que se fracciona puede ser deducido a partir de la pendiente de la línea de tendencia. Por ejemplo, una pendiente pronunciada puede indicar el fraccionamiento de un mineral rico en Rb y Ba, como la plagioclasa.

La asimilación de corteza continental puede producir una disminución en la relación $X(\text{Rb})/Y(\text{Ni})$ y $X(\text{Ba})/Y(\text{Cr})$ del magma. La corteza continental es rica en elementos como Ni y Cr, por lo que su asimilación por parte del magma aumentará la concentración de estos elementos en el magma.

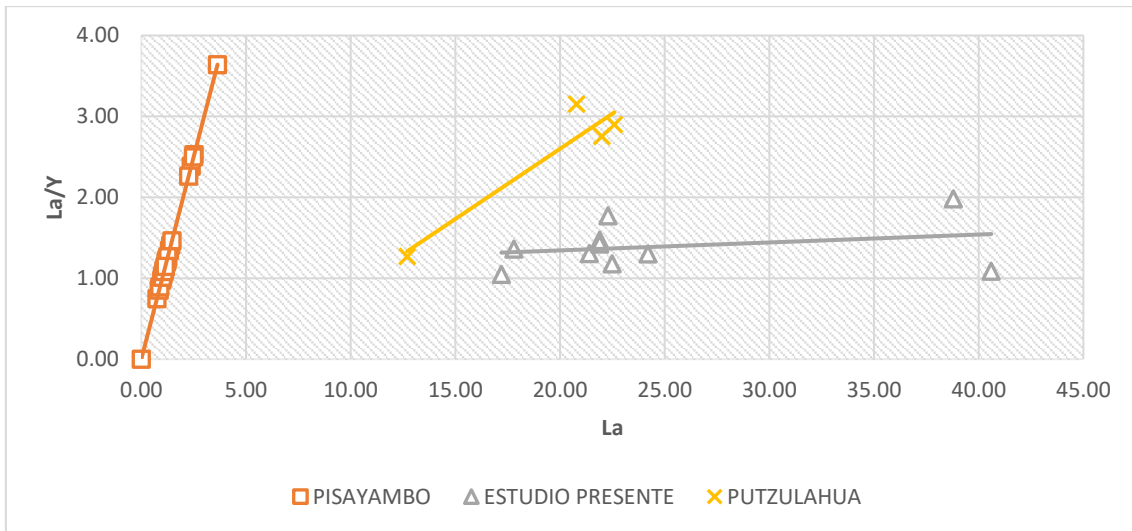


Figura 30. Comparación La vs La/Y entre el estudio presente y series geoquímicas: Pisayambo y Putulahua. El Autor

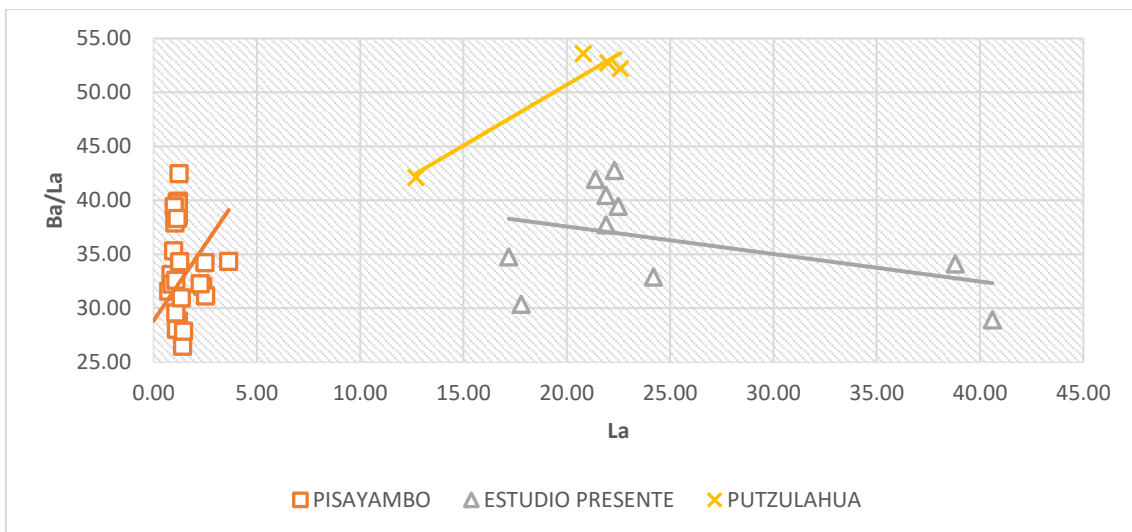


Figura 31. Comparación La vs Ba/La entre el estudio presente y series geoquímicas: Pisayambo y Putulahua. El Autor

