



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**VARIACIONES COMPOSICIONALES DE LOS CONOS ADVENTICIOS DEL  
VOLCÁN TOLHUACA, REGIÓN DE LA ARAUCANÍA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

**CAMILA JAVIERA APABLAZA FERNÁNDEZ**

PROFESOR GUÍA:

PHILIPPE ROBIDOUX

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

ANGELO CASTRUCCIO ÁLVAREZ

EDUARDO MORGADO BRAVO

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el FONDECYT Iniciación Número  
11190846

SANTIAGO DE CHILE

2022

## RESUMEN

El volcán Tolhuaca es un volcán compuesto que se encuentra en la Región de La Araucanía, se encuentra alineado al sistema de fallas Liquiñe-Ofqui entre los 38° y 44° sur. En sus flancos NW y SW posee 4 conos adventicios, que no han tenido actividad volcánica durante el último tiempo, pero sí presenta un sistema geotermal activo. Con esto en mente se plantea como objetivo estudiar las variaciones composicionales de los distintos conos adventicios del volcán Tolhuaca. Las cuales son importantes para determinar el comportamiento de los productos volcánico y establecer una evolución de sus características magmáticas.

Para esto, se realizaron análisis geoquímicos y petrológicos de muestras tomadas en terreno, de los cuatro conos adventicios. A través de análisis y diagramas de elementos mayores, trazas y tierras raras. En conjunto con descripciones petrográficas de cortes transparentes por medio de microscopio óptico. También se realizaron modelos de cristalización fraccionada.

Los principales resultados obtenidos son las composiciones de los conos que varían de basalto a basalto-andesita, por otro lado, los modelos de cristalización fraccionada indica fraccionamiento de olivino, plagioclasa y piroxenos, los cuales son fases minerales contenidas en las muestras estudiadas. Como punto importante la asimilación cortical podría ser la responsable de la variabilidad composicional que presentan los conos.

A modo de conclusión se puede decir que el origen de la composición magmática es común ya que no existe ningún cono más primitivo que otro y que sus posteriores composiciones composicionales se debe a cristalización fraccionada y procesos de asimilación cortical. A lo largo de este estudio se pudo identificar estas diferencias composicionales proponiendo un modelo petrogenético que lo explica adecuadamente.

## AGRADECIMIENTOS

Primero quiero agradecer a mi profesor guía, Philippe Robidoux por permitirme trabajar con él, por la dedicación y paciencia que tuvo conmigo a lo largo de todo este trabajo. A Angelo y Eduardo, por ser parte de este proceso como docentes y co-guías, por sus buenos deseos hacia mí y por los conocimientos otorgados a lo largo de este camino y carrera.

A mis padres, Luz y Walter, que además de darme la vida, me han dado todos los valores que tengo para poder afrontarla y me han hecho la mujer y profesional que soy hoy en día. A mis hermanos, Javier y Nicolás por ser el motor de mi vida y dejarme ser un ejemplo para ellos. A toda mi familia, por acompañarme y apoyarme siempre en todo.

A todas mis amigas y amigos, por acompañarme desde el colegio hasta cada etapa de la universidad, sin ustedes todo este trayecto hubiera sido solitario y aburrido. Gracias por todos los carretes, risas, cahuines, y por ser la familia que escogí.

Por último, a Sebastián, por dejarme apoyarme en ti en cada momento, en los buenos, malos y difíciles. Por acompañarme y amarme siempre. Muchas gracias.

## TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Formulación del estudio propuesto.....	1
1.2 Hipótesis.....	2
1.3 Objetivos.....	2
1.3.1 Objetivos generales .....	2
1.3.2 Objetivos específicos.....	2
CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES .....	3
2.1 Marco geológico .....	3
2.1.1 Marco geológico-geodinámico.....	3
2.1.2 Marco geológico regional.....	6
2.1.2.1 Rocas estratificadas.....	6
2.1.2.1.1 Estratos de Huinucal Ivante (Pre-Jurásico) .....	6
2.1.2.1.2 Formación Nacientes del Biobío (Jurásico Inferior a Medio).....	6
2.1.2.1.3 Complejo Vizcacha Cumilao (Cretácico-Paleógeno?) .....	7
2.1.2.1.4 Formación Cura-Mallín (Mioceno Inferior.Medio, ca. 22-8 Ma) .....	7
2.1.2.1.5 Formación Mitrauquén (Mioceno) .....	7
2.1.2.1.6 Formación Malleco (Plioceno-Pleistoceno Inferior, ca. 4-1 Ma) .....	8
2.1.2.1.7 Conjunto de volcanes de la Cordillera Principal (Cuaternario) .....	8
2.1.2.1.3.1 Volcán Tolhuaca .....	8
2.1.2.1.3.2 Volcán Lonquimay .....	9
2.1.2.2 Rocas intrusivas.....	9
2.1.2.2.1 Grupo Plutónico Melipeuco (Mioceno, ca. 15-7 Ma.).....	9
2.1.2.2.2 Intrusivos Hipabisales del Río Renaico y Cerro Mocho (Mioceno-Plioceno, ca. 7-3 Ma.) .....	9
2.1.2.3 Estructuras.....	10

2.1.2.3.1 Sistema de falla Liquiñe-Ofqui (SFLO) .....	10
2.1.2.3.2 Sistema de falla Larga Vida (SFLA) .....	10
2.1.3 Marco geológico local .....	10
2.1.3.1 Volcán Tolhuaca.....	10
2.1.3.1.1 Unidad Tolhuaca 1 (Pleistoceno Medio) .....	11
2.1.3.1.2 Unidad Tolhuaca 2 (Pleistoceno Medio-Superior).....	11
2.1.3.1.3 Unidad Tolhuaca 3 (Pleistoceno Superior) .....	12
2.1.3.1.4 Unidad Tolhuaca 4 (Pleistoceno Superior) .....	12
2.1.3.1.4 Unidad Tolhuaca Fisural 1 .....	12
2.1.3.1.5 Unidad Tolhuaca Fisural 2.....	12
2.1.3.1.5 Unidad Tolhuaca Fisural 3.....	12
2.1.3.2 Actividad Eruptiva prehistórica e histórica .....	13
2.1.3.3 Depósitos sedimentarios y piroclásticos locales .....	13
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA.....	14
3.1 Ubicación y acceso .....	14
3.2 Trabajo preparativo salida a terreno .....	16
3.3 Muestreo en terreno .....	17
3.4 Metodología general.....	19
3.4.1 Objetivo específico 1 .....	19
3.4.2 Objetivo específico 2 .....	20
3.4.3 Objetivo específico 3 .....	20
3.4.4 Objetivo específico 4 .....	20
CAPÍTULO 4: RESULTADOS .....	21
4.1 Petrografía .....	21
4.1.2 Cono Caracol.....	22
4.1.3 Cordón Fisural .....	23
4.1.4 Cono Canción.....	24

4.2 Geoquímica de roca total .....	25
4.2.1 Elementos Mayores .....	29
4.2.2 Tierras Raras y elementos trazas .....	32
CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN .....	35
5.1 Análisis textural .....	35
5.2 Origen de la composición magmática .....	36
5.2.1 Modelo de cristalización fraccionada .....	36
5.2.2 Asimilación cortical .....	41
5.3 Modelo petrogenético .....	42
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES .....	45
BIBLIOGRAFÍA .....	46
ANEXOS .....	51
Anexo A: Descripción petrográfica FLANCO NW .....	51
Anexo B: Descripción petrográfica FLANCO SW .....	56

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Muestras Cono Caracol (flanco SW).....	17
Tabla 2 Muestras Cono Colli (flanco SW).....	18
Tabla 3 Muestras Tolhuaca Fisural (flanco NW).....	18
Tabla 4 Muestras Cono Canción (flanco NW). ....	19
Tabla 5 Resultados geoquímicos de elementos mayores utilizados en este estudio, clasificados según cono eruptivo y método analítico. Los elementos mayores (normalizados al 100%) están en porcentaje de peso. ....	26
Tabla 6 Resultados geoquímicos de elementos menores utilizados en este estudio, clasificado según cono eruptivo y método analítico. ....	27

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Mapa esquemático de la subducción de las Placas de Nazca y Antártica bajo la Placa Sudamericana, modificado de Stern (2004). Se observa las cuatro Zonas Volcánicas de los Andes, las zonas de subducción plana y los elementos geomorfológicos que delimitan cada zona volcánica andina. Se indica además la dirección de la subducción, su velocidad y la edad que tienen las placas oceánicas al alcanzar la fosa. Las curvas de isoprofundidad indican la geometría de la subducción en profundidad .....	4
Figura 2 División de la ZVS en cuatro dominios: NSVZ, TSVZ, CSVZ y SSVZ. Extraído de López-Escobar et al. (1995) .....	5
Figura 3 Mapa Geología local volcán Tolhuaca. Extraído de Menares (2017).....	13
Figura 4 Mapa ubicación de la zona de estudio. Extraído de Arias, D. 2020 .....	15
Figura 5 Ruta de acceso área de estudio. Elaboración propia QGis, 2022 .....	16
Figura 6 Afloramiento cono Caracol .....	18
Figura 7 Bomba y afloramiento cono Colli .....	18
Figura 8 Cono Fisural.....	19
Figura 9 Afloramiento cono Canción .....	19
Figura 10 CO01B 5x. Textura vesicular e hialopilitica. Nicles paralelos (A-C). Nicles cruzados (B-D) .....	22
Figura 11 CA02A 5x. Textura vesicular orientada, politaxítica y hialopilitica. Fenocristales de plagioclasa y piroxenos, ambos con textura coronítica. Nicles paralelos (A-C). Nicles cruzados (B-D).....	23
Figura 12 Figura 5 Muestra NV18 5x. Textura pilotaxítica, fenocristales cúmulo-porfídicos de plagioclasa con textura sieve. Nicles paralelos (A). Nicles cruzados (B) .....	24
Figura 13 Muestra TO1B 5x. Textura vesicular y cúmulo-porfídica. Nicles paralelos (A). Nicles cruzados (B).....	24
Figura 14 CC1 5x. Textura vesicular. Fenocristales de plagioclasa con textura sieve y algunos piroxenos. Nicles paralelos (A). Nicles cruzados (B) .....	25
Figura 15 F: Foidite, Ph: Phonolite, Pc Picrobasalt, U1: Tephrite (ol < 10%) Basanite(ol > 10%), U2: Phonotephrite, U3: Tephriphonolite, Ba: alkalic basalt, Bs: subalkalic basalt, S1: Trachybasalt, S2: Basaltic Trachyandesite, S3: Trachyandesite, O1: Basaltic Andesite, O2: Andesite, O3 Dacite, T: Trachyte, Td: Trachydacite, R: Rhyolite, Q: Silexite S/N/L: Sodalite/Nephelinolith/Leucitolith. Maitre, et. Al. 2004.....	29



Figura 16 1:alkali feldspar rhyolite, 2:rhyolite, 3:dacite, 4:quartz alkali feldspar trachyte, 5:quartz trachyte, 6:quartz latite, 7:basalt andesite, 8:alkali feldspar trachyte, 9:trachyte, 10:latite, 11:foiid-bearing alkali feldspar trachyte, 12:foiid-bearing trachyte, 13:foiid-bearing latite, 14:phonolite, 15:tephritic phonolite, 16:phonolitic basanite (olivine > 10%) phonolitic tephrite (olivine < 10%), 17:basanite (olivine > 10%) tephrite (olivine < 10%), 18:phonolitic foidite, 19:tephritic foidite, 20:foidoite. Maitre, 2004.....	30
Figura 17 Diagrama AFM modificado de Wilson (1989).....	31
Figura 18 Diagramas Harker. Conos adventicios y centros eruptivos locales. Columna izquierda presenta elementos mayoritariamente compatibles, columna derecha elementos incompatibles. (White, 2005) .....	32
Figura 19 Diagrama spider de las muestras del flanco NW del volcán Tolhuaca. Normalizadas al condrito McDonough (1995) Elaboración propia. ....	33
Figura 20 Diagrama spider de las muestras del flanco SW. Normalizado al condrito McDonough (1995). Elaboración propia. ....	34
Figura 21 Modelo de cristalización fraccionada para basaltos de tipo Rayleigh (P. Robidoux, comm. pers). (A) Muestras del flanco NW. (B) Muestras del flanco SW .....	37
Figura 22 Diagrama de variación Zr versus Nb para las muestras de los conos adventicios del Tolhuaca.....	38
Figura 23 Diagrama de variación de elementos mayores para las muestras de los conos del flanco NW y SW. La línea continúa corresponde al modelos de cristalización fraccionada extraídos de COMAGMAT 3.72 (Ariskin et al., 1993; Ariskin y Barmina, 2004) .....	40
Figura 24 Diagrama de razones de Sr/Th y Th/Ce para las muestras de los conos adventicios del flanco NW y SW. ....	42

# **CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN**

## **1.1 Formulación del estudio propuesto**

El volcán Tolhuaca se encuentra en la Zona Volcánica del Sur (ZVS) del cinturón de los Andes y está alienado al sistema de fallas Liquiñe - Ofqui (ZFLO), entre 38° y 44° sur. Ubicada aproximadamente entre las cercanías del volcán Callaqui y Copahue, y el Golfo de Penas (Hervé et al., 2000).

El Tolhuaca es un estratovolcán en de forma “X” situado en la región de La Araucanía al confín de la región del Biobío. Las coordenadas de su cráter principal son 38°18’S y 71°9’W. Este edificio posee una altitud de 2806 m.s.n.m, su cima se conforma por una sucesión de 3 cráteres imbricados con orientación NW-SE producto de una migración de la actividad volcánicas desde el extremo SE al NW (Thiele et al., 1987), presenta una fuerte erosión glacial y la base del edificio posee forma elíptica con diámetros de 13 km en dirección NW-SE y 20 km con dirección NE-SW, lo que cubre una superficie de 200 km<sup>2</sup> (Thiele et al., 1987). La composición de sus rocas comprende desde basalto a dacitas, con una predominancia de composiciones básicas e intermedias, todas de carácter calcoalcalino (Moreno et al., 2012).

Las principales investigaciones asociadas al Tolhuaca, están relacionadas con el sistema geotermal presente en el flanco NW de su cráter y en cómo aprovechar de esa energía térmica para generar principalmente electricidad. Sin embargo, fuera de la geotermia el volcán presenta muy pocas documentaciones acerca de su contexto geológico. Particularmente un limitado conocimiento de su actividad eruptiva histórica (Polanco, 2010) y sobre los fenómenos volcánicos desarrollados hasta su estado de actividad eruptiva post-Holoceno hasta el presente. El registro de la actividad eruptiva del Holoceno incluye sólo tres eventos relativamente antiguos (entre 8.050 y 6.590 AP), lo cual evidencia que el registro eruptivo de este volcán es escaso.

Debido a lo recién planteado, es necesario plantear nuevos conocimientos sobre la geología de este edificio volcánico para ampliar la información que se maneja bajo otra arista de conocimiento, que sería el estudio petrológico y

geoquímico de sus conos adventicios. Para así, profundizar el entendimiento de las variaciones composicionales y de las condiciones magmáticas que dieron origen a los eventos eruptivos del Tolhuaca y sus conos adventicios siendo este, el objetivo de este trabajo: poder contribuir en el desarrollo de los conocimientos sobre la geología del volcán Tolhuaca.

## **1.2 Hipótesis**

Los conos del Tolhuaca se ubican en los flancos NW y SW del cono principal. Ya que los centros eruptivos del flanco NW se encuentran alineados a la sucesión de cráteres, se cree que la alimentación de estos conos adventicios proviene de fuentes magmáticas desde un mismo reservorio magmático que sigue la misma orientación. En cambio, los que se encuentran en el flanco SW se espera encontrar que se alimentan con un magma de evolución cortical distinta. Por último, se busca demostrar que los conos del flanco NW tienen composición distinta a los conos del flanco SW, que ese cambio de composición es producto de que los magmas que los alimentan tienen proveniencias distintas.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivos generales**

Determinar las variaciones composicionales de los conos adventicios del volcán Tolhuaca para establecer una evolución y origen de las características composicionales magmáticas.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

1. Reconocer y describir los conos adventicios para proponer un modelo de sucesión estratigráfico de los eventos eruptivos desde el Holoceno, del volcán Tolhuaca.
2. Distinguir la petrografía, composición de las rocas emitidas y características de sus minerales por cada cono de la zona de estudio.
3. Reconocer los procesos petrológicos asociados a los eventos volcánicos de los conos adventicios.

4. Proponer un modelo de la proveniencia del reservorio magmático de los conos adventicios del volcán Tolhuaca.

## **CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES**

### **2.1 Marco geológico**

#### 2.1.1 Marco geológico-geodinámico

El área de estudio se encuentra en el borde occidental de la Placa Sudamericana, la cual se enmarca en un contexto de subducción casi ininterrumpido desde el Jurásico con la Placa de Nazca. Este contexto se manifiesta de manera activa tanto en la ocurrencia de plutonismo y volcanismo de arco, el cual ha ido migrando progresivamente hacia el este (e.g. Charrier et al., 2007). La tasa de convergencia entre ambas placas ocurre a tasas de ~6.6 cm/año, lo cual es relativamente constante en los últimos 20 Ma. (Pardo-Casas y Molnar, 1987)

A lo largo del arco volcánico sudamericano hay alrededor de 200 volcanes que pertenecen al Pleistoceno y Holoceno. Debido a esto, el volcanismo de arco en los Andes de Sudamérica ha sido dividido en cuatro zonas volcánicas: Zona Volcánica Norte (NVZ; 2°N-5°S), Zona Volcánica Central (CVZ; 14°S-28°S), Zona Volcánica Sur (SVZ; 33°S-46°S) y Zona Volcánica Austral (AVZ; 49°S-55°S) (Stern et al., 2007).



Figura 1 Mapa esquemático de la subducción de las Placas de Nazca y Antártica bajo la Placa Sudamericana, modificado de Stern (2004). Se observa las cuatro Zonas Volcánicas de los Andes, las zonas de subducción plana y los elementos geomorfológicos que delimitan cada zona volcánica andina. Se indica, además, la dirección de la subducción, su velocidad y la edad que tienen las placas oceánicas al alcanzar la fosa. Las curvas de isopropundidad indican la geometría de la subducción en profundidad.

La zona de estudio se encuentra en la Zona Volcánica Sur, que está comprendida entre los 33°S y 46°S. Esta zona volcánica, incluye por lo menos 60 edificios volcánicos históricamente activos y un variado número de centros eruptivos menores ubicados en Chile como en Argentina (Stern, 2004). De manera adicional, en la SVZ se encuentran dos sistemas de fallas regionales: el Sistema de Falla Liquiñe-Ofqui (SFLO) (Hervé & Thiele, 1987), el cuál es paralelo al arco volcánico; y un Sistema de Falla de Larga Vida (SFLV), con rumbo WNW (Cembrano et al., 1996).

López-Escobar et al. (1995) proponen un subdivisión de la SVZ en 4 subzonas de acuerdo con su signatura química: Segmento norte (NSVZ; 33-34,5°S), con sus productos volcánicos mayoritariamente de composición intermedia; segmento

transicional (TSVZ; 34,5-37°S), con un rango amplio de composiciones que va desde basaltos toleíticos a dacitas ricas en K; y los segmentos central (CSVZ; 37-42°S) y sur (SSVZ; 42-46°S), los cuales se caracterizan por la abundancia de productos volcánicos de composición basáltica y andesítico-basáltica, con afinidad toleítica y presencia común de estratovolcanes.



Figura 2 División de la ZVS en cuatro dominios: NSVZ, TSVZ, CSVZ y SSVZ. Extraído de López-Escobar et al. (1995)

Por último, cabe mencionar las principales morfoestructuras de la zona de estudio. Estas se encuentran orientadas preferentemente hacia el N-S y se distinguen de oeste a este como: Cordillera de la Costa, Depresión Central, Cordillera Principal y Cuenca de Antepaís.

## 2.1.2 Marco geológico regional

Se presentará a continuación, el marco geológico a una escala regional de la zona de estudio. La información sobre las formaciones y unidades presentes en la zona fue recopilada principalmente de la Hoja Curacautín (Suárez, 1997) y Geología del Complejo Volcánico Lonquimay-Tolhuaca (Moreno et al., 2012) realizadas por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SRNAGEOMIN).

### 2.1.2.1 Rocas estratificadas

#### 2.1.2.1.1 Estratos de Huinucal Ivante (Pre-Jurásico)

Corresponde a una sucesión de 70 m de espesor de metasedimentitas foliadas, que forma parte de una gran inclusión en rocas graníticas del Grupo Plutónico Gualletué. Estos estratos afloran solamente en los lomajes adyacente a la ribera sureste de la laguna Gualletué. (Suárez, 1997)

Los niveles más bajos de esta unidad se encuentran conformados por pizarras moteadas de aproximadamente 20 m de espesor, con foliación de rumbo variable (norte-sur a N30°E). Le sobreyacen a las pizarras, metareniscas foliadas de 50 m de espesor. Las rocas de esta unidad experimentaron deformación tectónica lo que generó una foliación penetrativa y posteriormente un metamorfismo termal asociado al emplazamiento de los granitoides adyacentes. (Suárez, 1997)

#### 2.1.2.1.2 Formación Nacientes del Biobío (Jurásico Inferior a Medio)

Se define como una secuencia volcánica y sedimentaria marina y continental, se encuentra constituida por rocas sedimentarias clásticas y carbonatadas, lavas basálticas (parte inferior y media), y rocas volcánicas de ambiente aparente subaréo (parte superior). (De la Cruz y Suárez, 1997).

La base de esta formación no se encuentra expuesta. Sin embargo, se encuentra instruida por granitoides del Grupo Plutónico Gualletué (edad jurásica superior-cretácica superior) en dos sectores: Laguna de Icalma y en la Cordillera Lonquimay. Por otro lado, subyace con discordancia angular y erosión a la Formación Cura-Mallín, de edad miocena y al Complejo Vizcacha-Cumilao de edad cretácica superior-paleógena.

Dentro de esta formación se distinguen tres miembros: Miembro Icalma (basaltos submarinos y turbiditas); Miembro Lolén-Pacunto (turbiditas volcanoclásticas marinas); y Miembro Lonquimay (sedimentitas volcanoclásticas y rocas calcáreas marinas, y rocas volcánicas aparentemente subaéreas en su mayoría). (Suárez, 1997).

#### 2.1.2.1.3 Complejo Vizcacha Cumilao (Cretácico-Paleógeno?)

Corresponde a una secuencia de rocas (principalmente) volcánicas compuesta por: Lavas andesíticas macizas, lavas basálticas (que también pueden ser cuerpos intrusivos), y rocas piroclásticas, generalmente alteradas y tectonizadas, con intercalaciones de rocas sedimentarias clásticas, que afloran en varias parte de la región. La base de este complejo no ha sido observada. Y en algunas localidades se ha reconocido que rocas asignadas a esta unidad infrayacen discordantemente a la Formación Cura-Mallín y a lavas basálticas columnares de la Formación Malleco. (Suárez, 1997)

#### 2.1.2.1.4 Formación Cura-Mallín (Mioceno Inferior.Medio, ca. 22-8 Ma)

Esta Formación, incluye rocas volcánicas andesíticas, dacíticas y riolíticas, y rocas sedimentarias principalmente lacustres, y subordinadamente fluviales.

Se encuentra subdividida en dos miembros continentales: Miembro Guapitrío cuya composición es principalmente volcánica, y Miembro Río Pedregoso que es principalmente sedimentario, que subyace y engrana con el primer Miembro, pudiendo estar localmente intercalado con este mismo. Sus espesores exceden los 1000-1500 m y los 400 m, según Salinas (1984).

La Formación Cura-Mallín sobreyace en contacto depositacional a granitoides de edad cretácica en el cordón de los Morrillos, y de forma discordante a la Formación Nacientes del BíoBío en el río Lolén y al Complejo Vizcacha-Cumilao. Por otro lado, infrayace a la Formación Mitrauquén en la ladera sur del valle del río Mtrauquén. (Suárez, 1997)

#### 2.1.2.1.5 Formación Mitrauquén (Mioceno)

La Formación Mitrauquén se define como una unidad de conglomerados, ignimbritas y lavas andesíticas, que se encuentran expuestas a lo largo de una franja



ubicada al este del río Bío-bío, específicamente entre el río Liucura y el río Mitrauquén. Esta Formación incluye dos miembros: uno especialmente conglomerádico, con intercalaciones de ignimbritas dacíticas y lavas andesíticas, y el otro miembro de lavas andesíticas y tobas. En donde este último engrana lateralmente y sobreyace con el primero. A su vez, el miembro sedimentario se acuña hacia el norte. (Suárez, 1997)

#### 2.1.2.1.6 Formación Malleco (Plioceno-Pleistoceno Inferior, ca. 4-1 Ma)

Se distingue como Formación Malleco a una secuencia volcánica continental de edad pliocena-pleistocena inferior. Se incluye un complejo volcánico compuesto por diferentes asociaciones de facies volcánicas con algunas intercalaciones sedimentarias, que aflora principalmente en el lado occidental de la Cordillera Principal. Esta unidad le corresponde a los “Depósitos Volcanoclásticos y Aluviales de Malleco” definidos por Moreno y Varela (1982) y a los “Estratos de Laguna Malleco” definidos por Thiele et. Al (1987).

Esta Formación sobreyace con discordancia angular al Complejo Vizcacha-Cumilao, a la Formación Cura-Mallín y a los estratos de Huichahue y con discordancia de erosión al “Stock” Pemehue y a granitoides del Grupo Plutónico Melipeuco. Por último, cabe mencionar que la formación está cubierta por el Conjunto de Volcanes de la Cordillera Principal. (Suárez, 1997)

#### 2.1.2.1.7 Conjunto de volcanes de la Cordillera Principal (Cuaternario)

Este conjunto de volcanes, dentro de la Hoja Curacautín, comprende de norte a sur los volcanes: Tolhuaca, Lonquimay, Sierra Nevada, Llaima y Sollipulli.

De manera general, se hablará del Complejo volcánico Lonquimay-Tolhuaca (CVLT), el cual está compuesto por los conos principales Lonquimay y Tolhuaca, una serie de conos monogenéticos independientes del Holoceno y el cordón Fisural oriental del Lonquimay (CFOL).

##### 2.1.2.1.3.1 Volcán Tolhuaca

Ubicado a 25 km al noreste de la ciudad de Curacautín y a una altitud de 2806 m. El volcán Tolhuaca es un estratovolcán mixto entre lavas y piroclastos, su base tiene una forma aproximada elíptica con diámetro de 20 km (noreste-suroeste) y 13 km (noroeste-

sureste) (Thiele et al., 1987), y cubre una superficie aproximada de 200 km<sup>2</sup>. En su cima posee varios cráteres que se presentan alienados en dirección NW-SE, lo que evidencia una migración de la actividad volcánica desde el extremo sureste hacia el extremo noroeste. (Moreno, 2012)

#### 2.1.2.1.3.2 Volcán Lonquimay

Complejo volcánico conformado por el estratovolcán Lonquimay y una serie de conos adventicios menores que se ubican en dirección al oriente, alineados a lo largo de la fisura “Cordón Fisural Oriental”. El cono principal es un estratovolcán con perfil muy irregular, forma de cono truncado y laderas muy elevadas en pendiente. El Cordón fisural Oriental tiene un largo de 8 km y a lo largo de él una docena de cráteres, fisuras pequeñas conos piroclásticos y conos. (Suárez, M.; Emparán, C. 1997).

#### 2.1.2.2 Rocas intrusivas

##### 2.1.2.2.1 Grupo Plutónico Melipeuco (Mioceno, ca. 15-7 Ma.)

Corresponden a rocas graníticas que se encuentran ampliamente distribuidas en la Hoja Curacautín y continúan fuera de los límites de esta, tanto hacia el norte como hacia el sur. Este grupo sobreyace a la Formación Cura-Mallín y sobreyace a la Formación Malleco. En varias localidades se ha observado que estas rocas instruyeron al Complejo Vizcacha-Cumilao. (Suárez, 1997)

##### 2.1.2.2.2 Intrusivos Hipabisales del Río Renaico y Cerro Mocho (Mioceno-Plioceno, ca. 7-3 Ma.)

Dentro de la zona de estudio, se reconoció la presencia de diques, filones mantos y cuerpos intrusivos irregulares, de andesitas y localmente basaltos y gabros. Los cuales se reconocieron bajo el nombre de ‘Intrusivos Hipabisales del río Renaico y Cerro Mocho’. Dentro de este conjunto se excluyen los cuerpos intrusivos asociados localmente a las volcanitas de la Formación Cura-Mallín, ya que está asignada a aquella formación. (Suárez, 1997)

### 2.1.2.3 Estructuras

#### 2.1.2.3.1 Sistema de falla Liquiñe-Ofqui (SFLO)

Zona de fallas de intra-arco de orientación preferencial NNE-SSW y un desplazamiento de rumbo dextral que ha permanecido activo al menos desde el Plioceno (Hervé & Thiele, 1987). Este sistema de falla ajusta la mayor parte de la deformación ocasionada por la subducción oblicua en el margen chileno, como también la deformación resultante entre la colisión del Ridge de Chile con la Placa Sudamericana. (Rosenau et al., 2006).

#### 2.1.2.3.2 Sistema de falla Larga Vida (SFLA)

Este sistema corresponde a fallas de rumbo WNW-ESE con un desplazamiento sinistral-inverso (López-Escobar et al., 1995; Rosenau et al., 2006), las cuales se encuentran severamente desorientadas respecto al campo de stress actual, debido a esto han sido interpretadas por Radic (2010) como estructuras heredaras del basamento que habrían sido reactivas durante el desarrollo del arco.

Cabe mencionar que el volcanismo asociado al SFLA presenta solamente estratovolcanes en alineaciones WNW y una gran variabilidad composicional que abarca desde magmas basálticos a riolíticos. (López-Escobar, 1995)

### 2.1.3 Marco geológico local

#### 2.1.3.1 Volcán Tolhuaca

Es un estratovolcán mixto de lavas y piroclastos, tiene coordenadas 38°18'S y 71°39'W, una altitud de 2806 m.s.n.m., forma irregular con base elíptica con un diámetro aproximado de 20 km (NE-SW). En él se reconoce un edificio principal (38°18'30" S y 71°38'30" W), otro adosado en su flanco NW y una fisura con orientación NW-SE de longitud aproximada de 4 km en su flanco noroeste. Cubre una superficie de 200 km<sup>2</sup>. El edificio volcánico se encuentra altamente erodado por glaciares, en particular, los flancos oriental y sur presentan morfologías glaciales como circos y valles los cuales han dejado en descubierto una gran parte de la sucesión estratigráfica que lo

componen principalmente lavas macizas de 5 a 20 m de espesor. Otras morfologías como farellones abruptos, rocas aborregadas, acanaladuras, estrías glaciares y depósitos de morrenas revelan el estado avanzado de desgaste que presenta el volcán. En la cima de él, sobre la cota de los 1800 m, todavía se puede divisar glaciares en retroceso, con una extensión total en área se aproxima a los 5 km<sup>2</sup>.

Por otro lado, se identifican otro edificio volcánico y una fisura de 4km de longitud en el flanco noroeste del edificio principal. La fisura tiene orientación NW-SE y posee numerosas solfatatas (fumarolas y Manantiales) alineadas en dirección NNW-SSE. Las cuales conforman el Sistema Geotermal Tolhuaca (SGT) (Melosh et al., 2010).

De acuerdo con la carta geológica (Moreno et al. 2010) se han definido las siguientes unidades:

#### 2.1.3.1.1 Unidad Tolhuaca 1 (Pleistoceno Medio)

Secuencia de hasta 400 m de espesor, estratificada de conglomerado y brecha de origen principalmente lahárico, intercalado con lavas cuya composición varía de andesítica a dacítica (57-64% SiO<sub>2</sub>). Secuencia fuertemente afectada por erosión glacial. Sus afloramientos se distribuyen radialmente por el edificio principal. Unidad sobreyacente en discordancia a rocas del basamento y subyace en discordancia erosiva a rocas de la Unidad Tolhuaca 2 y a productos volcánico del vn. Lonquimay (sureste del volcán Tolhuaca)

#### 2.1.3.1.2 Unidad Tolhuaca 2 (Pleistoceno Medio-Superior)

Sucesión de composición de lavas basáltica a dacítica (51-68% SiO<sub>2</sub>) con predominio de andesitas basálticas. Potencia de 500 a 600 m, intercalada con rocas volcanoclástica, con abundantes inyecciones filonianas. Unidad que muestra un intenso desgaste glacial que da forma al edificio volcánico principal (cráter erosionado de 800 m de diámetro), los flancos del edificio muestran potentes y abundantes depósitos morrénicos. Existe presencia de estructuras “craqueladas” que evidencia la interacción entre lavas y hielo durante el origen de estas rocas en los distintos procesos eruptivos. Sobreyace en discordancia erosiva a rocas de la Unidad Tolhuaca 1 y del basamento. Subyace a rocas de la Unidad Tolhuaca 3.

#### 2.1.3.1.3 Unidad Tolhuaca 3 (Pleistoceno Superior)

Secuencia de lavas con limitadas intercalaciones volcanoclástica, se distribuyen de tal forma que generó un estratovolcán (cráter de 700 m de diámetro) ubicado en el flanco noroeste del edificio principal (adosado a el de la Unidad Tolhuaca 2). Lavas con composición predominantemente andesítico-basáltica, al igual que las unidades anteriores presenta erosión glacial, escasos depósitos morrénicos en sus flancos y nítidas estructuras subglaciales. Infrayace a la Unidad Tolhuaca 4.

#### 2.1.3.1.4 Unidad Tolhuaca 4 (Pleistoceno Superior)

Colada de lava andesítica (53% SiO<sub>2</sub>) producto del último episodio volcánico del estratovolcán Tolhuaca, emitido desde el cráter del estratovolcán de la Unidad Tolhuaca 3. Desciende hacia el norte a lo largo del río Tolhuaca. Manifiesta moderada erosión glacial en su superficie.

#### 2.1.3.1.4 Unidad Tolhuaca Fisural 1

Corresponde a una secuencia de lavas de composición andesítica-basáltica (53-55% SiO<sub>2</sub>). Siendo una secuencia remanente de una estructura fisural antigua con orientación NW-SE. Presenta abundante erosión glacial, y sus centros de emisión forman un cordón discontinuo con 3.5 km de longitud. Algunas partes de esta secuencia, se interdigita con niveles altos de la Unidad Tolhuaca 1. Se presenta en discordancia a rocas del basamento y subyace a las Unidades Tolhuaca 3 y 4.

#### 2.1.3.1.5 Unidad Tolhuaca Fisural 2

Unidad compuesta por una secuencia de lavas de composición andesítica-basáltica a intermedia (52-60% SiO<sub>2</sub>), que fueron emanadas desde una fisura ancestral de orientación NW-SE y tiene una longitud de 3 km. Lavas que presentan morfologías de tipo “aa” y que exhiben importante erosión glacial.

#### 2.1.3.1.5 Unidad Tolhuaca Fisural 3

Producto más reciente de la Unidad Fisural, presenta zona de fumarolas y solfatadas. Esta unidad está compuesta por un domo y una colada de lava andesítica intermedia a silícea (60 % SiO<sub>2</sub>).

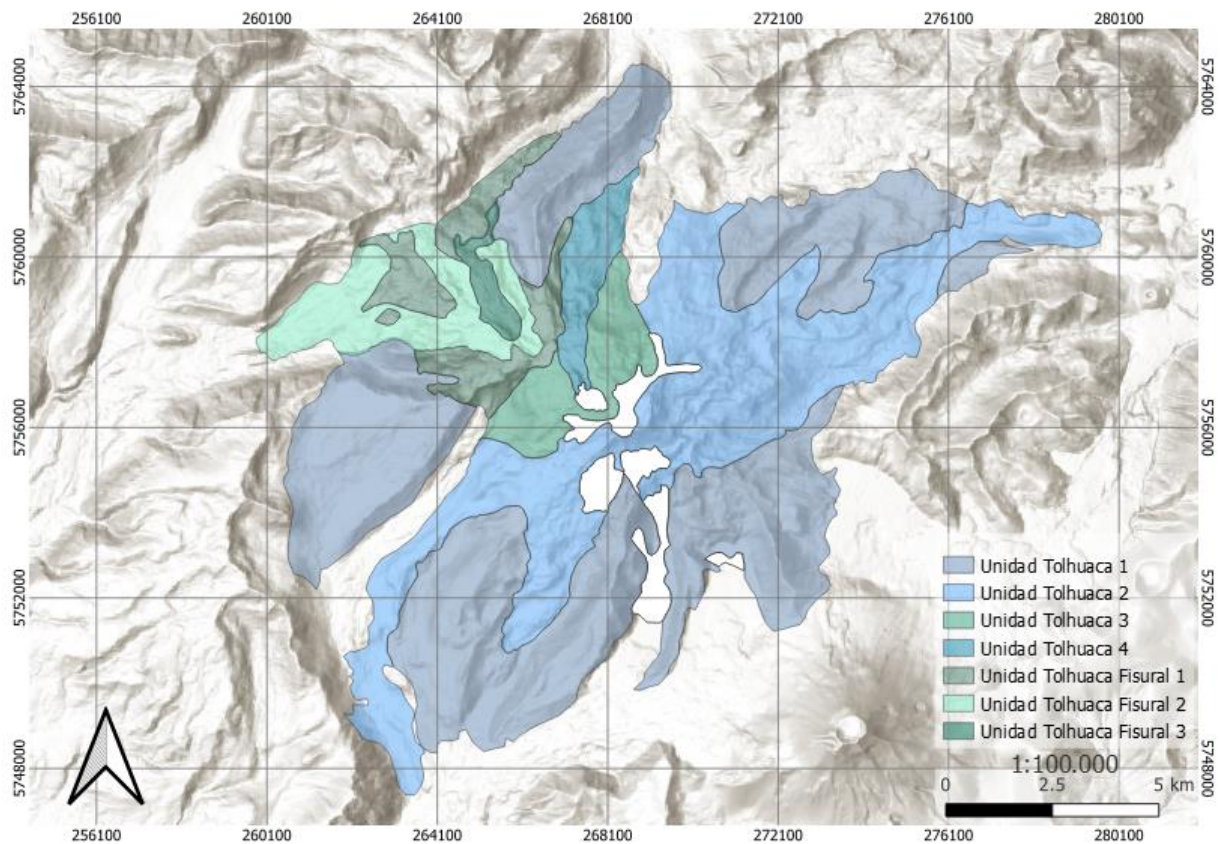


Figura 3 Mapa Geología local volcán Tolhuaca.