Las Figuras 30 y 31 sugieren que las muestras estudiadas presentan un magma con un grado moderado de fraccionamiento de cristal, con la plagioclasa como principal mineral fraccionado. La tendencia ligeramente creciente en el diagrama Y(La/Y) indica una evolución magmática hacia un mayor grado de fraccionamiento, mientras que la tendencia decreciente en el diagrama Y(Ba/La) podría indicar la entrada de un

componente magmático más primitivo. De lo contrario, las series de putzulahua y pisayambo tienen presentan características de asimilación de corteza mas marcado.

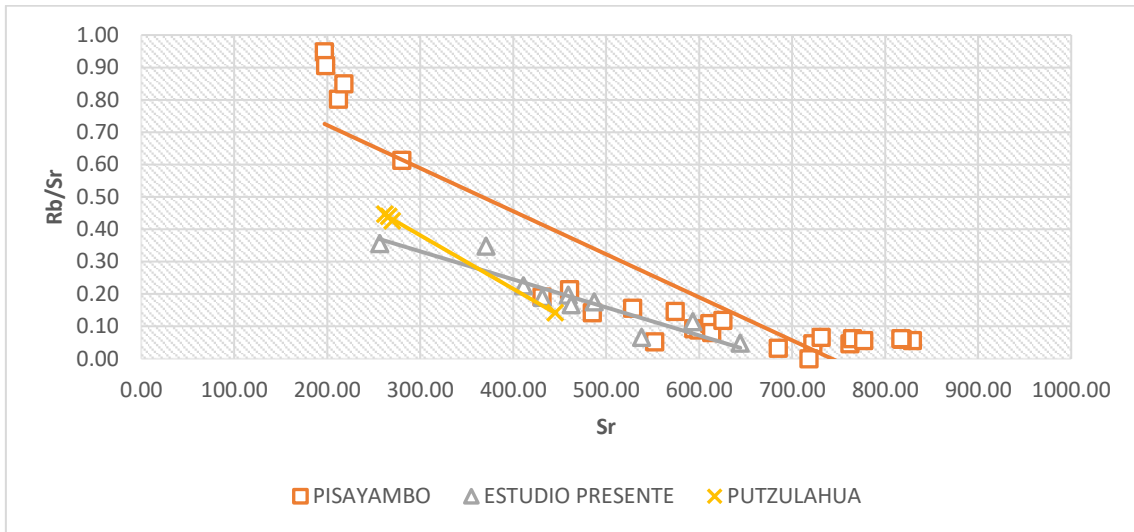


Figura 32 . Comparación Sr vs Rb/Sr entre el estudio presente y series geoquímicas: Pisayambo y Putulahua. El Autor