### 2.1.3.2 Actividad Eruptiva prehistórica e histórica

No existe información fidedigna o documentada reciente para la actividad volcánica del Tolhuaca. Sin embargo G. Hantke describió en un trabajo inédito que en los años 1876, 1933 (7 de enero) y 1940 habrían ‘explosiones en el cráter principal’ del volcán Tolhuaca. Por otro lado, en la revista ‘National Geographic’ del año 1941 en un artículo que habla sobre Chile, se presenta una fotografía del volcán Lonquimay y Tolhuaca en febrero de 1940, en actividad volcánica simultánea con un penacho de cerca de 1000 m de altura (Suárez, 1997).

### 2.1.3.3 Depósitos sedimentarios y piroclásticos locales

Dentro de estos depósitos, se encuentran de tipo piroclásticos, coluviales, aluviales, lacustres, fluviales, de deslizamiento y morrénicos. Los cuales se encuentran descritos en la carta geológica del Lonquimay & Tolhuaca de Moreno (2012). Los depósitos de edad holocena son:

- Depósitos piroclásticos indiferenciados
- Depósitos coluviales y aluviales
- Depósitos Morrénicos Recientes
- Depósitos Lacustres
- Depósitos Fluviales
- Depósitos de Deslizamiento

### **CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA**

La metodología cuenta con un trabajo previo en relación con el objetivo general descrito previamente, los cuales incluyen un trabajo en terreno en donde se extrajeron las muestras utilizadas en este trabajo.

Posteriormente, para cumplir con los objetivos específicos, se realiza una recopilación de antecedentes que involucren investigaciones tanto del volcán Tolhuaca, su naturaleza y su marco geológico. Estos antecedentes pueden ser en formato: artículo de revista científica, memorias de título, mapas e informes geológicos. Con toda la información recopilada, se elaboró una base de datos la que especificaba datos geoquímicos de la geología local de la zona de estudio para luego compararlos con la base de datos de los resultados de este trabajo.

#### **3.1 Ubicación y acceso**

La zona de estudio del volcán Tolhuaca se ubica en la Zona Volcánica Sur de los Andes, en la Región de la Araucanía, Chile. Cerca del límite sur de la Región del Biobío. El volcán se encuentra en la provincia de Malleco y sus coordenadas son 38°18'33.64" S y 71°38'43.41" W. La localidad más cercana es la comuna de Curacautín que se encuentra aproximadamente a 25 km por ruta al SW del Tolhuaca.

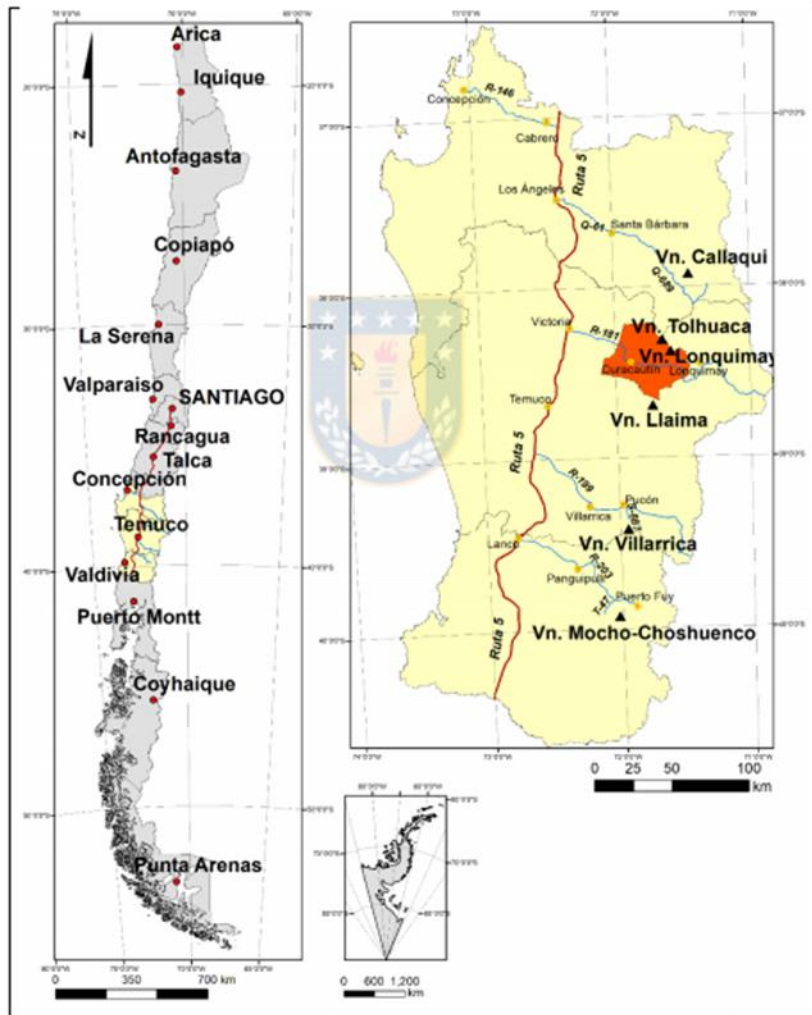


Figura 4 Mapa ubicación de la zona de estudio. Arias (2020).

Para acceder a la zona de estudio, hay que llegar a la comuna de Victoria, por la Ruta 5 Sur Panamericana (aproximadamente 614 km al sur de Santiago) y luego tomar la ruta R-181 hacia Curacautín. Desde la ruta R-755 que se accede desde el norte de Curacautín tras 20 km de ruta y tomando un desvío a la derecha, permite el acercamiento al sector NW del volcán. Por otro lado, unos 6 km a la salida de Curacautín (por la ruta R-181) tomando la ruta R-761 y 14 km después e ingresando al fundo de don Jaime Muro se ingresa al sector SW del Tolhuaca (Flores, 2020). El resto del acceso debe ser a pie por la ladera del volcán en ambos sectores.



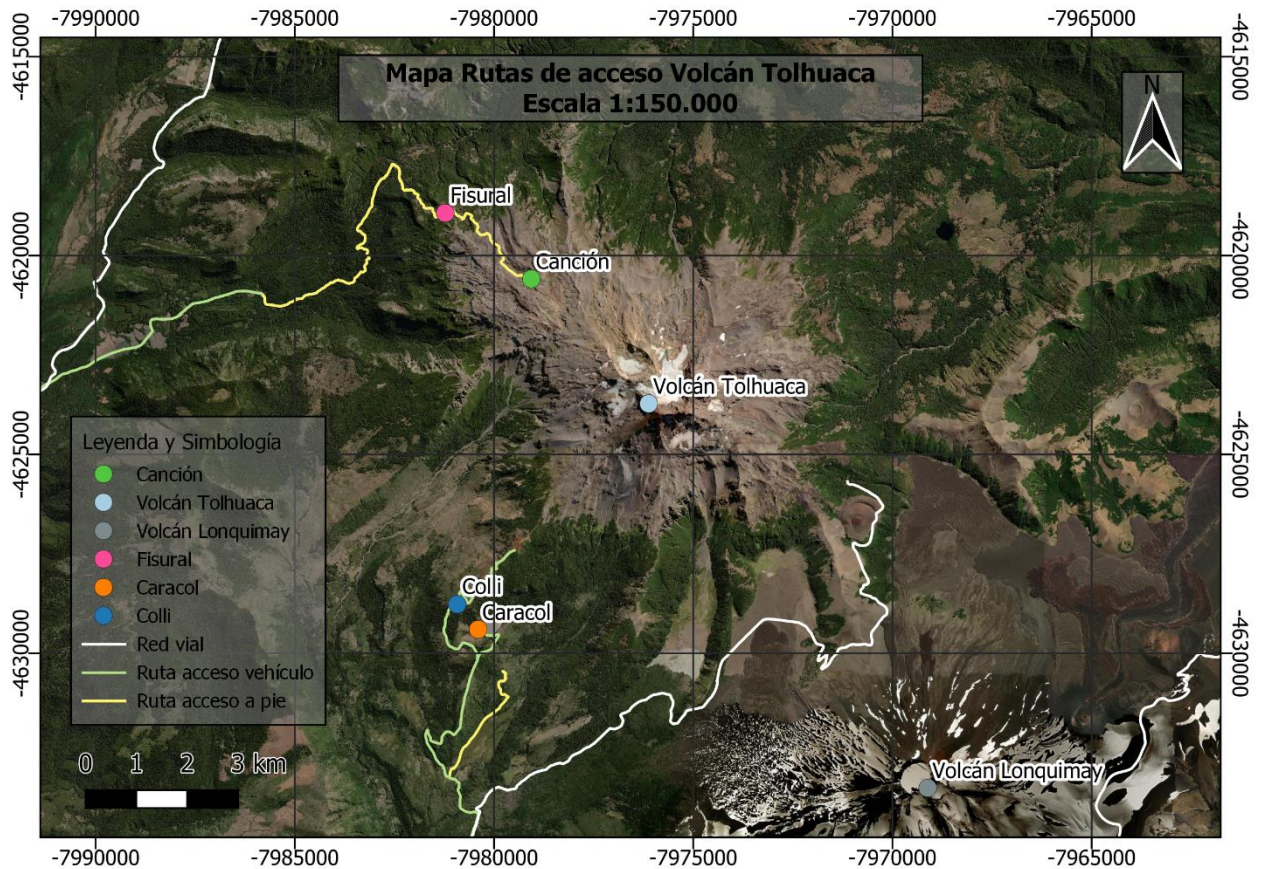


Figura 5 Ruta de acceso área de estudio. Imagen de base obtenida a través del software QGis y luego modificada (2022).

### 3.2 Trabajo preparativo salida a terreno

La salida a terreno tenía como objetivo general:

Caracterizar las condiciones químicas y mineralógicas de los magmas en sistemas volcánicos asociados a campos geotermales y muestrear rocas volcánicas con el objetivo de identificar minerales en el laboratorio (Loaiza, C. 2020).

Con base a esto, los preparativos de la salida a terreno consistieron en identificar y definir las zonas a muestrear, las cuales se definieron a partir de búsqueda bibliográfica del volcán Tolhuaca, compilación de material cartográfico con sistema de información geográfica (ArcMap vs. 10.5) y puntos tomados por el geólogo de la empresa geotermia Transmark, Alberto Espinoza. Las zonas definidas en el volcán fueron dos sectores, el flanco SW y NW del cráter del Tolhuaca. Ambos sectores fueron escogidos debido a que presentan las principales fuentes recientes de volcanismo de la zona. En la ladera SW del

volcán los Conos adventicios Colli y Caracol, mientras que en la ladera NW se disponían el cordón fisural y el Cono Canción tal como se muestra en la Figura 5.

### 3.3 Muestreo en terreno

Las muestras obtenidas en terreno se ven reflejadas en las siguientes tablas (Tabla 1, Tabla 2, Tabla 3, Tabla 4), también se exponen fotografías (Figura 6, Figura 7, Figura 8 y Figura 9) que muestran los afloramientos de donde se obtuvieron las muestras estudiadas. Las cuales están separada por cada cono adventicio de estudio, conos Caracol (CA##) y Colli (CO#) en el flanco suroeste, mientras que cono Fisural (TO#, FI#) y Canción (CC#) en el flanco noroeste.

En cada toma de muestra, se hacía una descripción general del afloramiento y tomaba coordenadas geográficas más la altitud. Cuando las muestras se tomaban directamente desde un afloramiento, se martillaban para obtener una muestra fresca. Para el caso de depósitos volcánicos de material fino, se realizaba la separación mecánica por tamizado en mallas de 1000 y 500 micras, pero antes de eso se despejaba el afloramiento para dejarlos expuesto y luego se excavaba con pala para obtener los depósitos más frescos posibles.

Las muestras de las tablas que se presentan en negrita, fueron analizadas geoquímicamente. Y los cortes transparentes fueron extraídos de las muestras que presentan un asterisco (\*).

Tabla 1 Muestras Cono Caracol (flanco SW).

Nombre muestra	Tipo de muestra	Latitud (UTM 19H)	Longitud (UTM 19H)	Altura (m)
CA01	Bomba	5751341	264900	1455
CA01	Bomba	5751341	264900	1455
<b>CA02A*</b>	<b>Bomba</b>	<b>5751304</b>	<b>264803</b>	<b>1461</b>
CA02B	Bomb	5751127	264808	1451
CA03	Bomb	5751443	264875	1454
<b>CA04I</b>	<b>Bomba</b>	<b>5751609</b>	<b>265016</b>	<b>1478</b>
CA04S	Bomba	5751609	265016	1478

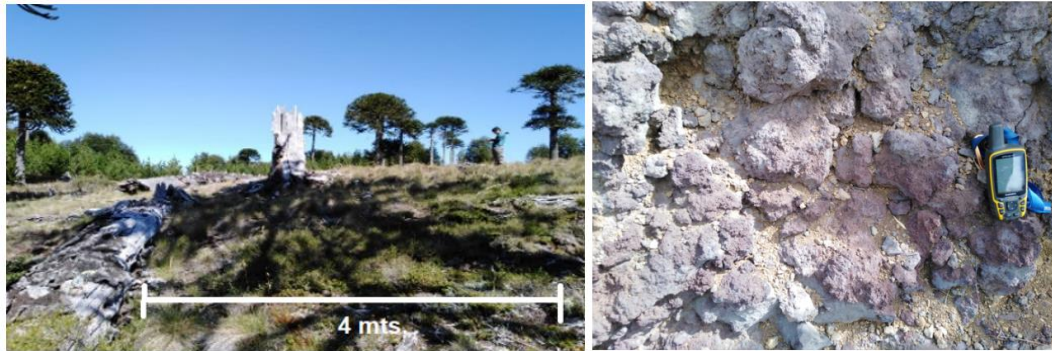


Figura 6 Afloramiento cono Caracol

Tabla 2 Muestras Cono Colli (flanco SW).

Nombre muestra	Tipo de muestra	Latitud (UTM 19H)	Longitud (UTM 19H)	Altura (m)
<b>CO01A1</b>	<b>Escoria</b>	<b>5752090</b>	<b>264590</b>	<b>1522</b>
<b>CO01A2</b>	<b>Escoria</b>	<b>5752090</b>	<b>264590</b>	<b>1522</b>
<b>CO01A3</b>	<b>Escoria</b>	<b>5752090</b>	<b>264590</b>	<b>1522</b>
<b>CO01B*</b>	<b>Bomba</b>	<b>5752090</b>	<b>264590</b>	<b>1522</b>
CO01C	Escoria	5752090	264590	1522
CO02I	Escoria	5753126	265583	1766
CO02S	Escoria	5753126	265583	1776
<b>CO03</b>	<b>Lava</b>	<b>5752841</b>	<b>265318</b>	<b>1710</b>

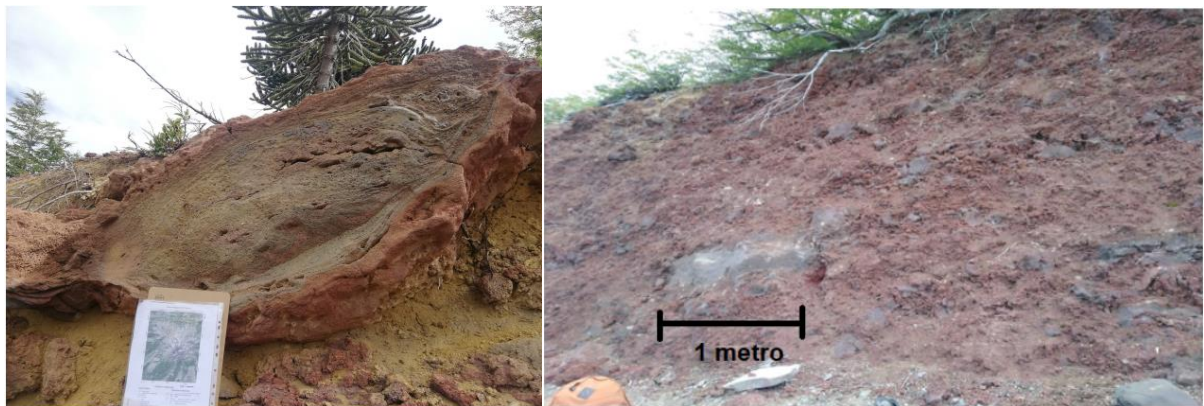
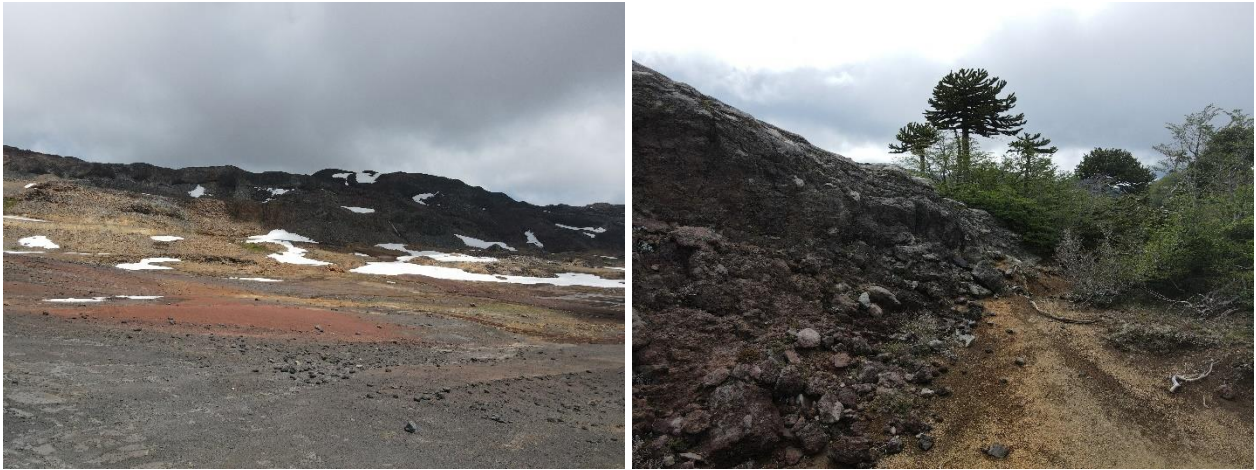


Figura 7 Bomba y afloramiento cono Colli

Tabla 3 Muestras Tolhuaca Fisural (flanco NW).

Nombre muestra	Tipo de muestra	Latitud (UTM 19H)	Longitud (UTM 19H)	Altura (m)
<b>TO1A*</b>	<b>Lava</b>	<b>5759787</b>	<b>263993</b>	<b>1736</b>
<b>TO1B*</b>	<b>Lava</b>	<b>5759787</b>	<b>263993</b>	<b>1736</b>
FI1	Lava	5759779	264130	1769
<b>FI1A*</b>	<b>Lava</b>	<b>5759779</b>	<b>264130</b>	<b>1769</b>



*Figura 8 Cono Fisural*

Tabla 4 Muestras Cono Canción (flanco NW).

Nombre muestra	Tipo de muestra	Latitud (UTM 19H)	Longitud (UTM 19H)	Altura (m)
<b>CC1*</b>	<b>Lava</b>	<b>5758532</b>	<b>265865</b>	<b>2054</b>



Figura 9 Afloramiento cono Canción

### **3.4 Metodología general**

#### **3.4.1 Objetivo específico 1**

Elaborar una columna estratigráfica y estudiar sus implicancias con las secciones estratigráficas detalladas y la ubicación de las muestras colectadas a terreno comparando con los mapas geológicos publicadas (Thiele et al., 1987; Moreno et al., 2012; Stimac, 2013) y mediante imágenes satelitales, fotografías y relieve del área con el uso del

software ArcGIS 10.3. También de manera complementaria se espera realizar una salida a terreno a la zona de estudio, para poder reconocer y confirmar las unidades en las que pertenece estos conos.

#### 3.4.2 Objetivo específico 2

Realizar una descripción petrográfica detallada (tanto macroscópica como microscópica) de cada roca correspondiente a cada cono, para distinguir que fases minerales se asocian a cuál composición de magma respectiva. Se complementa la descripción a los resultados de análisis e interpretación geoquímica de roca total tal como elementos mayores, menores y traza de muestras recolectadas para cada cono para identificar el grado de diferenciación que corresponde a cada evento magmático que da origen a los depósitos volcánicos. El análisis geoquímico de roca total está hecho mediante espectrometría óptica (ICP-OES) para elementos mayores y espectrometría de masa (ICP-MS) para elementos trazas.

#### 3.4.3 Objetivo específico 3

Establecer las descripciones texturales y características de los minerales primarios observados en cortes transparentes de las rocas volcánicas que permitan especificar procesos de formación similares o distintos. A partir de las descripciones de las rocas volcánicas colectadas a terreno, se podrá identificar el tipo de depósito o el nombre correcto de la roca volcánica para entender su modo de emisión y de transporte .

#### 3.4.4 Objetivo específico 4

Realizar análisis geoquímicos exhaustivos como modelos de distribución de elementos trazas (Spidergram) desde el análisis química de roca total, para poder determinar la signatura de los magmas. Con esta caracterización se compara los datos con una base de datos regionales según recopilación de los resultados de las metodologías 1-3 junto con la bibliografía pertinente para proponer el modelo deseado. El modelo petrogenético se apoyará con el uso de cálculo de fraccionamiento cristalino (XL FRAC software; Stormer and Nicholls, 1978; COMAGMAT 3.72) con ilustraciones vectoriales representados en diagramas binarios.

## **CAPÍTULO 4: RESULTADOS**

### **4.1 Petrografía**

La petrografía de roca total de este trabajo se presenta de manera comparativa entre los distintos conos adventicios del volcán Tolhuaca, los cuales se muestran de acuerdo con su ubicación geográfica según el flanco del centro eruptivo. En el flanco suroeste (Cono Colli y Cono Caracol) y en el flanco noroeste (Cordón Fisural y Cono Canción), respectivamente.

En las muestras descritas se puede notar diferencias de primer orden, ya sea por la mineralogía de los fenocristales en la que abunda la presencia de plagioclasas y piroxenos, como de segundo orden, es decir, la textura, diferencia de porcentajes de las fases observadas, entre otros. La principal composición que presenta las muestras descritas es basalto-andesita.

A su vez, para realizar este trabajo, se utilizó un microscopio polarizado que permitió observar los cortes hasta con un aumento de 40x. Así se pudo reconocer texturas de fenocristales, masa fundamental, conglomerados y relación entre los tamaños de los granos.

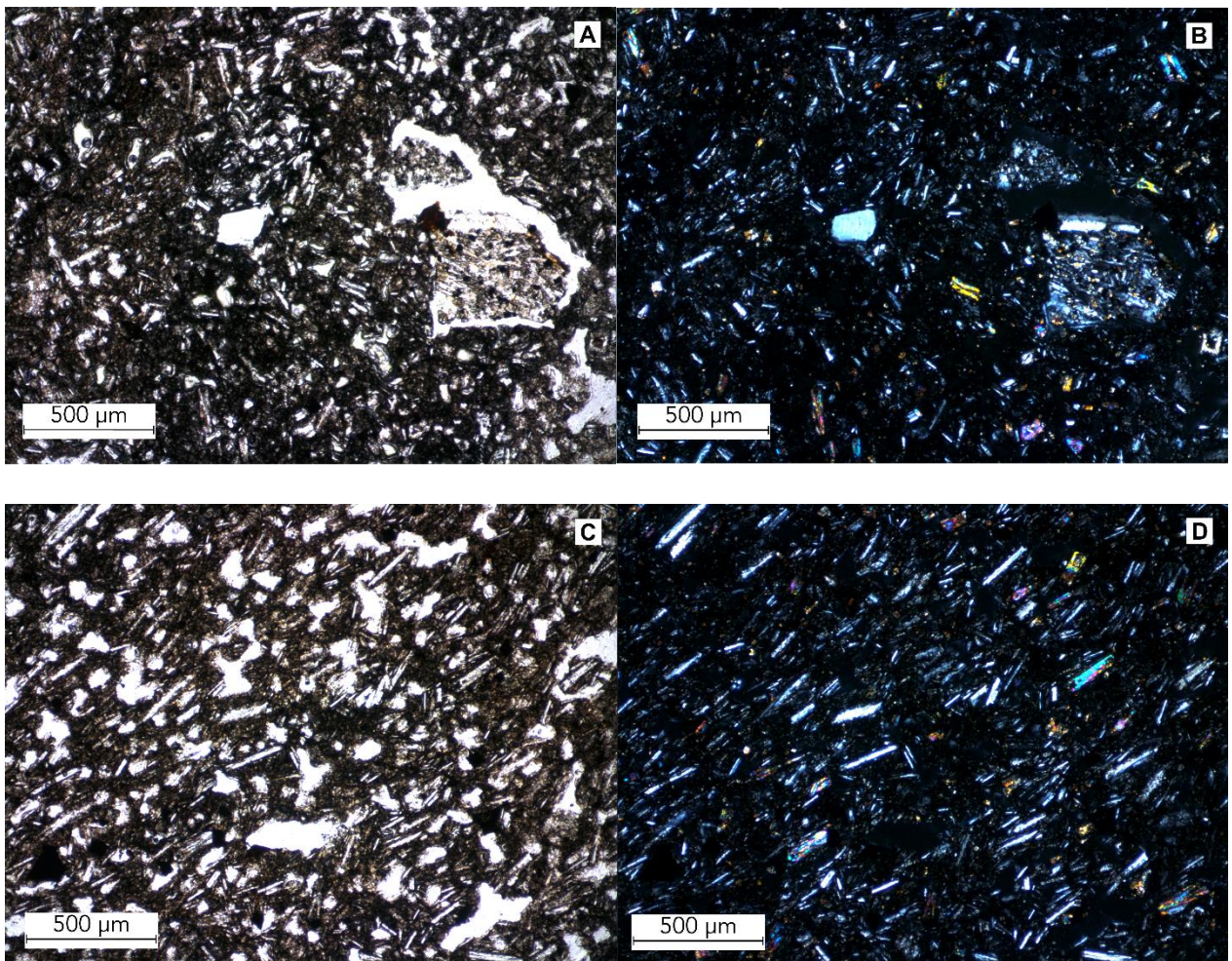


Figura 10 CO01B 5x. Textura vesicular e hialopilitica. Nicoles paralelos (A-C). Nicoles cruzados (B-D)

#### 4.1.2 Cono Caracol

El corte transparente de este cono del flanco suroeste se destaca por presentar textura vesicular, con vesículas de gran tamaño (hasta 1 mm ) que se encuentran orientadas. También se observan intersticios rellenos con microlitos y vidrios con la misma orientación que las vesículas (textura pilotaxítica y hialopilitica). Sus fenocristales son principalmente plagioclasa y piroxenos, ambos con textura coronítica.

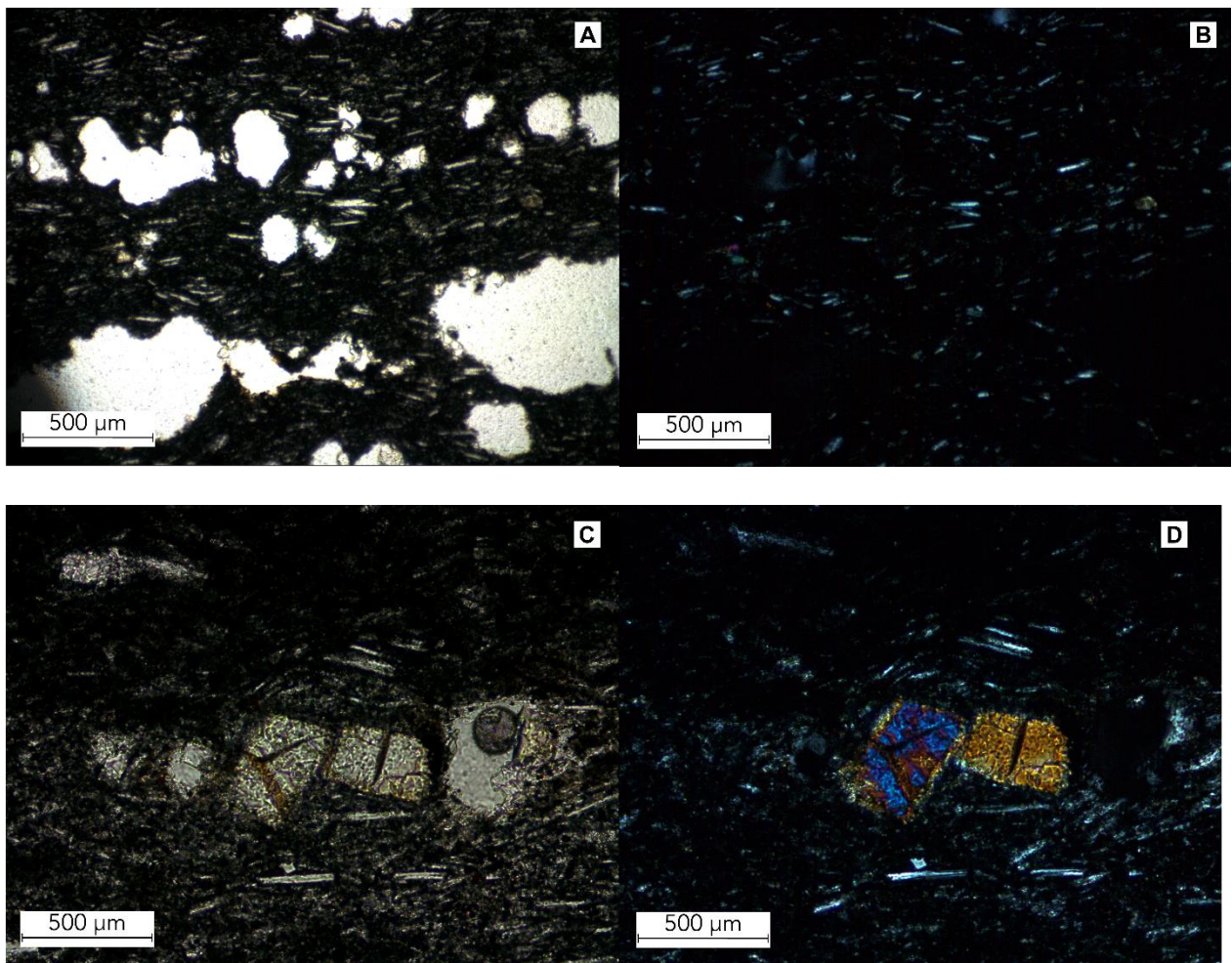


Figura 11 CA02A 5x. Textura vesicular orientada, politaxítica y hialopilitica. Fenocristales de plagioclasa y piroxenos, ambos con textura coronítica. Nicoles paralelos (A-C). Nicoles cruzados (B-D)

#### 4.1.3 Cordón Fisural

En el Cordón Fisural del volcán Tolhuaca, es el que presenta la mayor cantidad de muestras estudiadas. La principal textura que presentan es la textura vesicular con vesículas de hasta 5mm, con forma irregular. También se distinguieron textura porfídica y cúmulo porfídica, en donde los principales fenocristales son de plagioclasa y piroxenos. Las plagioclasas presentan en su mayoría textura sieve y el hábito principal en la que se observa es tabular-subhedral.



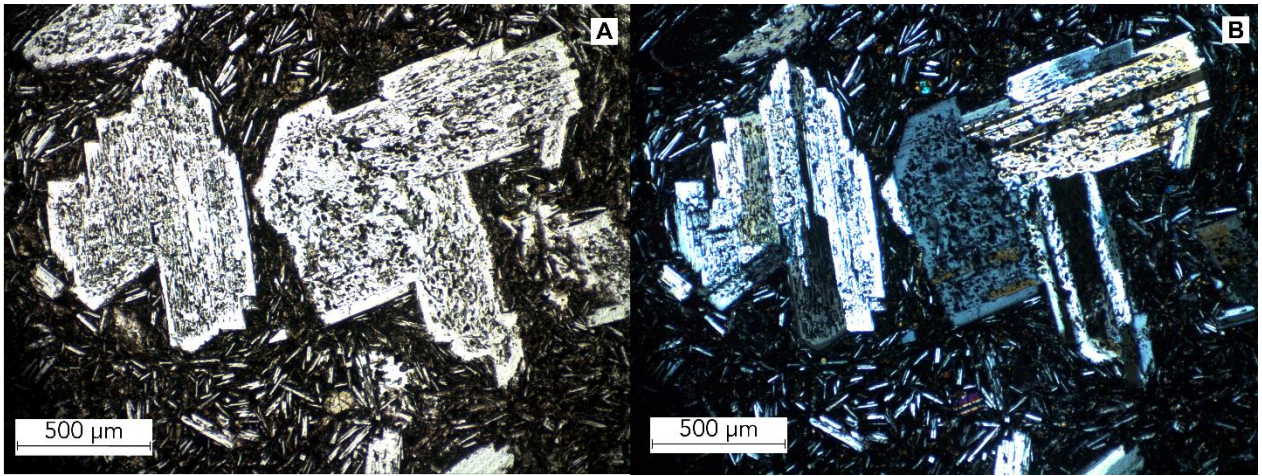


Figura 12 Figura 5 Muestra NV18 5x. Textura pilotaxítica, fenocristales cúmulo-porfídicos de plagioclasa con textura sieve. Nicoles paralelos (A). Nicoles cruzados (B)

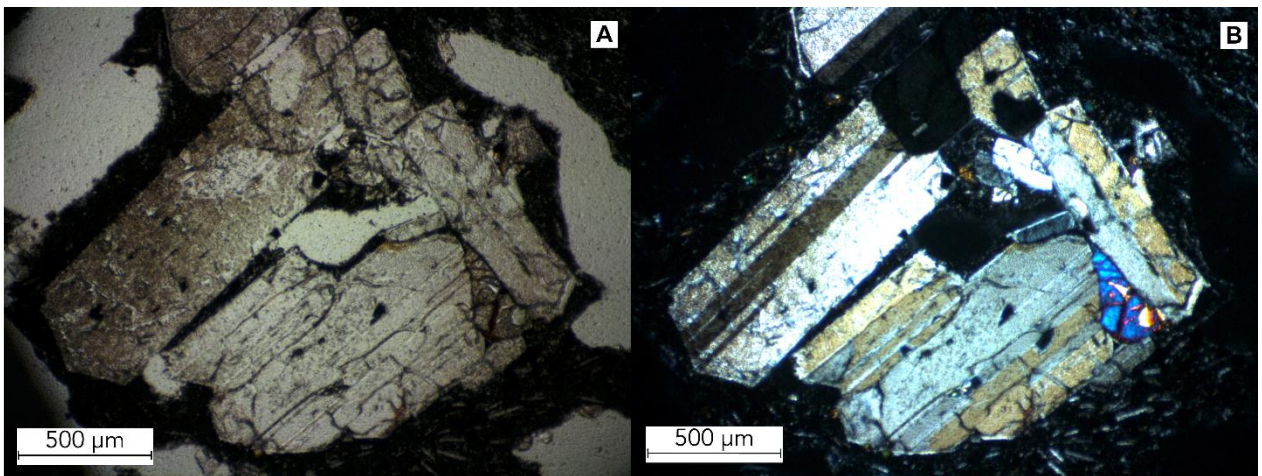


Figura 13 Muestra TO1B 5x. Textura vesicular y cúmulo-porfídica. Nicoles paralelos (A). Nicoles cruzados (B)

#### 4.1.4 Cono Canción

El cono Canción tiene como principal textura la textura vesicular, el diámetro de sus vesículas abarcan hasta 0,4 mm y se presentan de forma irregular. Sus fenocristales son primordialmente plagioclasa alteradas con textura sieve y piroxenos.

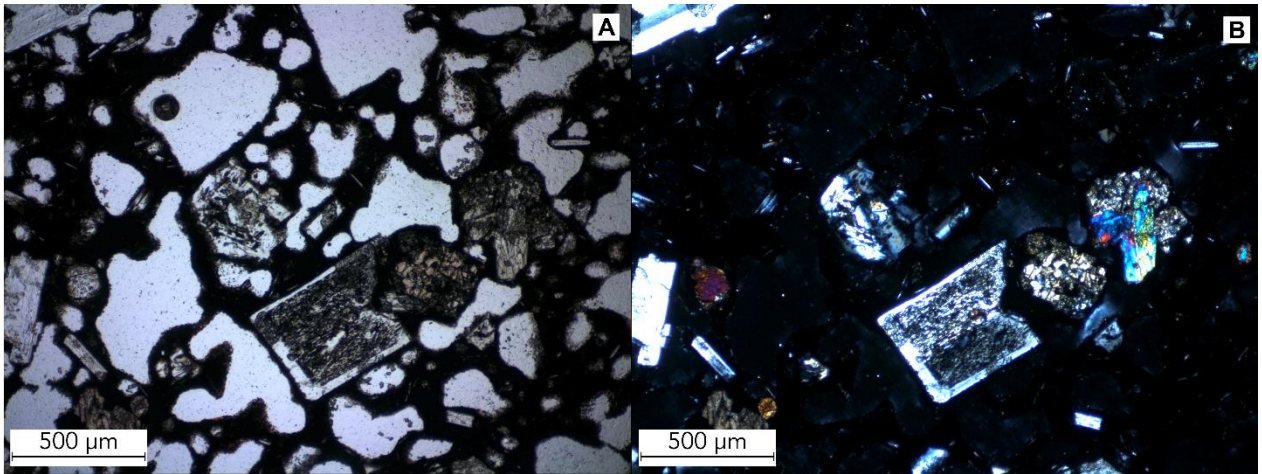


Figura 14 CC1 5x. Textura vesicular. Fenocristales de plagioclasa con textura sieve y algunos piroxenos. Nícoles paralelos (A). Nícoles cruzafos (B)

## 4.2 Geoquímica de roca total

Como se mencionó en la sección 3.3, y como muestra las tablas 1-4. Se realizaron análisis geoquímicos a once muestras de los cuatro conos adventicios de estudio. Estos resultados, se ven reflejados en las siguientes 2 tablas, la cuales se separan en la geoquímica de elementos mayores y menores/trazas. Los resultados de elementos mayores, se presentan los resultados en porcentaje peso (wt%) y en los datos geoquímicos de elementos menores en concentración “ppm”. La corrección de óxido de hierro...

Tabla 5 Resultados geoquímicos de elementos mayores utilizados en este estudio, clasificados según como eruptivo y método analítico. Los elementos mayores (normalizados al 100%) están en porcentaje de peso.