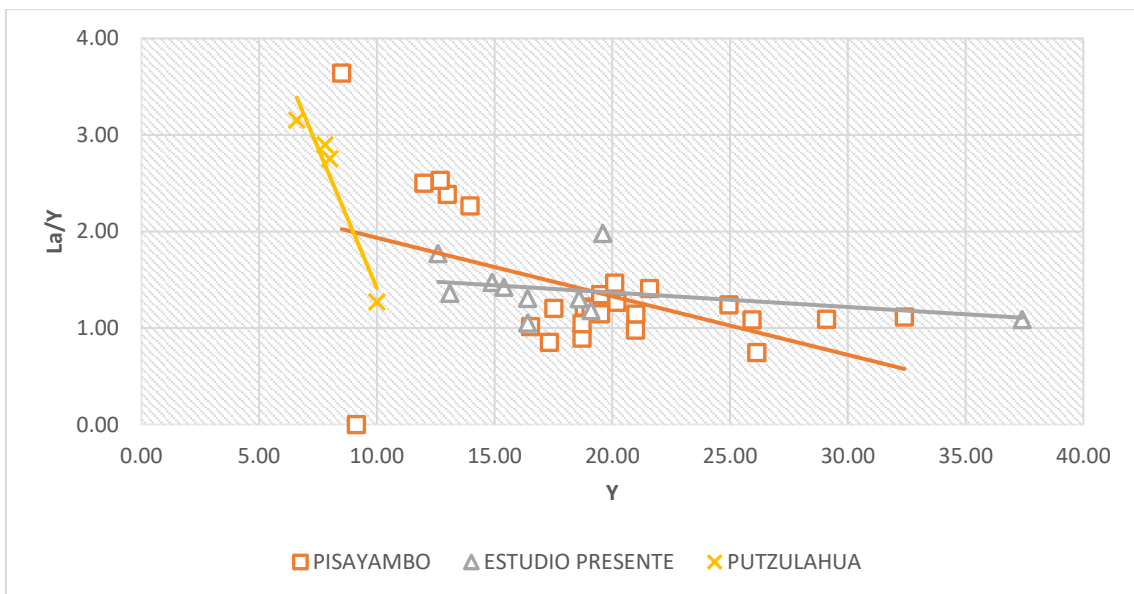


Figura 33. Comparación Sr vs Rb/Sr entre el estudio presente y series geoquímicas: Pisayambo y Putulahua. El Autor

La tendencia decreciente de Rb/Sr con respecto a Sr indica un proceso de diferenciación magmática. A medida que el magma evoluciona, los minerales con mayor contenido en Rb (como la mica) cristalizan, fraccionando el magma y empobreciendo el contenido de Rb en el magma residual. El Sr, por otro lado, es un elemento compatible que tiende a permanecer en el magma durante la cristalización fraccionada. Por lo tanto, la relación Rb/Sr disminuye a medida que el magma se diferencia.

La tendencia ligeramente decreciente de La/Y con respecto a Y también puede indicar un proceso de diferenciación magmática. La/Y es un indicador de la compatibilidad de los elementos lantánidos (REE) con el magma. En general, los REE ligeros (como La) son más incompatibles que los REE pesados (como Y). Durante la cristalización fraccionada, los REE incompatibles se enriquecen en el magma residual, mientras que los REE compatibles se empobrecen. La ligera disminución de La/Y sugiere que los REE ligeros se están fraccionando del magma.

El comportamiento es similar para la serie de Putzulahua, pero la diferencia es marcada para la zona de Pisayambo donde la diferenciación magmática es más intensa, la fuerte disminución La/Y sugiere una fracción más intensa de los REE ligeros.

6 DISCUSIÓN

Para llegar a la conclusión obtenida en el presente estudio se analizan ciertos aspectos del comportamiento magmático en general.

6.1 Movilización de magma

Según (Jackson & Sparks, 2018) La movilización del magma es el flujo reactivo del magma en reservorios de magma sólido, causado por el ascenso de magma flotante a través de los cristales y su reacción con ellos. Este flujo reactivo produce magmas de baja cristalinidad y químicamente diferenciados que ascienden para formar intrusiones poco profundas o erupcionar en la superficie.

El flujo reactivo de magma en reservorios de cristales juega un papel crítico en la formación de magmas químicamente diferenciados. A medida que el magma con alta flotabilidad se filtra hacia arriba a través de los cristales en el reservorio, reacciona con ellos, lo que lleva a la producción de magmas silíceos con baja cristalinidad y químicamente diferenciados como el caso de estudio presente. Estos magmas pueden ascender para formar intrusiones más superficiales o erupcionar a la superficie.

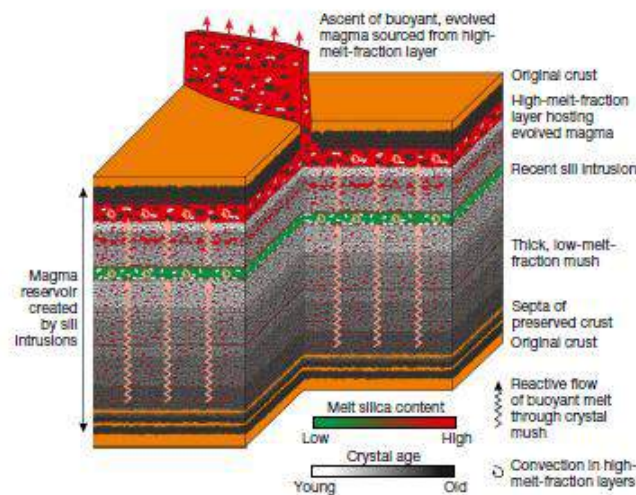


Figura 34. El flujo reactivo en los reservorios de magma crea capas transitorias de magma félsico al derretir selectivamente la masa fundida y acumularse alrededor de cristales preexistentes. Tomado de (Jackson & Sparks, 2018)

Los cambios en la composición total local causados por el flujo reactivo de magma, en lugar de grandes aumentos de temperatura, producen el rápido aumento en la fracción

de magma que removiliza cristales almacenados a temperaturas frías. Este proceso también contribuye a la producción de composiciones bimodales (Andesítico basáltico - Riolítico) de magma provenientes de reservorios de corteza media a inferior (Figuras 35 y 36).