<b>Cono Adventicio</b>	<b>Canción</b>		<b>Fisural</b>				<b>Caracol</b>		<b>Colli</b>		
<b>Muestra</b>	<b>CC1</b>	<b>CC1*</b>	<b>NV18</b>	<b>TO1A</b>	<b>FI1A</b>	<b>TO1B</b>	<b>CA02A</b>	<b>CA04A</b>	<b>CO02</b>	<b>CO01B</b>	<b>CO03</b>
<b>Método Analítico</b>	FUS-ICP	LF300	FUS-ICP	FUS-ICP	LF300	LF300	FUS-ICP	LF300	FUS-ICP	LF300	LF300
SiO <sub>2</sub> (wt%)	57.97	56.79	55.29	52.15	58.52	52.38	52.47	51.86	55.16	52.4	51.72
TiO <sub>2</sub> (wt%)	0.87	0.84	1.04	1.35	1.28	1.28	1.29	1.22	1.13	1.23	1.15
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (wt%)	16.9	17.09	16.83	18.27	16.58	17.92	18.22	18.33	18.37	18.36	19.11
FeO (wt%)	4.6		6.2	6.1			1.7		<0,1		
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (wt%)	2.04	7.41	1.28	3.4	8.82	9.96	8.46	10.61	8.51	10.76	8.74
CaO (wt%)	6.47	6.47	7.55	6.56	4.95	7.46	7.35	7.77	8.09	7.91	7.8
MgO (wt%)	3.58	4.12	4.01	3.66	2.09	3.97	3.61	3.77	3.2	3.85	3.5
MnO (wt%)	0.12	0.12	0.14	0.17	0.16	0.17	0.18	0.19	0.14	0.19	0.15
K <sub>2</sub> O (wt%)	1.58	1.66	1.21	1.06	1.4	0.93	0.67	0.53	0.77	0.52	0.61
Na <sub>2</sub> O (wt%)	3.53	3.61	3.49	3.24	4.58	3.55	3.81	4.01	3.69	4.04	3.65
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (wt%)	0.16	0.16	0.25	0.28	0.26	0.24	0.21	0.16	0.2	0.19	0.19
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (wt%)		0.014			<0.002	0.004		<0.002		<0.002	0.003
LOI (wt%)	1.81	1.5	1.13	4.44	1.2	1.9	2.7		1.05	0.3	3.2

**Tabla 6** Resultados geoquímicos de elementos menores utilizados en este estudio, clasificado según como eruptivo y método analítico.

Los elementos menores y trazas se encuentran en partes por millón (PPM).

Cono Adventicio	Canción		Fisural				Caracol		Colli		
	Muestra	CC1	CC1*	NV18	TO1A	FI1A	TO1B	CA02A	CA04A	CO02	CO01B
Método Analítico	TD-MS	AQ251	TD-MS	TD-MS	AQ251	AQ251	TD-MS	AQ251	TD-MS	AQ251	AQ251
Sc (PPM)	-	N.A.	-	-	N.A.	N.A.	-	N.A.	-	N.A.	N.A.
V (PPM)	77	57	93	150	164	180	136	163	165	133	36
Cr (PPM)	64	37.4	52	27	0.9	6.8	10	1.4	28	1.3	4.1
Co (PPM)	18.8	9.9	21.7	23.2	10.3	12.6	22.0	17.6	18.7	17.0	7.3
Ni (PPM)	33.8	30.8	36.4	14.2	1.7	10.2	3.2	0.7	9	0.7	4.5
Cu (PPM)	49.2	36.92	96.6	61.4	37.91	99.46	64.3	23.21	104	23.28	39.45
Zn (PPM)	-	20.2	-	-	67.5	53.7	-	65.5	-	46.6	25.7
Rb (PPM)	53.2	1.0	34.5	24.0	1.8	1.5	13.0	0.3	12.8	0.3	0.6
Sr (PPM)	398	89.1	448	395	26.9	69.8	510	144.4	489	146.9	118.8
Y (PPM)	22.3	2.15	25.1	23.4	16.15	10.06	21.5	5.49	16.2	4.24	13.35
Zr (PPM)	119	7.9	105	118	9.8	25.1	83	7.1	96	7.2	5.1
Mo (PPM)	0.15	0.18	0.2	< 0.05	0.9	0.75	0.06	0.2	0.33	0.12	0.08
Nb (PPM)	< 0.1	0.02	< 0.1	< 0.1	0.03	0.29	0.2	0.12	1.2	0.04	0.06
Sb (PPM)	0.1	0.14	< 0.1	< 0.1	0.31	0.11	< 0.1	<0.02	0.2	<0.02	0.09
Cs (PPM)	5.55	0.21	3.6	1.78	0.38	0.72	1.28	0.04	0.94	0.04	0.12
Ba (PPM)	343	18.9	328	290	37.2	36.8	231	13.8	256	19.1	22.5
La (PPM)	12.9	1.6	13	10.1	11.6	10	8.4	3.3	7.4	2.2	9.8
Ce (PPM)	31.9	4.0	32.8	26.6	30.9	22.7	22.1	7.8	18.1	5.1	16.5
Pr (PPM)	4.0	0.51	4.2	3.5	4.24	3.24	3	1.17	2.7	0.72	2.97
Nd (PPM)	18.1	2.43	19.8	16.7	19.28	14.64	14.7	5.58	12.8	3.56	13.5
Sm (PPM)	4.2	0.56	5.0	4.9	4.09	2.85	3.9	1.27	3.1	0.89	2.41
Eu (PPM)	1.02	0.14	1.18	1.29	0.36	0.35	1.27	0.32	0.97	0.28	0.82
Dy (PPM)	4.0	0.48	4.6	4.4	3.24	2.11	4.0	1.15	3.1	0.86	2.19

<b>Continuación</b>											
<b>Cono Adventicio</b>	<b>Canción</b>		<b>Fisural</b>				<b>Caracol</b>		<b>Colli</b>		
<b>Muestra</b>	<b>CC1</b>	<b>CC1*</b>	<b>NV18</b>	<b>TO1A</b>	<b>FI1A</b>	<b>TO1B</b>	<b>CA02A</b>	<b>CA04A</b>	<b>CO02</b>	<b>CO01B</b>	<b>CO03</b>
<b>Método Analítico</b>	<b>TD-MS</b>	<b>AQ251</b>	<b>TD-MS</b>	<b>TD-MS</b>	<b>AQ251</b>	<b>AQ251</b>	<b>TD-MS</b>	<b>AQ251</b>	<b>TD-MS</b>	<b>AQ251</b>	<b>AQ251</b>
Ho (PPM)	-	0.1	-	-	0.62	0.36	-	0.2	-	0.16	0.42
Er (PPM)	2.3	0.26	2.6	2.50	1.66	1.00	2.2	0.56	1.8	0.45	1.22
Gd (PPM)	4.0	0.6	4.7	4.2	4.07	2.95	4.0	1.36	3.0	1.05	2.44
Tb (PPM)	0.6	0.06	0.7	0.7	0.57	0.37	0.6	0.17	0.5	0.12	0.35
Yb (PPM)	2.4	0.22	2.7	2.8	1.6	0.8	2.3	0.57	1.8	0.45	1.02
Lu (PPM)	0.3	0.04	0.4	0.4	0.21	0.11	0.3	0.08	0.3	0.07	0.14
Hf (PPM)	-	0.21	-	-	0.38	0.62	-	0.2	-	0.22	0.12
Ta (PPM)	< 0.1	<0.05	< 0.1	< 0.1	<0.05	<0.05	< 0.1	<0.05	< 0.1	<0.05	<0.05
Tl (PPM)	0.28	0.02	0.17	<0.05	0.05	<0.02	< 0.05	<0.02	<0.05	<0.02	0.04
Pb (PPM)	15.8	-	13.5	13.7	-	-	7.9	-	8.2	-	-
Th (PPM)	6.8	0.6	4.3	3.7	3.4	2.9	1.5	0.3	1.4	0.3	1.2
U (PPM)	2.1	0.17	1.4	1.3	0.41	0.79	0.5	0.05	0.6	0.06	0.34
P(%)	-	0.017	-	-	0.088	0.087	-	0.032	-	0.017	0.061
La/Yb	5.375	7.273	4.815	3.607	7.250	12.500	3.652	5.789	4.111	4.889	9.608

#### 4.2.1 Elementos Mayores

Las rocas muestreadas de los conos adventicios del Tolhuaca, presentan un rango composicional que va desde basalto-andesita a andesita, de acuerdo con su porcentaje de contenido de sílice (52.9-59.9 wt.%) y a su contenido de alkalis (NaO+K<sub>2</sub>O) que varía de un 3-7%, según el diagrama de composición TAS de Maitre et al. (2004). Estos datos se encuentran contrastados con datos geoquímicos regionales de diferentes centros eruptivos: Lonquimay, Llaima, Callaqui, Sollipulli y Villarrica. Cuyas composiciones varían desde basalto-alkali a dacita, incluyendo basalto-traquiandesita y traquiandesita, tal como se muestra en la Figura 15.

La composición de los conos del flanco NW varía de basalto-andesita a andesita, en donde el cono Canción corresponde a una composición andesítica y el cono Fisural al rango ya antes mencionada. Para los conos del flanco SW se tiene que la composición del cono Colli corresponde a basalto-andesita y la del cono Caracol varía entre el rango basalto-andesita a andesita.

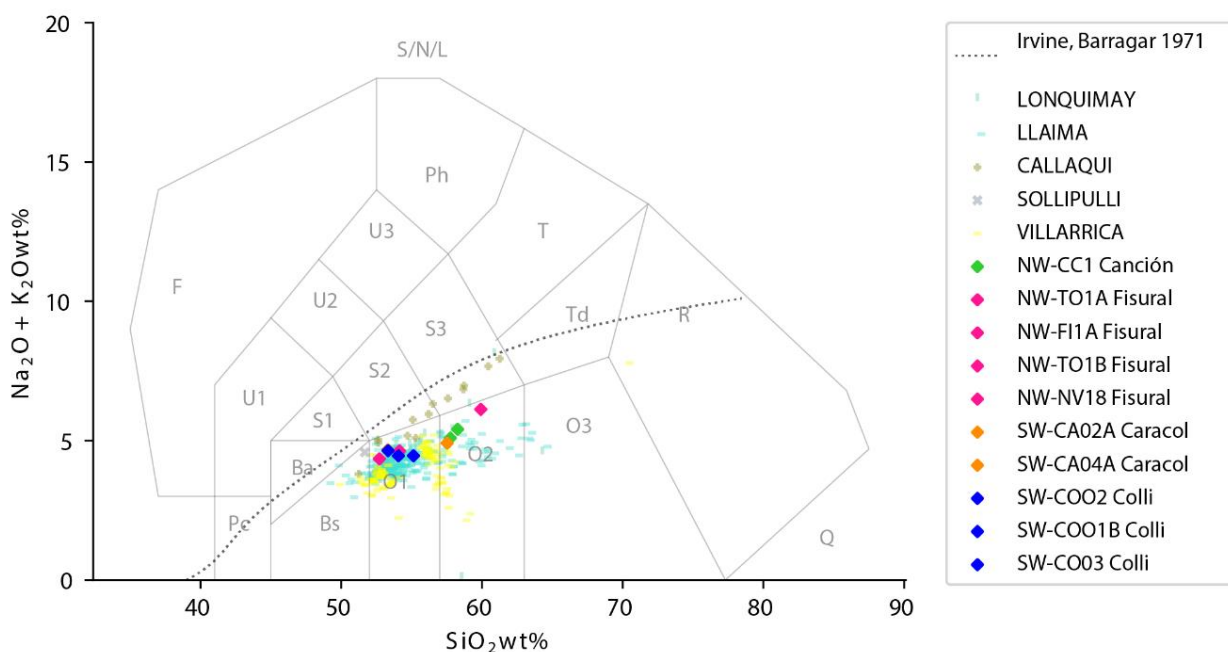


Figura 15 F: Foidita, Ph: Fonolita, Pc Picrobasalto, U1: Tefrita (ol < 10%) Basanita(ol > 10%), U2: Fonotefrita, U3: Tefrifonolita, Ba: basalto alcalino, Bs: subbasalto alcalino, S1: Traquibasalto, S2: Basalto Traquiandesítico, S3: Traquiandesita, O1: Basalto Andesita, O2: Andesita, O3 Dacita, T: Traquita, Td: Traquidacita, R: Riolita, Q: Silecita S/N/L: Sodalitita/Nefilínolita/Leucitolita. Maitre, et. Al. 2004.

De forma complementaria en el diagrama de composición AQP de Maitre et al. (2004) se puede notar que las once muestras del Tolhuaca se encuentran la zona de composición basalto-andesita, lo que se condice.

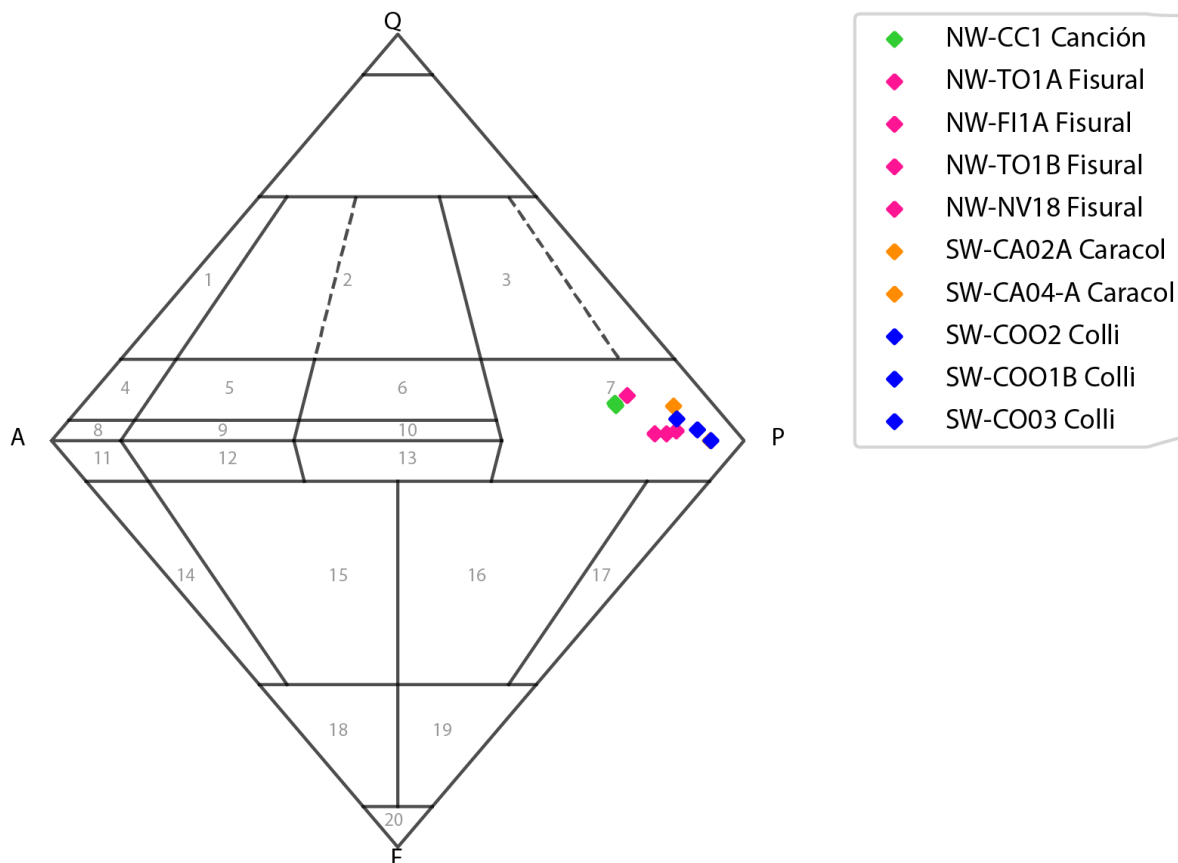


Figura 16 1: riolita feldespato-alcalina, 2:riolita, 3:dacita, 4:cuarzo alcalino feldespato traquítico 5:cuarzo traquita, 6:cuarzo latita, 7:basalto andesita, 8:feldespato traquita alcalino, 9:traquita, 10:latita, 11:foid-bearing alkali feldspar trachyte, 12:traquita con foides, 13:latita con foides, 14:fonolita, 15:fonolita tefrítica, 16:basanita fofolítica (olivino > 10%) tefrita fonolita (olivino < 10%), 17:basanita (olivino > 10%) tefrita (olivino < 10%), 18:foidita fonolítica, 19:foidita tefrítica, 20:foidita. Maitre, 2004.

En el diagrama de álcalis, óxidos de Fe y óxidos de Mg (AFM) de Wilson (1989) (Figura 17 Diagrama AFM modificado de Wilson (1989)), se observa que dos de las cuatro muestras del cono fisural, presenta una signatura Toleítica, y una tercera muestra del mismo cono se encuentra muy cerca del límite que divide la serie toleítica y calcoalcalina. Mientras que el resto de las muestras, se encuentran en la serie calcoalcalina.

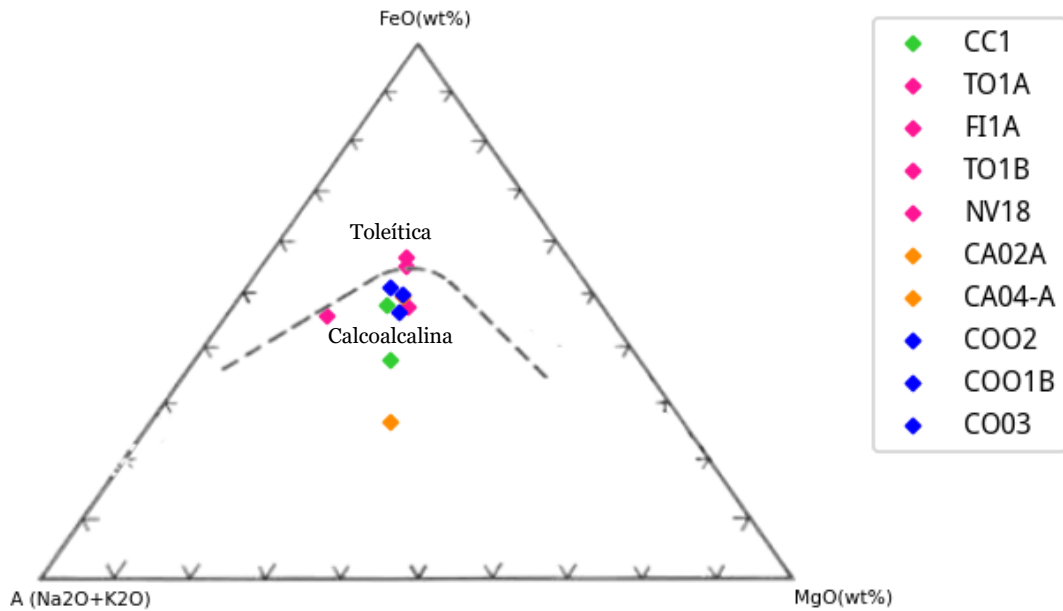


Figura 17 Diagrama AFM modificado de Wilson (1989)

Con respecto a los elementos mayores, se puede observar en general que existe una tendencia lineal entre los conos adventicios, cuando hay un aumento en la concentración de  $\text{SiO}_2$ . Estas tendencias se pueden separar entre elementos compatibles e incompatibles. Para los primeros, se aprecia un comportamiento linealmente negativo o empobrecimiento para los elementos como el Al, Fe y Mg, mientras que el Ti presenta un enriquecimiento. Por otro lado, para los elementos incompatibles se observa un comportamiento similar, en donde el Na y K presentan un enriquecimiento, el Ca un empobrecimiento, mientras que para el caso del P no se reconoce ni enriquecimiento ni empobrecimiento.



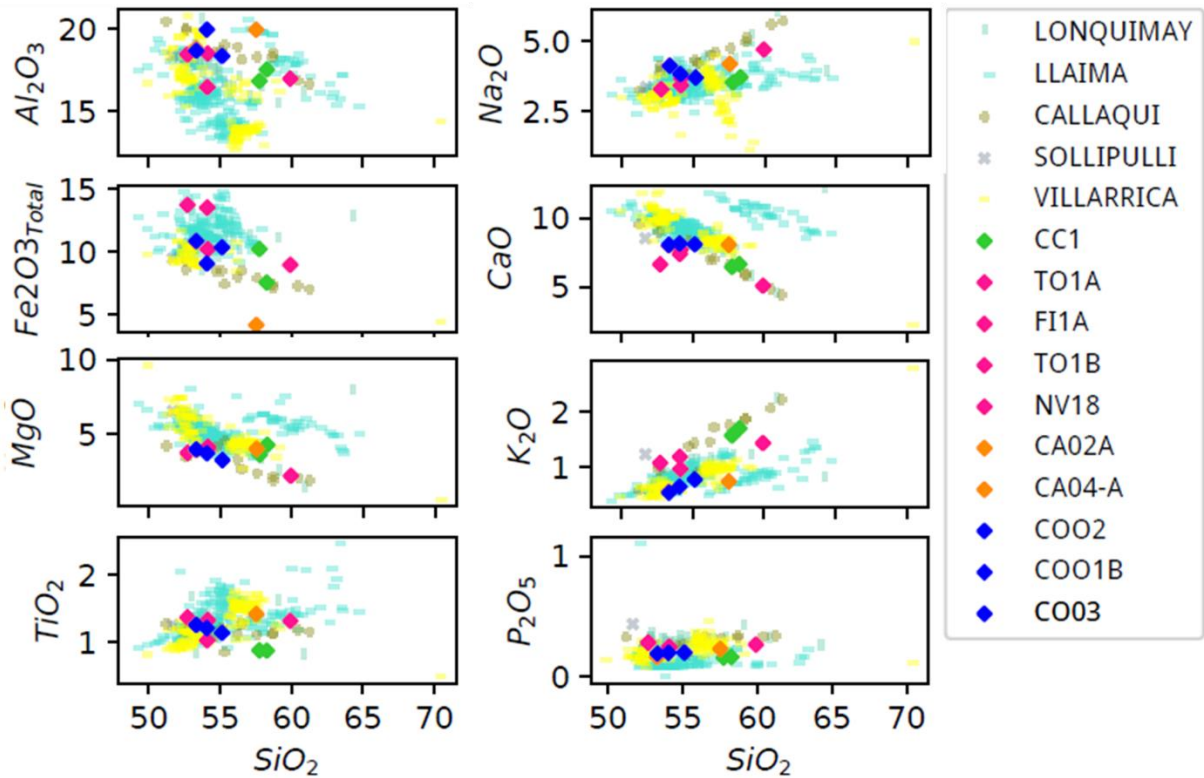


Figura 18 Diagramas Harker. Conos adventicios y centros eruptivos locales. Columna izquierda presenta elementos mayoritariamente compatibles, columna derecha elementos incompatibles. (White, 2005)

#### 4.2.2 Tierras Raras y elementos trazas

Para hacer el análisis de tierras raras, se decidió mostrar los resultados separados por flanco NW y SW al igual que en la sección de elementos trazas.

Para los centros eruptivos del flanco NW, se puede notar que existe una anomalía negativa de Eu para una muestra del cono canción y para una del cono fisural. También se observa una anomalía positiva de Tl para todas las muestras de este flanco, sin embargo, esta anomalía es mayor en las muestras CC1, TO1B y FI1A, correspondientes a los conos canción y fisural respectivamente. Por último, el Yb también presenta una anomalía negativa en las muestras CC1 y FI1A.

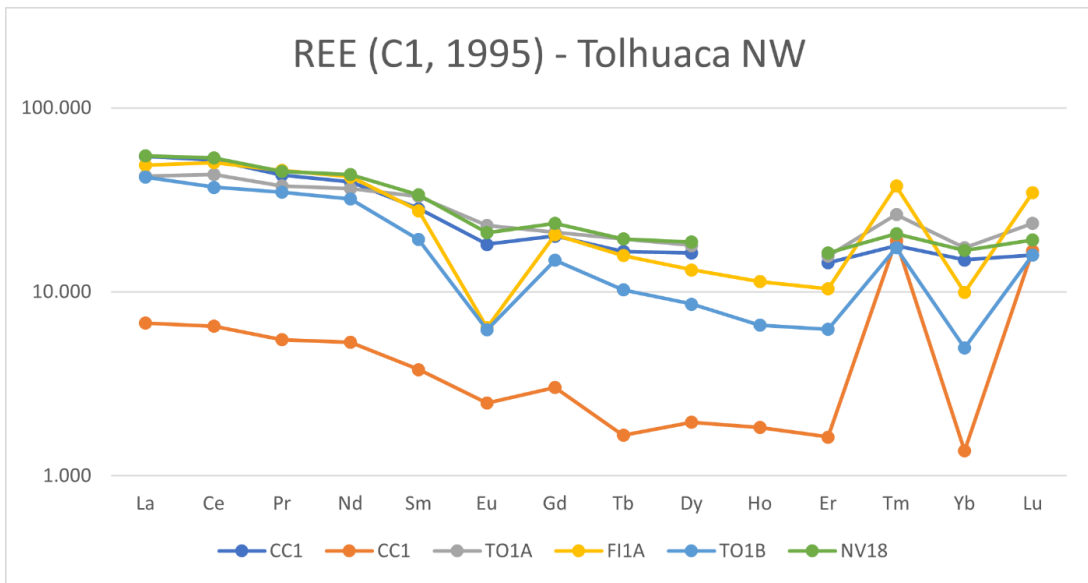


Figura 19 Diagrama spider de las muestras del flanco NW del volcán Tolhuaca. Normalizadas al condrito McDonough (1995) Elaboración propia.

Ahora para los centros eruptivos del flanco SW, se puede observar que existe una anomalía positiva notoria para el Tl en todas las muestras, aunque para la muestra del cono Colli (CO01B) es la más pronunciada, luego le sigue CA04-A del cono Caracol y por último le sigue CO03 también del cono Colli. Las otras anomalías que se distinguen, pero son menos pronunciadas que la mencionada recientemente es la anomalía negativa del Yb, al igual que en la anomalía anterior las muestras más pronunciadas son CO01B, CA04-A y CO03. Por último, se observan anomalías negativas del Ce y Eu, las cuales son muy poco prominente en relación con las anteriores y la presentan pocas muestras. Por un lado, la muestra CO03 del cono Colli presenta la anomalía de Ce y la muestra CA04-A del cono Caracol la del Eu.

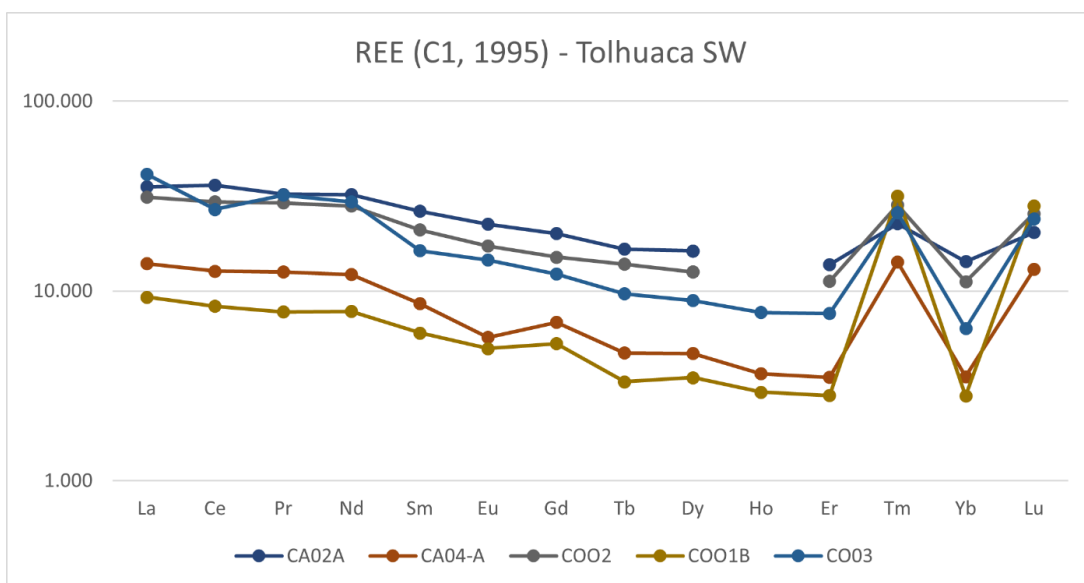


Figura 20 Diagrama spider de las muestras del flanco SW. Normalizado al condrito McDonough (1995). Elaboración propia.

## CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN

### 5.1 Análisis textural

Las texturas expuestas a continuación, corresponden a las muestras presentadas en la sección 4.1. El detalle de la descripción de estos cortes se puede consultar de manera más precisa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** de la sección de anexos. Para un mayor entendimiento del análisis textural, las muestras se agruparán geográficamente. En donde, por un lado, tendremos los cortes o muestras del flanco NW, que corresponden a los conos Canción y Fisural y, por otro al flanco SW con los conos Caracol y Colli.

La mayoría de las muestras en ambos flancos, exhiben textura porfídica, cúmulo porfídica y vesicular. En donde la textura porfídica (muestras NV18, FI1A, TO1B) evidencia al menos 2 etapas de enfriamiento y cristalización. La primera etapa habría formado los fenocristales de plagioclasa, clinopiroxeno y olivino presentes en los cortes, con una baja tasa de enfriamiento y nucleación, lo que permitió un mayor crecimiento de estos cristales, la segunda etapa habría formado los microlitos de plagioclasa y clinopiroxenos, con una alta tasa de enfriamiento y nucleación, lo que, explicaría el bajo crecimiento y la gran cantidad de estos. La textura vesicular (muestras CA02A evidencia la exsolución de volátiles en niveles superficiales y luego su desgasificación, cabe destacar que existe una diferencia de primer orden en el tamaño de las vesículas en ambos flancos. En donde para el flanco NW las vesículas son de un mayor tamaño entre 2 y 5 mm, mientras que las del flanco SW son más pequeñas entre 0.5 a 1 mm. Que existan vesículas de gran tamaño, indica que las burbujas en el magma pudieron crecer por difusión, descompresión o coalescencia, mientras ascendían junto al magma, lo que también podría aumentar la velocidad de ascenso de este. (Parfitt y Wilson, 2008)

La textura cúmulo porfídica se podría explicar debido al crecimiento de cristales en forma de cúmulos (en alguna etapa de enfriamiento) por un ahorro de energía (Shelley, 1993) a partir de una nucleación heterogénea.

Las texturas de bordes de reacción, coronítica y sieve, muestra una alteración en las condiciones de presión, temperaturas iniciales para la formación de fenocristales. Esto demostraría un desequilibrio para las fases cristalina con el fundido magmático,

producto de un decrecimiento fuerte de la presión ante un ascenso rápido del fundido o incluso un nuevo “input” de magma con una temperatura mayor que sobrecalienta el sistema (Shelley, 2003).

Dentro de las texturas de masa fundamental hay muestras que presentan texturas orientadas y no orientadas. En el flanco SW predominan las texturas orientadas como la pilotaxítica y hialopilitica, en donde va cambiando los microlitos orientados de cristales a vidrio. En el flanco NW se presentan tanto texturas orientadas como no orientadas. Las principales son pilotaxítica e intergranular para las orientadas, en donde predomina los microlitos de cristales orientados. Y la textura intergranular para la no orientada. En este flanco predomina la presencia de cristales como microlitos en lugar de vidrio. Y se presenten estas texturas en las muestras indica que existe una orientación del flujo del magma, y también altas tasas de enfriamiento y nucleación.

## **5.2 Origen de la composición magmática**

### **5.2.1 Modelo de cristalización fraccionada**

Con el fin de modelar la cristalización fraccionada se utilizó un modelo de hojas de cálculo llamado “Calculus\_TerresRares\_Elementstrace”. El cuál se basa en determinar la composición mineral del sólido residual, según el porcentaje de cristalización del líquido magmático. Este modelo se realizó para cada muestra y se dividió según su ubicación geográfica (flanco NW y SW).

Para las muestras del flanco NW, se configuró el modelo como se muestra en la siguiente imagen. La serie que más se les acerca a las muestras TO1A, FI1, TO1B (cono Fisural) es la serie 1, la que corresponde al 1% del sólido residual cristalizado, mientras que para las muestras CC1 (cono Canción y NV18 (cono Fisural) le corresponde la serie 2 con un 10% de sólido cristalizado. La composición mineral para que las curvas se asemejaran lo más posible fue: plagioclasa 50%, anfíbol M 40% y clinopiroxeno 10%.

De manera análoga para el flanco el SW, la serie 1, con un 1% de sólido residual cristalizado, es el que más se acerca a las muestras del cono Caracol y Colli. La

composición mineral de esta curva es la siguiente: plagioclasa 30%, anfíbol M 15%, olivino 20% y ortopiroxeno 35%.

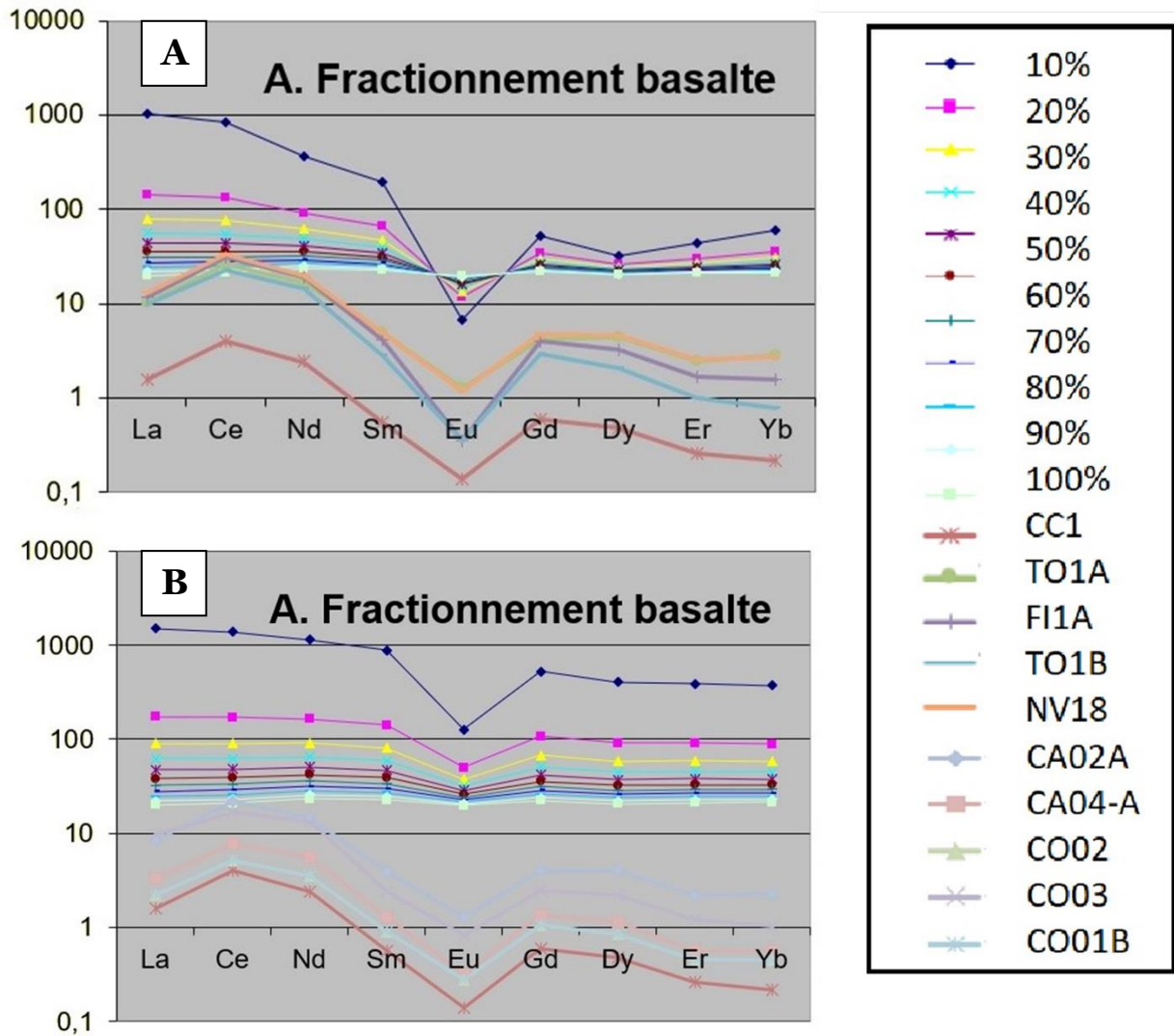


Figura 21 Modelo de cristalización fraccionada para basaltos de tipo Rayleigh (P. Robidoux, comm. pers). (A) Muestras del flanco NW. (B) Muestras del flanco SW

Por otro lado, observando el diagrama de Zr vs Nb en la siguiente figura, específicamente la línea continua que pertenece a un posible modelo de cristalización parcial de tipo Rayleigh, la muestra CC1 se escapa de la línea de tendencia, pero tiene una concentración de Zr y Nb similar a las muestras que sí siguen esta tendencia (CO03, CO01B y FI1A). Esto significa que a pesar de que los magmas de los conos Fisural, Colli y

Canción son cogenéticos, pero este último no pertenecería al mismo modelo de cristalización.

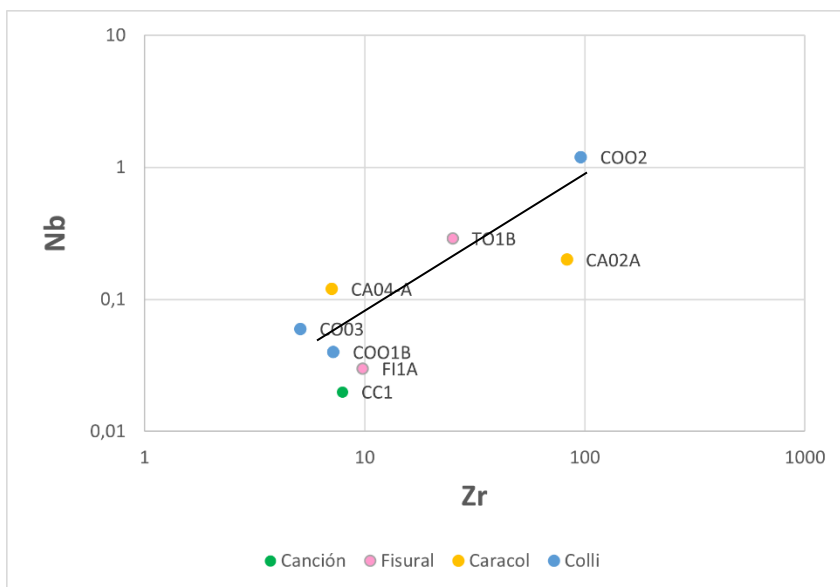


Figura 22 Diagrama de variación Zr versus Nb para las muestras de los conos adventicios del Tolhuaca.

Para complementar el modelo de cristalización fraccionada, se utilizó los diagramas binarios de elementos mayores respecto al MgO en la Figura 23 y una curva modelada en COMAGMAT 3.72 (realizada por Parra, 2020) en base a un magma primitivo extraído de PRIMACALC2 (Kimura y Ariskin, 2014), las condiciones de entrada para este modelo fue un contenido de agua de 3.3%, presiones entre 6-10 kbar y un buffer de oxígeno de QFM (Myers y Eugster, 1983) que se recomienda para magmas generados en zona de subducción (e.g. Kelley y Cottrell, 2009).