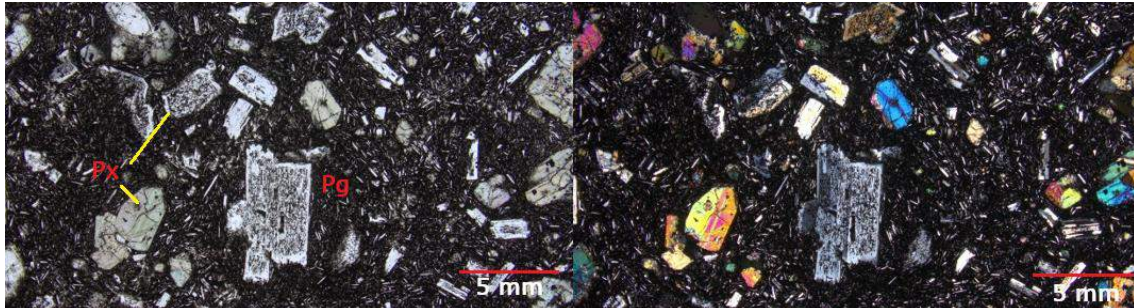


Figura 35. Andesita basáltica (HAL 185). El Autor

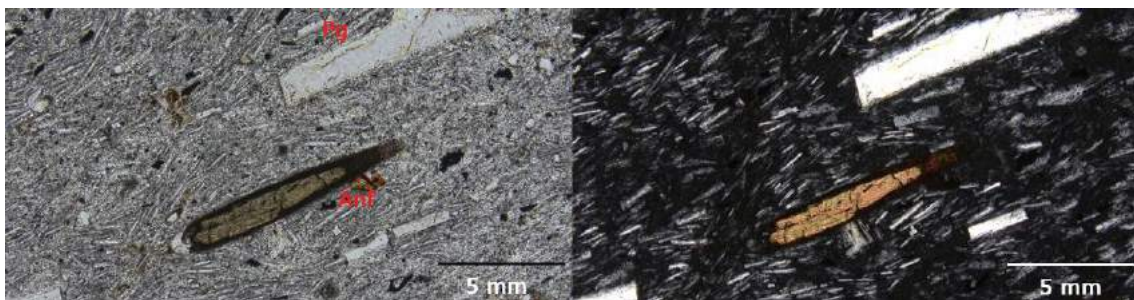


Figura 36. Riolita (HAL 184). El Autor

El flujo reactivo de magma reduce o elimina los contrastes composicionales formados tempranamente, y la fracción de magma localmente variable controla la profundidad de las intrusiones de umbral posteriores. Como resultado, los magmas químicamente diferenciados se forman a medida que la composición del magma evoluciona durante su flujo y reacción con los cristales progresivamente más fríos.

6.2 Mush Riolítico

Un "mush" es una mezcla de magma (roca fundida) y cristales que se encuentra en un reservorio magmático. Es como una papilla espesa con diferentes proporciones de cristales y magma. Su viscosidad es mayor que la del magma puro debido a los cristales, lo que afecta su comportamiento durante el ascenso y la erupción (Huber C, 2012).

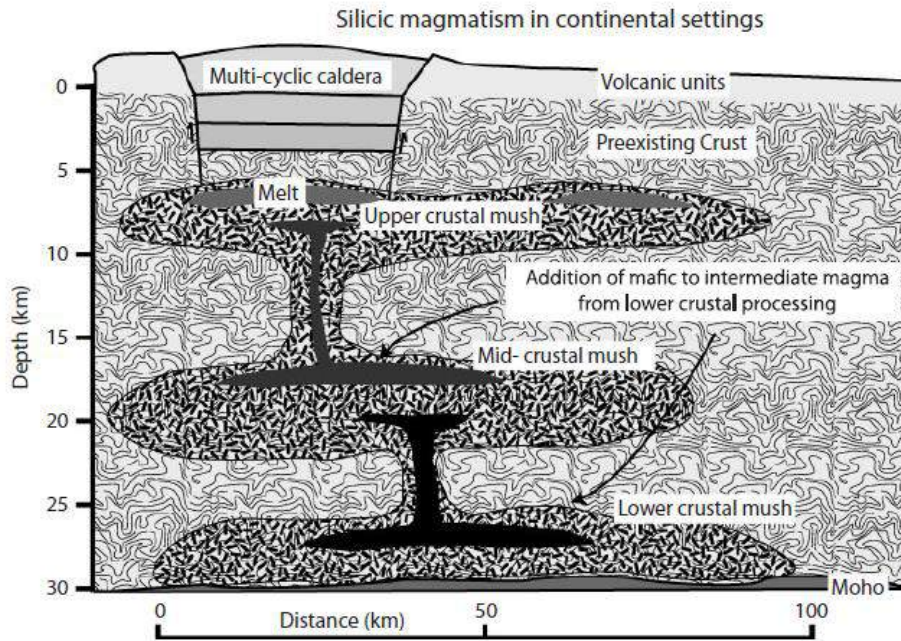


Figura 37. Esquema de modelo "mush" para cámaras magmáticas silíceas en arcos continentales. Tomado de (Huber C, 2012)