En estos diagramas de elementos mayores, se puede observar que las muestras de los conos adventicios del Tolhuaca, principalmente los conos del flanco NW, tienden a ajustarse a los modelos en elementos corticales, como muestra la Figura 23 A y B. Mientras que los elementos como el Ca, Ti y Al, que son de mayor afinidad con el manto se desvían de la tendencia (Figura 23 C, D y E). De acuerdo con este rasgo, queda en evidencia que la formación del magma de los conos, no se explica solo por cristalización fraccionada, sino que también por otro proceso, según lo que indica Mena (2015).

Por otro lado, en los diagramas de la Figura 23 se observa que ninguna muestra se destaca por tener las concentraciones más primitivas con respecto al MgO. Lo que podría indicar que no existe algún pulso magmático diferenciado, sino que todos los conos tendría el mismo origen magmático y que a lo largo del tiempo este se diferenció.



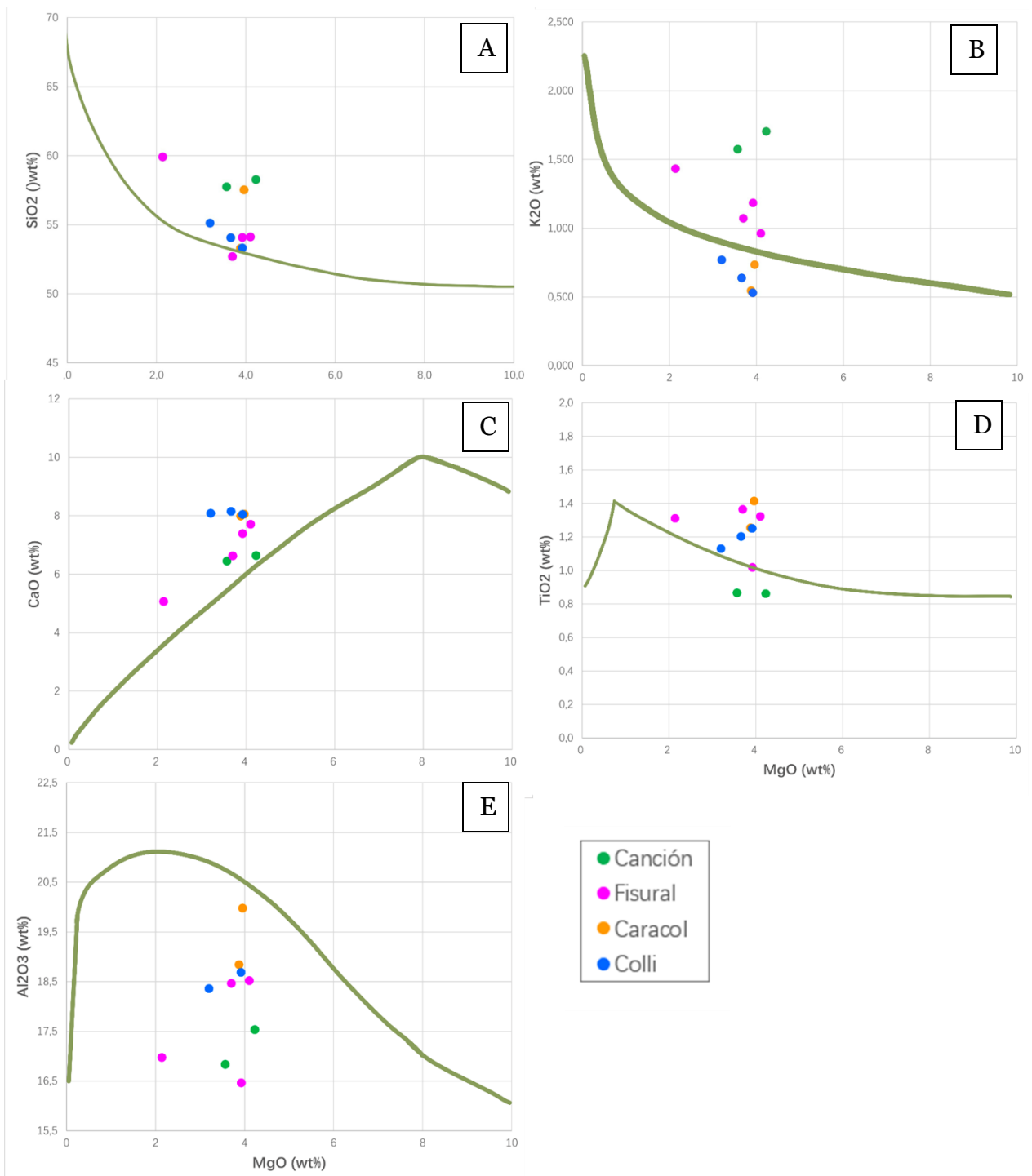


Figura 23 Diagrama de variación de elementos mayores para las muestras de los conos del flanco NW y SW. La línea continua corresponde al modelos de cristalización fraccionada extraídos de COMAGMAT 3.72 (Ariskin et al., 1993; Ariskin y Barmina, 2004)

Los puntos de inflexión de los modelos de cristalización fraccionada, demuestra el fraccionamiento de las fases minerales que están presentes en las rocas de cada cono

adventicio. El diagrama A de la Figura 23 ( $\text{SiO}_2$  vs  $\text{MgO}$ ) muestra un signo de fraccionamiento del olivino, principalmente en las muestras del cono Fisural. En el diagrama de  $\text{CaO}$ , se evidencia el fraccionamiento del clinopiroxeno (en el flanco NW principalmente), ya que este mineral incorpora  $\text{CaO}$  en su fórmula química, este diagrama también podría presentar el fraccionamiento de plagioclasa. Por último, el punto de inflexión en la curva de  $\text{TiO}_2$  vs  $\text{MgO}$ , sugiere la cristalización de fases minerales como óxidos de  $\text{Fe-Ti}$ , que según el diagrama se podría dar para el cono Fisural ya que una de sus muestras es la que más se acerca al punto de inflexión. Por último, cabe destacar, que estas tendencias en el fraccionamiento coinciden en su mayoría con los modelos propuestos de la Figura 21.

### 5.2.2 Asimilación cortical

La asimilación cortical podría ser la responsable de la variabilidad composicional que presentan los conos adventicios del volcán Tolhuaca. De los diagramas de la Figura 23, se podía observar que las muestras del cono Canción es la que menos se ajusta al modelo de elementos corticales (Diagrama A y B de la Figura 23). Por otro lado, según estudios de Borg et al. (1997), se ha determinado que la diversidad de magmas primitivos en el Lassen Volcanic Center en California, se daría por la variabilidad de composición y cantidad de fluidos provenientes del slab en la fuente mantélica. También en estudios de McGee et al. (2017) se llegó a esa misma conclusión, pero de acuerdo con la variabilidad química de centros eruptivos menores San Jorge (ubicados en las cercanías del volcán Villarrica, Chile) con respecto a otros CEM de la zona ya que esta diferencia, la ocasionaría la adición de fluidos. Para completar esta teoría, de utilizar la adición de fluidos como una variable a ser estudiada, se realizó en la Figura 24 un diagrama que muestra la variación de las razones de  $\text{Sr/Th}$  y  $\text{Th/Ce}$ . Para los conos del flanco SW (Caracol y Colli) se observa una mayor adición de fluidas, ya que tienen altas razones de  $\text{Sr/Th}$ . Y para el caso de los conos del flanco NW, que presentan altas razones de  $\text{Th/Ce}$  se observa que puede presentar una mayor asimilación cortical que el resto de los conos.

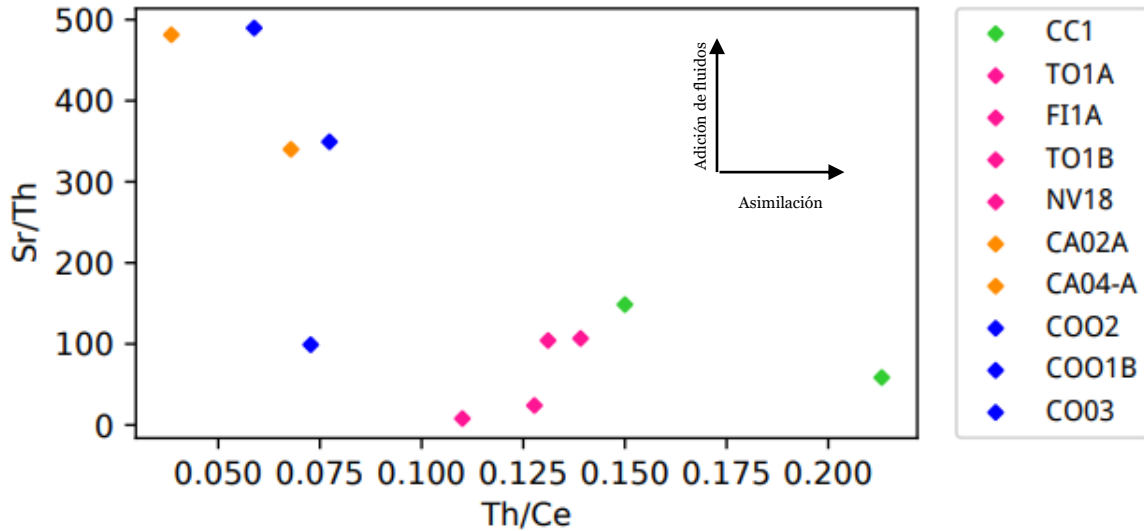


Figura 24 Diagrama de razones de Sr/Th y Th/Ce para las muestras de los conos adventicios del flanco NW y SW.

### 5.3 Modelo petrogenético

Recapitulando toda la información en los puntos anteriores, en base a la petrografía y la geoquímica de los conos adventicios del volcán Tolhuaca, se demuestra que que estos conos fueron intervenidos por variados procesos en su origen y ascenso magmático. La generación de los magmas estaría dada por una distinta influencia de los fluidos provenientes del slab a su respectiva fuente mantélica. Esta adición de fluidos es mayor para los conos del flanco SW y menor para los conos del flanco NW, generando fusión parcial. Esto permitiría la formación de magmas de diferentes composiciones, el cuál se asentaría en reservorios magmáticos diferentes, sino estos magmas se hubieran homogenizado entre sí. La profundidad de estos reservorios corresponde a la profundidad de la corteza continental, de aproximadamente 33 km (Mella, 2008), donde cristalizarían los fenocristales a una alta tasa de crecimiento y baja nucleación (principalmente en el flanco NW). El ascenso del magma estaría controlado y facilitado por fisuras de la corteza debido al SFLO y SFLV, lo que sumado a eventuales recargas lograría cambiar las condiciones termodinámicas y químicas como lo es la presión y temperatura, este desequilibrio formaría este tipo de textura, así como la formación de fenocristales en cúmulos debido a un ahorro energético (Figura 12, Figura 13). El magma seguiría ascendiendo a condiciones más superficiales, donde podría haber tiempos de

residencia magmática cortos (principalmente en los conos del flanco NW) lo que provocaría la asimilación cortical (*Figura 24*). Luego a condiciones más someras, se puede provocar un descenso en la temperatura y presión siendo ideal para la formación de los microlitos y vidrio a bajas tasas de crecimiento y altas de nucleación. Pero en el caso de los conos del flanco NW, prevalece el crecimiento de vesículas lo que pudo provocar, en condiciones más someras, un aumento en la velocidad de ascenso del magma (*Figura 14*, *Figura 13*). Por último, cabe mencionar que las variaciones particulares de cada cono, se pueden explicar por el fraccionamiento de distintas fases minerales (olivino ± clinopiroxeno ± plagioclasa ± ortopiroxeno ± anfíbol ± óxidos de Fe-Ti) para cada cono (*Figura 23 A, B, C y D*).



## **CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES**

A modo de conclusión, se puede decir que los conos adventicios del volcán Tolhuaca, no tienen una gran variabilidad composicional en términos geoquímicos. Ya que esta varía de basalto a basalto-andesita para elementos mayores.

Ahora, en cuanto al origen de la composición magmática se determinó que tienen un origen en común, ya que, de acuerdo con sus niveles de MgO similares entre sí, no existe ningún cono más primitivo que otro. Pero que las variabilidades composicionales que existen ahora entre ellos, se deben a los procesos de cristalización fraccionada y a las diferencias en el aporte de fluidos de la placa subductante. Para los conos del flanco SW se tiene una mayor adición de fluidos que para los conos del flanco NW. La influencia en la asimilación cortical también es importante para describir estas variaciones, en donde, los conos del flanco NW exhibe una tendencia hacia este proceso (visible en las razones de Sr/Th). Que estos procesos se hayan mantenido lo más independiente posible, se debe a un ascenso rápido del magma facilitado por el SFLO y SFLV, lo que impedía la mezcla de estos magmas en una cámara magmática común.

Finalmente se puede concluir que existe una diferencia de primer orden (geográfica) entre los conos adventicios del flanco NW y SW, y que a lo largo de este estudio se pudo identificar el detalle de estas diferencias composicionales proponiendo un modelo petrogenético que lo explicara adecuadamente.

## **BIBLIOGRAFÍA**

Alvear, B., Morata, D., Reich, M., Moncada, D., Arancibia, G., & Leisen, M. (2015). Estudio Textural Mediante SEM-CL en Minerales de Alteración en el Sistema Geotermal Tolhuaca, IX Región de la Araucanía, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile.

Arias Vásquez, D. I. (2020). Análisis de peligro volcánico por caída de tefra en los volcanes Callaqui, Tolhuaca, Lonquimay, Llaima, Villarrica y Mocho-Choshuenco, Chile. *Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Concepción, Chile.*

Ariskin, A. A., Barmina, G. S. 2004. *COMAGMAT: Development of a magma crystallization model and its petrological applications. Geochemistry Int. 42, s1-s1 57.*

Ariskin, A. A., Frenkel, M. Y., Barmina, G. S., Nielsen, R. L. 1993. *COMAGMAT: a Fortran program to model magma differentiation processes. Computers & Geosciences, 19 (8), 1155–1170.*

Barrientos, S.E., Acevedo-Aránquiz, P.S., 1992. Seismological aspects of the 1988–1989 Lonquimay (Chile) volcanic eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research. Vol. 53, 73–87.*

Borg, L. E., Clyne, M. A., Bullen, T. D. 1997. The variable role of slab-derived fluids in the generation of a suite of primitive calc-alkaline lavas from the southernmost Cascades, California: *Canadian Mineralogist*, v. 35, p. 425–452.

Cembrano, J., Hervé, F., Lavenue, A., 1996. The Liquiñe-Ofqui fault zone: a long-lived intra-arc fault zone in Southern Chile. *Tectonophysics. Vol. 259, 55-66.*

Cembrano, J., Lara, L., 2009. The link between volcanism and tectonics in the southern volcanic zone of the Chilean Andes: A review. *Tectonophysics. Vol. 471, 96–113.*

De Maisonneuve, C. B., Dungan, M. A., Bachmann, O., & Burgisser, A. (2012). Insights into shallow magma storage and crystallization at Volcán Llaima (Andean southern volcanic zone, Chile). *Journal of Volcanology and Geothermal Research, 211, 76-91.*

Folguera, A., Ramos, V., Melnick, D., 2002. Partición de la deformación en la zona del arco volcánico de los Andes neuquinos (36 – 39°) en los últimos 30 millones de años. *Revista geológica de Chile*, Vol. 29, no. 2, pp. 151-165.

Flores, L. (2020). Geología del Volcán Tolhuaca, Informe de Proyecto I. Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

Guzmán-Marín, P., Lira, M. P., Tassara, A., & Urrutia, R. (2015, October). Nuevos antecedentes tectónicos del Sistema de Fallas Liquiñe-Ofqui en la Cuenca de Intra-arco del Lago Maihue (40 16'S 72 W), Andes del Sur, Chile. In *XIV Congreso Geológico Chileno*.

Hervé, F; Thiele, R. 1987. Estado de conocimiento de las megafallas en Chile y su significado tectónico. Universidad de Chile, Comunicaciones. Vol. 38, 67-91.

Hervé, F., 1994. The Southern Andes between 39° and 44°S latitude: the geological signature of a transpressive tectonic regime related to magmatic arc. In: Reutter, K.J., Scheuber, E., Wigger, P.J. (Eds), *Tectonics of the Southern Central Andes*. Springer Verlag. 243-248.

Hickey-Vargas, R., Roa, H. M., Escobar, L. L., & Frey, F. A. (1989). Geochemical variations in Andean basaltic and silicic lavas from the Villarrica-Lanin volcanic chain (39.5 S): an evaluation of source heterogeneity, fractional crystallization and crustal assimilation. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 103(3), 361-386.

Hickey-Vargas, Rosemary, Holbik, Sven, Tormey, Daniel, Frey, Frederick A., Roa, Hugo Moreno, Basaltic rocks from the Andean Southern Volcanic Zone: Insights from the comparison of along-strike and small-scale geochemical variations and their sources, *LITHOS* (2016), doi: 10.1016/j.lithos.2016.04.014

Hilton, D. R., Hammerschmidt, K., Teufel, S., & Friedrichsen, H. (1993). Helium isotope characteristics of Andean geothermal fluids and lavas. *Earth and Planetary Science Letters*, 120(3-4), 265-282.

Kimura, J. I., Ariskin, A. A. 2014. Calculation of water-bearing primary basalt and estimation of source mantle conditions beneath arcs: PRIMACALC2 model for WINDOWS. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 15, 1494–1514.



- Lange, D., Cembrano, J., Rietbrock, A., Haberland, C., Dahm, T., Bataille, K., 2008. First seismic record for intra-arc strike-slip tectonics along the Liquiñe-Ofqui fault zone at the obliquely convergent plate margin of the southern Andes. *Tectonophysics*, Vol. 455, no. 1–4, pp. 14–24.
- Lara, L.E., Lavenu, A., Cembrano, J., and Rodríguez, C., 2006. Structural controls of volcanism in transversal chains: Resheared faults and neotectonics in the Cordón Caulle–Puyehue area (40.5°S), Southern Andes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. Vol. 158, no. 1–2, 70–86.
- Loaiza, C. (2020). Volcán Tolhuaca, trabajo de preparación de soportes petrográficos y separación mineral para volcanes en los Andes Del Sur. Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Lopez-Escobar, L., Frey, F. A., & Vergara, M. (1977). Andesites and high-alumina basalts from the central-south Chile High Andes: geochemical evidence bearing on their petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 63(3), 199–228.
- López-Escobar, L., Cembrano, J., Moreno, H., 1995. Geochemistry and tectonics of the Chilean Southern Andes basaltic quaternary volcanism (37–46°S). *Revista Geológica de Chile*. Vol. 22 (2), 219–234.
- Maitre, R. W. (2004). *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms*. Cambridge University Press, v. -1, no. 70, 93–120.
- McDonough, W. F., & Sun, S. S. (1995). The composition of the Earth. *Chemical geology*, 120(3–4), 223–253.
- McGee, L. E., Brahm, R., Rowe, M. C., Handley, H. K., Morgado, E., Lara, L. E., Valdivia, P. 2017. A geochemical approach to distinguishing competing tectono-magmatic processes preserved in small eruptive centres. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 172(6).
- Melnick, D., Folguera, A., and Ramos, V., 2006. Structural control on arc volcanism: The Cavihue–Copahue complex, Central to Patagonian Andes transition (38°S). *Journal of South American Earth Sciences*. Vol. 22, 66–88.

Melosh, G., Cumming, W., Benoit, D., Wilmarth, M., Colvin, A., Winick, J., Soto, E., Urzúa, L., Powell, T., Peretz, A., 2010. Exploration results and resource conceptual model of the Tolhuaca Geothermal Field, Chile. Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010.