Las relaciones entre la riolita pobre en cristales, la riolita rica en cristales y el "mush" se revelan a través de sus distintas apariencias en secciones delgadas. El análisis de estas características petrográficas ofrece información valiosa sobre la cristalinidad, la textura y la dinámica de erupción de estos magmas.

6.2.1 Riolita pobre en cristales

Caracterizada por un bajo contenido de cristales y viscosidad, estas riolitas erupcionan fácilmente sin necesidad de una mezcla o reactivación extensa. En lámina delgada se observa una matriz vítrea con cristales pequeños y dispersos, lo que resulta en una textura relativamente homogénea. Se sugiere por lo tanto un magma que puede fluir y erupcionar fácilmente debido a su baja cristalinidad y viscosidad.

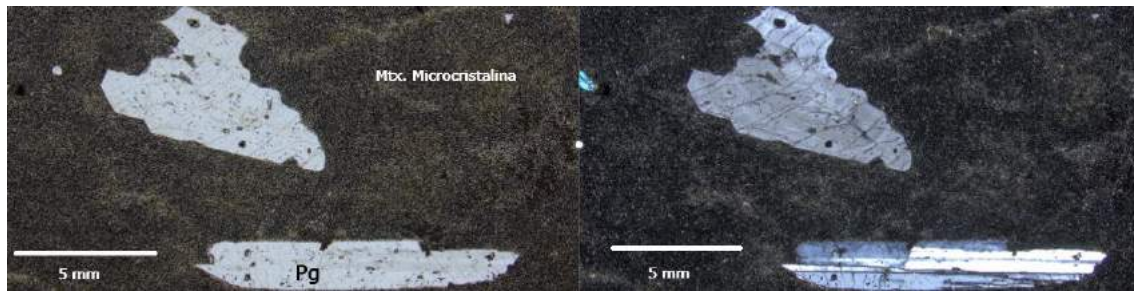


Figura 38. Riolita (HAL 209) pobre en cristales. El Autor

6.2.2 Riolita rica en cristales

Altamente cristalina y viscosa, requiere reactivación para romper el "enclavamiento" del marco cristalino. En sección delgada se observan abundantes cristales grandes incrustados en una matriz de grano fino, que pueden mostrar zonificación o capas debido a la variación del contenido y la composición de los cristales. Se interpreta como un magma enriquecido en cristales a través de la cristalización continua, que requiere factores externos para superar su alta viscosidad y erupcionar. La zonificación y la estratificación reflejan procesos complejos durante la evolución del magma.

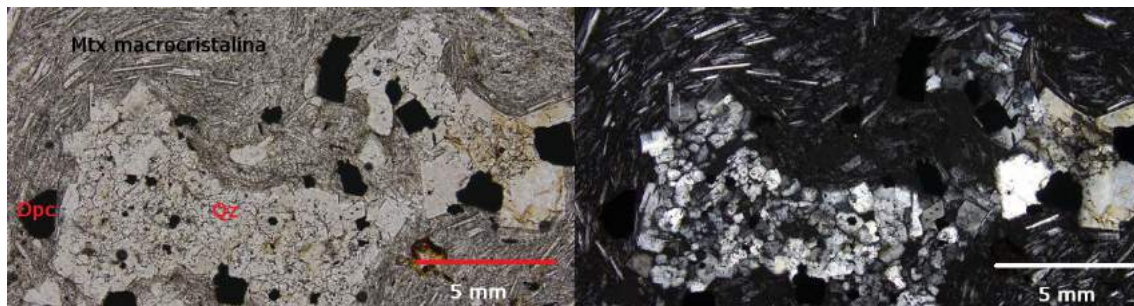


Figura 39. Riolita (HAL 184) rica en cristales. El Autor

6.3 Ascenso de magma a través de fallas Strike-slip inversa

En un entorno de falla de desplazamiento lateral inversa (strike-slip inversa), el ascenso del magma puede estar influenciado por la interacción compleja entre la tectónica y la actividad volcánica. En este tipo de entorno, donde las fuerzas tectónicas

generan compresión y desplazamiento lateral, el magma puede ascender a la superficie a lo largo de zonas de debilidad en la corteza terrestre, como fallas y fracturas (Tibaldi & Pasquaré Mariotto, 2010).