Moreno, H., Naranjo, J., Polanco, E. (2012). Geología del complejo volcánico Lonquimay-Tolhuaca. Carta Geológica de Chile 1:50.000. Servicio Nacional de Geología y Minería, Chile.

Myers, J., and Eugster, H.P. 1983. The system Fe-Si-O: Oxygen buffer calibrations to 1,500K. Contrib. Mineral. Petrol. 82, 75-90.

Polanco, E. 2010. Volcanoestratigrafía, geoquímica y peligro volcánico del Volcán Lonquimay (38°30'S), Andes del Sur (Chile). Tesis de Doctorado. Universidad de Barcelona (inédito): 256 pp. Barcelona.

Radic, J.P., 2010. Las cuencas cenozoicas y su control en el volcanismo de los Complejos Nevados de Chillán y Copahue-Callaqui (Andes del Sur, 36-39°S). Andean Geology, Vol. 37, no. 1, pp. 220–246.

Rosenau, M., Melnick, D., Echtler, H., 2006. Kinematic constraints on intra-arc shear and strain partitioning in the southern Andes between 38°S and 42°S latitude. Tectonics. Vol. 25, TC4013.

Ruth, D. C., Cottrell, E., Cortes, J. A., Kelley, K. A., & Calder, E. S. (2016). From passive degassing to violent strombolian eruption: the case of the 2008 eruption of Llaima volcano, Chile. *Journal of Petrology*, 57(9), 1833-1864.

Sánchez, P., Pérez-Flores, P., Arancibia, G., Cembrano, J., Reich, M., 2013a. Crustal deformation effects on the chemical evolution of geothermal systems: the intra-arc Lliquiñe-Ofqui fault system, Southern Andes. International Geology Review.

Smithsonian Institution Global Volcanism Program. 2020. [https://volcano.si.edu/search\\_volcano.cfm](https://volcano.si.edu/search_volcano.cfm)

Somoza, R., Ghidella, M., 2005. Convergencia en el margen occidental de América del Sur durante el Cenozoico: subducción de las placas de Nazca, Farallón y Aluk. Revista de la Asociación Geológica Argentina, Vol. 60, no. 4, pp. 797-809.

Stimac, J. (2013). Tolhuaca volcano (Southern Chile, 38.3°S): new learnings from Surface mapping and geothermal exploration wells.

Suárez, M.; Emparán, C. 1997. Texto Hoja Curacautín, Regiones de La Araucanía y del Biobío. Servicio Nacional de Geología y Minería.



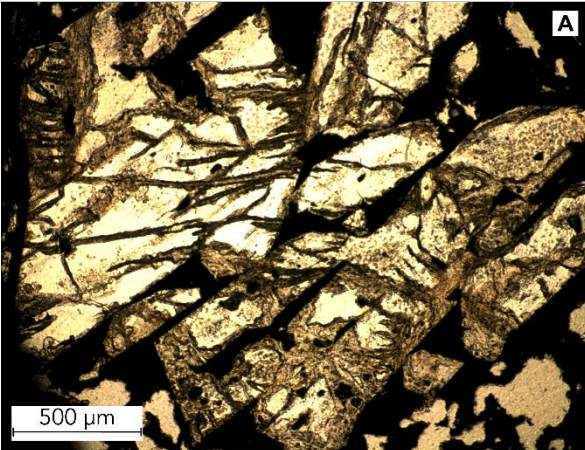
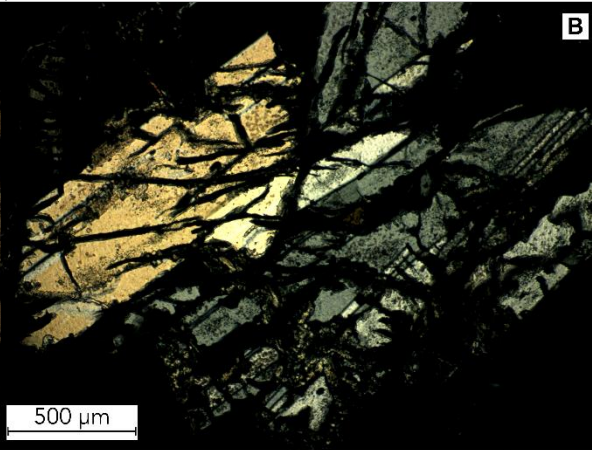
Sun, S.S. and McDonough, W.F. (1989) Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. In: Saunders, A.D., Norry, M.J., Eds., Magmatism in the Ocean Basins, Geological Society, London, Special Publications, 42, 313-345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>

Thiele, R.; Lahsen, A.; Moreno, H.; Varela, J.; Vergara, M. & Munizaga, F. 1987. Estudio geológico regional a escala 1:100.000 de la hoya superior y curso medio del río Biobío. ENDESA (inédito): 304 pp. Santiago.

Wilson, M. (Ed.). (1989). *Igneous petrogenesis*. Dordrecht: Springer Netherlands.

# ANEXOS

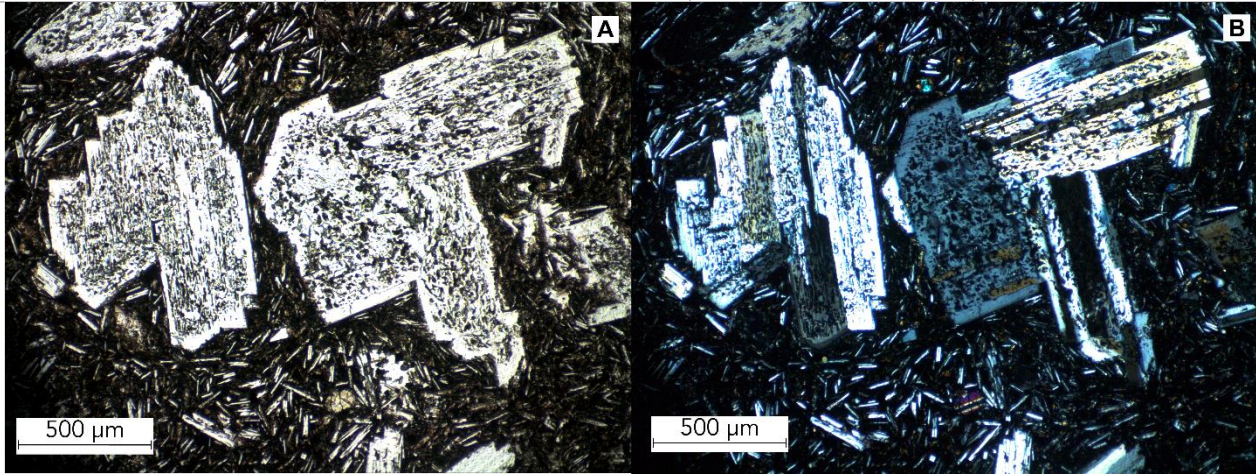
## Anexo A: Descripción petrográfica FLANCO NW

Tipo	Lava	TOLIA	
Textura	Intersectal, cúmulo porfirica, sieve		
			
<b>Fenocristales</b>		15% del total de la roca	
Mineral	Forma	Tamaño (mm)	Contenido (%)
Plagioclasa	Subhedral	2-3	10%
Piroxenos	Subhedral	0.5-1	5%
<b>Masa fundamental</b>		25% del total de la roca	
Mineral	Forma	Tamaño (mm)	Contenido (%)
Plagioclasa	Subhedral-tabular	<0.5	20
piroxeno	Anhedral	<0.3	5
<b>Vesículas</b>		60 al 70 % del total de la roca	
Forma		Tamaño (mm)	
Irregular		Hasta 2	
			
500 µm		500 µm	

Tipo	Lava	<b>NV18</b>	
Textura	Intergranular, porfírica, sieve, coronítica, cúmulo porfírica		

<b>Fenocristales</b>		35% del total de la roca	
Mineral	Forma	Tamaño (mm)	Contenido (%)
Plagioclasas		3	20%
piroxenos		0.5	15%

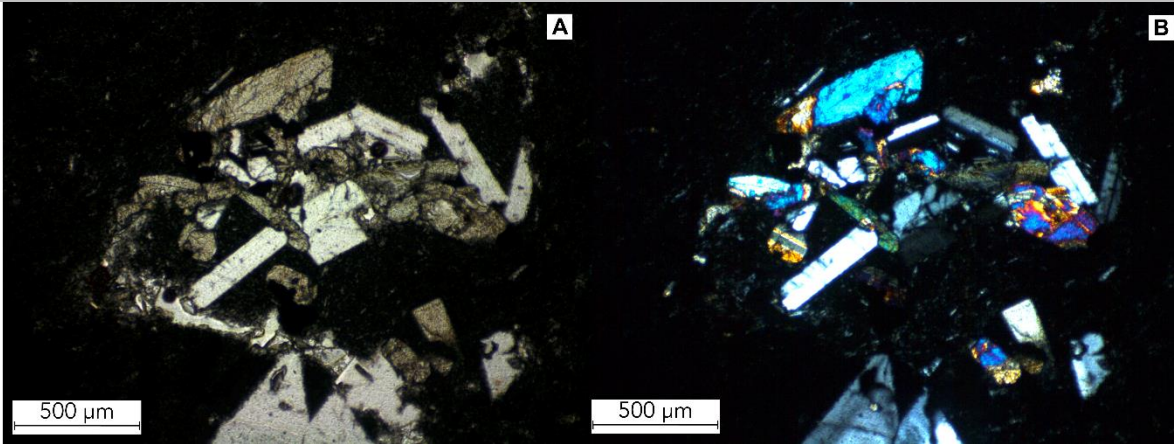
<b>Masa fundamental</b>		65 % del total de la roca	
Mineral	Forma	Tamaño (mm)	Contenido (%)
plagioclasa			



Tipo	Lava	<b>FI1A</b>	
Textura	Intersertal, porfírica, cúmulo porfírica, borde de reacción, zonación		

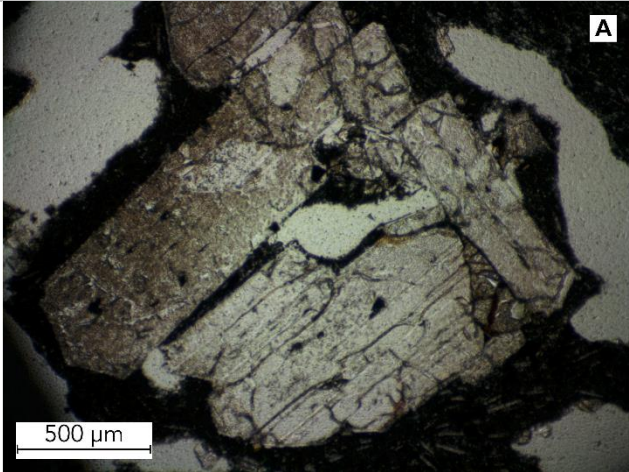
<b>Fenocristales</b>		30 %	
Mineral	Forma	Tamaño (mm)	Contenido (%)
Piroxenos	tabular	Hasta 1 mm	10 %
Plagioclasa	Presenta maclas	Hasta 2 mm	20 %

Masa fundamental		70 %	
Mineral	Forma	Tamaño (mm)	Contenido (%)
Plagioclasa			
Opacos			

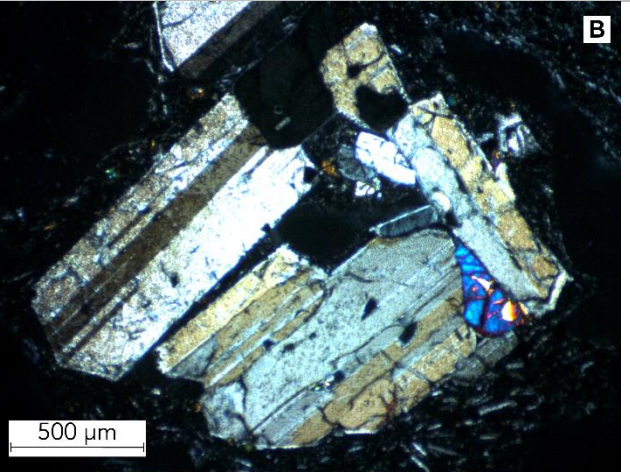


Tipo	Lava	<b>TO1B</b>	
Textura	Vesicular, pilotaxítica, profírica, coronítica, sieve		
Fenocristales		20 %	
Mineral	Forma	Tamaño (mm)	Contenido (%)
Plagioclasa	fracturados	Hasta 3 mm	18 %
Piroxenos		Hasta 1 mm	2 %
Masa fundamental		40 %	
Mineral	Forma	Tamaño (mm)	Contenido (%)
Vesículas		40 %	
Forma		Tamaño (mm)	
Orientadas		Variado, <1mm y hasta 4 mm	

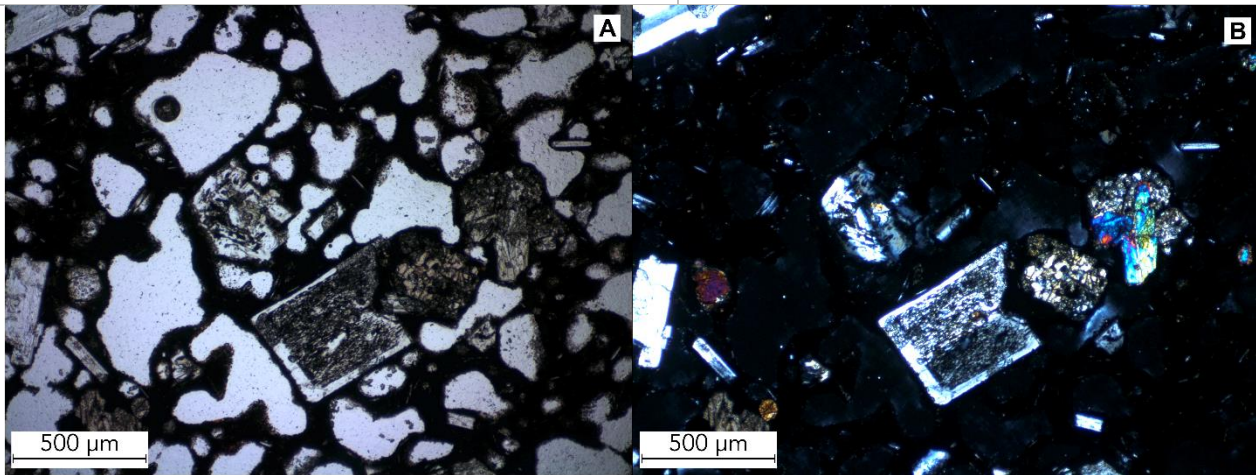


**A**



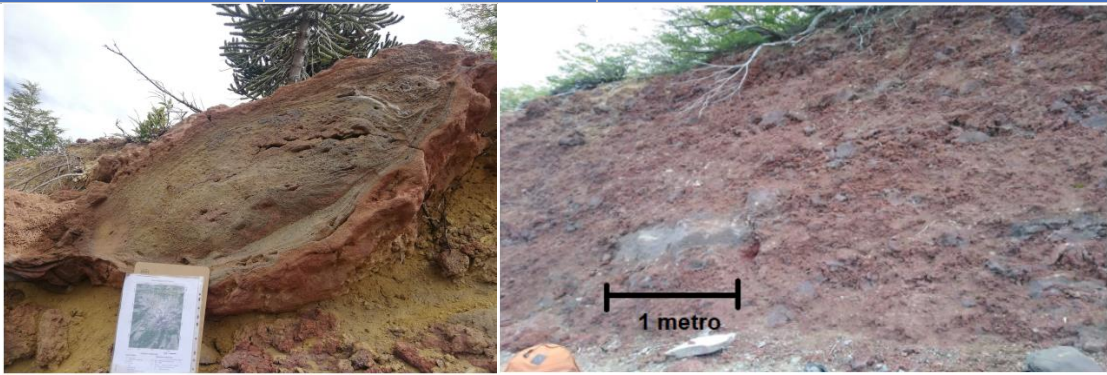
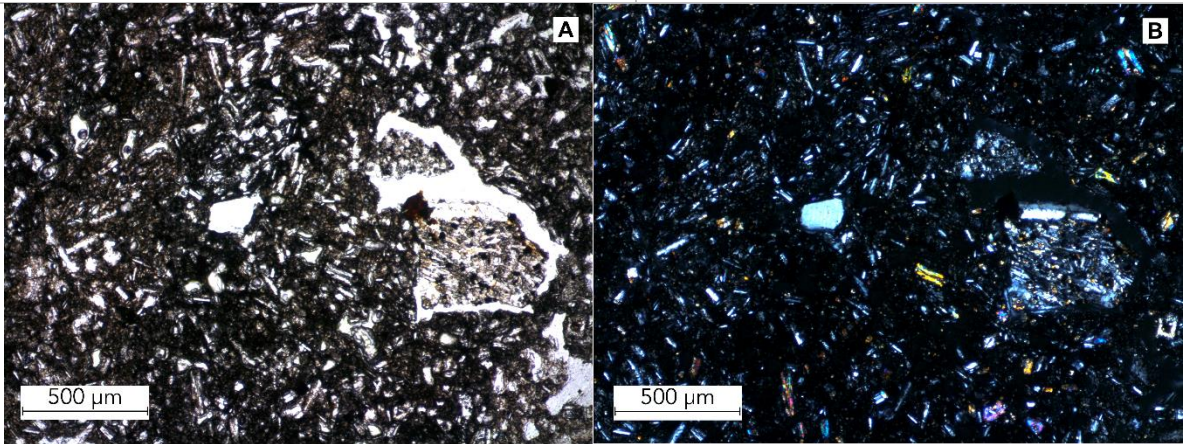
**B**

Tipo	Lava	CC1	
Textura	Vesicular e intersertal		
Fenocristales		(%)	
Mineral	Forma	Tamaño (mm)	Contenido (%)
Plagioclasa	Tabulares y alargadas	Hasta 0.5 mm	
Piroxeno	Subhedral	Hasta 0.5 mm	
Piroxeno	Ehedral	Hasta 5 mm	
Masa fundamental		(%)	
Mineral	Forma	Tamaño (mm)	Contenido (%)
Plagioclasa			
Piroxeno			
Opacos			
Vidrio			
Vesículas		50 %	
Forma		Tamaño (mm)	
		Hasta 2 mm	







## Anexo B: Descripción petrográfica FLANCO SW

Tipo		Bomba		CO01B	
Textura		Vesicular e intersertal, coronítica			
					
<b>Fenocristales</b>				40 %	
Mineral	Forma	Tamaño (mm)	Contenido (%)		
Plagioclasa	Alargadas y tabulares	Hasta 0.5	30%		
Piroxenos	Tabulares y ehudrales	Hasta 0.5	10%		
<b>Masa fundamental</b>				30 %	
Mineral	Forma	Tamaño (mm)	Contenido (%)		
Piroxenos					
Plagioclasa					
Opacos	-				
<b>Vesículas</b>				10 %	
Forma				Tamaño (mm)	
				Hasta 0.5	
					



Tipo		Bomba		<b>CA02A</b>	
Textura		Pilotaxítica a hialopilitica, borde de reacción, coronítica			
					
<b>Fenocristales</b>				20%	
Mineral		Forma		Tamaño (mm)	Contenido (%)
plagioclasa				1.5-3.5	
piroxeno				Hasta 0.5	
<b>Masa fundamental</b>				60%	
Mineral		Forma		Tamaño (mm)	Contenido (%)
Plagioclasa					
vidrio					
<b>Vesículas</b>				20%	
Forma				Tamaño (mm)	
Orientadas					