Se ha observado que en zonas de fallas de desplazamiento lateral inverso, el magma puede migrar a lo largo de las fallas y ascender a la superficie a lo largo de fracturas paralelas a la dirección del esfuerzo principal más grande. Estas fracturas pueden actuar como conductos para el ascenso del magma, permitiendo que este alcance la superficie y dé lugar a erupciones volcánicas en áreas donde la tectónica está dominada por fallas de desplazamiento lateral inverso como sucede en el caso de Ecuador con el sistema de falla CCPP.

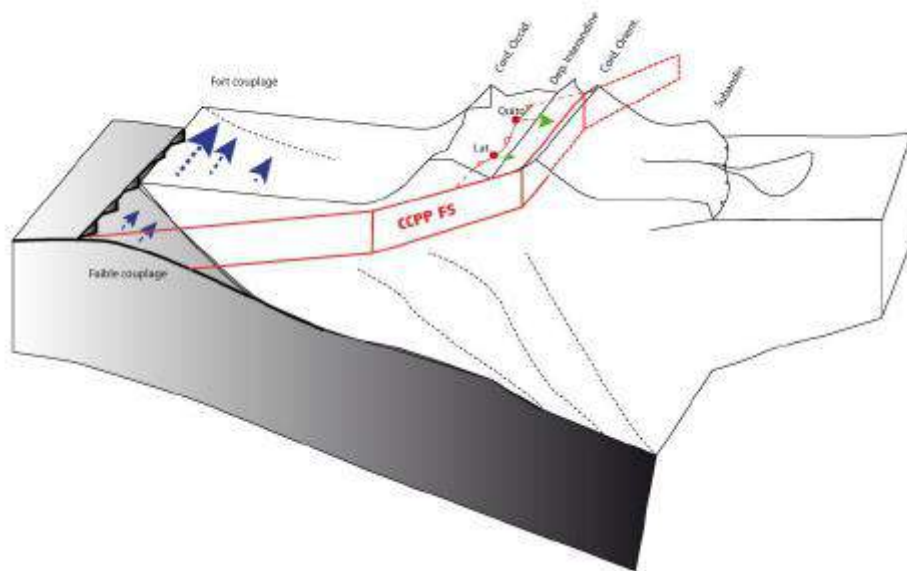


Figura 40. Deformación crustal a lo largo del bloque norandino. Tomado de (Alvarado A. , 2012)

En la zona de estudio el sistema de falla CCPP hereda estructuras tectónicas, mayormente inversas y transcurrentes con una tendencia NNE-SSW, lo cual se ajusta con el esfuerzo principal de empuje del CCP.

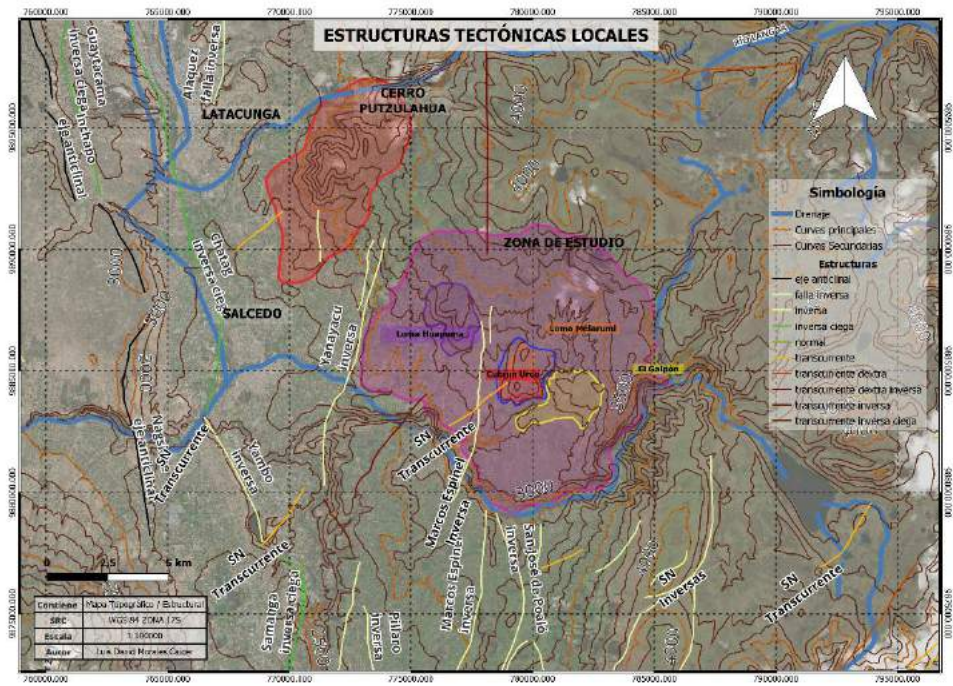


Figura 41. Mapa de estructuras Tectónicas locales heredados por el sistema de fallas CCPP. El Autor

El modelo de ascenso de magma propuesto por (Tibaldi & Pasquaré Mariotto, 2010) encaja perfectamente para el caso del complejo de domos en Salcedo debido a la presencia de tales estructuras permiten la extracción de magma hacia la superficies (Figuras 41 y 42). Además Los análisis geoquímicos y petrológicos de la zona estudiada, así como su relación con las series andesíticas del Cotopaxi, Pisayambo y Putzulahua, sugieren que pertenecen a una génesis similar.

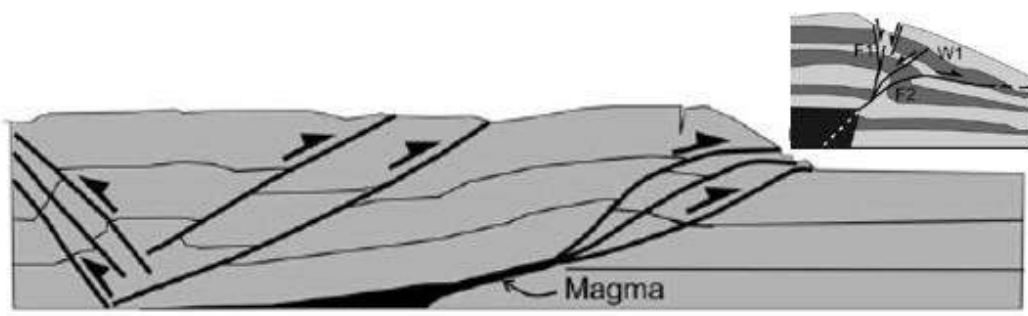


Figura 42. Modelo esquemático del mecanismo de ascenso a través de fallas Strike-Slip Inverso. Tomado de (Tibaldi & Pasquaré Mariotto, 2010)

7 CONCLUSIONES

Las muestras del estudio presentan características de magmas evolucionados con alto contenido en sílice (félsicas). Se ha observado que el magma se ha diferenciado a través de procesos como la cristalización fraccionada y la asimilación de corteza continental. La plagioclasa es el principal mineral fraccionado, además la zona de estudio presenta un grado moderado de fraccionamiento de cristal, mientras que Pisayambo presenta la mayor diferenciación magmática.

Se han identificado dos tipos de riolita: pobre en cristales y rica en cristales. La riolita pobre en cristales es más viscosa y requiere menos energía para erupcionar. La riolita rica en cristales es menos viscosa y requiere más energía para erupcionar.

Las muestras del estudio tienen afinidades geoquímicas similares a las series andesíticas del Cotopaxi, Pisayambo y Putzulahua. Las diferencias en la composición magmática se deben a diferentes grados de diferenciación magmática y asimilación de corteza continental.

El flujo reactivo de magma ha sido un factor importante en la formación de los domos riolíticos. El magma ha ascendido a través de fallas y fracturas en la corteza terrestre donde el sistema de falla CCPP ha jugado un papel importante en el ascenso del magma en la zona de estudio.

8 RECOMENDACIONES

- Implementar métodos como tomografía sísmica y magnetotelúrica para obtener imágenes de la estructura del subsuelo y determinar la geometría y profundidad de las fallas strike-slip.
- Mapear con precisión las estructuras volcánicas y determinar su relación con las fallas.
- Modelar la evolución del sistema de fallas y su relación con la formación de los domos riolíticos.:
- Integrar estudios geológicos, geofísicos, geoquímicos y geodésicos para obtener una comprensión completa del sistema volcánico y las fallas asociadas.
- Colaborar con expertos en tectónica y geofísica para comprender mejor la interacción entre las fallas y el magmatismo.
- Compartir los resultados de la investigación con las autoridades locales y nacionales para la toma de decisiones en materia de gestión del riesgo volcánico.
- Informar a la población sobre los riesgos asociados a la actividad tectónica relacionado a las fallas.

9 REFERENCIAS

- Alvarado , A., Audin, L., Jaillard, E., Mothes, P., Jarrín, P., Segovia, M., . . . 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*. Quito-Ecuador: AGU.
- Alvarado, A. (2012). *Néotectonique et cinématique de la déformation continentale en Equateur*. France.
- Alvarado, A. L. (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. *Tectonics*, 35.
- Ancellin, M.-A. P. (2017). *Across-arc versus along-arc Sr-Nd-Pb isotope variations in the Ecuadorian volcanic arc*. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 18,.
- Aspden, J., & Litherland, M. (1992). The geology and Mesozoic collisional history of the Cordillera Real, Ecuador. *Tectonophysics*, 187-204.
- Balkwill, H. R., Rodrigue, G., Predes, F. I., & Almeida, J. P. (1995). *Northern Part of Oriente Basin, Ecuador: Reflection Seismic Expression of Structures*. Canadá: Petroleum basins of South America: AAPG Memoir 62, p. 559-571.
- Dávila, F. (1990). *Geodinámica Plio-Cuaternaria de la cuenca de Latacunga-Ambato. Callejón Interandino: Sector entre Salcedo y Píllaro*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Guillier, B. C. (2001). Seismological . *Geophysical Research Letters*,.
- Hall M.L., P. S. (2008). Ecuadorian Andes volcanism: A review of Late Pliocene to present activity. *Elsevier*.
- Huber C, O. B. (2012). *Crystal-poor versus crystal-rich ignimbrites: A competition between stirring and reactivation*. USA: Geological Survey of America.
- Hughes, R., & Pilatasig, L. (2002). Cretaceous and Tertiary terrane accretion in the Cordillera Occidental of the Ecuadorian Andes. En *Tectonophysics* (págs. 29-48).
- Jackson, M. D., & Sparks, R. S. (2018). *Chemical differentiation, cold storage and remobilization of magma in the Earth's crust*. *Nature*.
- Jaillard, E. O. (2002). Stratigraphy of the late Cretaceous–Paleogene deposits of the Cordillera Occidental of central Ecuador: geodynamic implications. *J. South Am. Earth Sci.* 17, 49-58.
- Kennerley, J. B. (1971). Geology of the Llanganates area, Ecuador. *British Geological Survey*, 7.
- Lavenu, A., Winter, T., & Dávila, F. (1995). *A Pliocene-Quaternary compressional basin in the Interandean Depression, Central Ecuador*. France: Geophysics Journalist Institute.

- Litherland, M., & Aspden, J. (1992). Terrane-boundary reactivation: A control on the evolution of the Northern Andes. En *American Earth Sciences* (págs. 71-76). doi:10.1016/0895-9811(92)90060-c .
- Litherland, M., Aspden, J., & Jemielita, R. (1994). *The Metamorphic Belts of Ecuador*. NERC.
- Lonsdale, P. (2005). Creation of the Cocos and Nazca plates by fission of the Farallon plate. En *Tectonophysics* (págs. 237-264).
- McLennan, T. y. (1985). *The Continental Crust: Its composition and evolution*. London: Blackwell Cientific.
- Mothes , P. A. (2023). Geoquímica Pisayambo.
- Mothes, P. A. (2023). Geocronología Pisayambo.
- Mothes, P. A. (2023). Geoquímica Cotopaxi.
- Mothes, P. A. (2023). Geoquímica Putzulahua.
- Mothes, P. A. (2023). Geoquímica Zona de estudio.
- Muñoz, R. (2022). *TESIS. ESTUDIO DEL COULOMB STRESS EN LA INFLUENCIA POTENCIAL DE LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA HOLOCÉNICA Y SÍSMICA EN EL NIDO DE PISAYAMBO, TUNGURAHUA*. Quito: EPN.
- OBANDO, J. P. (2012). *Depósitos volcánicos del Pleistoceno Tardío en la cuenca de Ambato: caracterización, distribución y origen*. Quito: EPN.
- Pecerillo, T. y. (1976). SiO₂/K₂O series.
- Spikings, R., Winkler, W., Seward, D., & Handler, R. (2005). Along strike variations in the thermal and tectonic response of the continental Ecuadorian Andes to the collision with heterogeneous oceanic crus. En *Earth Planet Sci* (págs. 57-73). doi:10.1016/s0012-821x(01)00225-4.
- Tibaldi, A., & Pasquaré Mariotto, F. (2010). *Volcanism in Reverse and Strike-Slip Fault Settings*. ResearchGate.