



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**PETROLOGÍA Y GEOQUÍMICA DEL VOLCÁN CASABLANCA Y CENTROS  
ERUPTIVOS CERCANOS, COMPLEJO VOLCÁNICO ANTILLANCA, REGIÓN DE  
LOS LAGOS, CHILE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

**CARLOS ANTONIO CARRASCO LIRA**

PROFESOR GUÍA

**LUCY EMMA MCGEE**

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

**LUIS ENRIQUE LARA PULGAR  
DIEGO ANTONIO MORATA CÉSPEDES**

SANTIAGO DE CHILE

2016

## **RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL**

**TÍTULO DE:** Geólogo

**POR:** Carlos Antonio Carrasco Lira

**FECHA:** 13/06/2016

**PROFESOR GUÍA:** Lucy Emma McGee

Los centros eruptivos Volcán Casablanca (que comprende las unidades Casablanca 1, Casablanca 2 y Casablanca 3), Cráter Rayhuén y Cono Tipo (compuesto por una serie de conos monogenéticos agrupados) están ubicados en el Complejo Volcánico Antillanca, en la Zona Volcánica Sur de los Andes. Su compleja evolución comprende etapas glaciares desde el Pleistoceno Medio hasta el Holoceno. Consisten en basaltos y andesitas basálticas, de composición 50-57% SiO<sub>2</sub> en peso y de afinidad calcoalcalina. Predominan las texturas porfírica e intergranular. En general son rocas pobres en fenocristales, aunque el espectro contempla de 10% a 40% de la roca, principalmente olivino y plagioclasa.

A través de un estudio composicional en los fenocristales de plagioclasa se demuestra que las texturas de desequilibrio (presentes en las unidades Casablanca 1, Casablanca 2, Casablanca 3 y Cono Tipo) se originan por recargas de magma máfico asociadas a episodios de descompresión.

Los patrones geoquímicos de elementos traza (diagramas REE, razones incompatibles) sugieren que existe una fuente mantélica única para todas las rocas, sin evidencias de mezcla o contaminación en su origen. El origen más probable es la fusión parcial de una peridotita de espinela.

Un modelo de cristalización fraccionada puede explicar las variaciones desde basaltos a andesitas basálticas en las unidades Casablanca 1, Casablanca 2, Casablanca 3 y Cono Tipo. Las rocas de la unidad Cráter Rayhuén no pueden generarse a partir de este modelo únicamente y requiere mecanismos adicionales de diferenciación para ser explicadas.

Se emplea un geotermobarómetro plagioclasa-fundido que indica que las plagioclasas de las unidades Casablanca 1, Casablanca 2 y Casablanca 3 cristalizan en condiciones similares de temperatura y profundidad (1080-1150 °C, 2 a ~15 km) sugiriendo la existencia un reservorio bajo condiciones estables que ha permitido la construcción de un estratocono y el fraccionamiento de la plagioclasa. A una temperatura y profundidad considerablemente mayor, las plagioclasas de la unidad Cono Tipo cristalizan en condiciones de 1160-1200 °C y entre 15 y 25 km, suponiendo una evolución independiente.

## **Agradecimientos**

Deseo agradecer a Lucy McGee por ser mi profesora guía y apoyarme siempre que lo necesitara con valiosas recomendaciones durante todo el tiempo que duró esta memoria. También a Katy Chamberlain, que junto con Lucy, me brindaron ayuda gracias a su experiencia en el trabajo de terreno.

Al proyecto Fondecyt Iniciación de Investigación #11130296 de L. McGee, así como también a FONDAP #15090013 que financian este trabajo, dando herramientas que de otra manera serían imposibles de conseguir.

Agradezco a los profesores de la comisión Luis Lara, por su ayuda, consejos y material brindado, y Diego Morata, por sus comentarios constructivos que permitieron encauzar esta investigación.

A todos los compañeros de carrera con los que compartí inolvidables terrenos, aprendizajes y risas. A los profesores y auxiliares que tuve, cada uno dejó algo importante en este viaje.

Les doy las gracias a todos mis amigos, por todas las alegrías y momentos compartidos que han hecho de mí alguien mejor. Espero que de ellos también.

Especialmente le doy las gracias a mi familia por estar siempre conmigo. A mi mamá que me siempre confía en mí y a mi papá que se preocupa por mi progreso. Este trabajo va especialmente dedicado a ellos.

## TABLA DE CONTENIDOS

<b>Agradecimientos .....</b>	<b>iii</b>
<b>1 Introducción.....</b>	<b>7</b>
<i>Presentación.....</i>	<i>7</i>
<i>Ubicación.....</i>	<i>8</i>
<i>Objetivos.....</i>	<i>9</i>
Objetivo general .....	9
Objetivos específicos.....	9
<i>Hipótesis de trabajo.....</i>	<i>9</i>
<b>2 Muestreo .....</b>	<b>10</b>
<b>3 Metodología .....</b>	<b>13</b>
<i>Geoquímica .....</i>	<i>13</i>
<i>Microscopía electrónica de barrido .....</i>	<i>13</i>
<i>Análisis por microsonda electrónica.....</i>	<i>13</i>
<i>Geotermobarometría .....</i>	<i>14</i>
<b>4 Marco Geológico .....</b>	<b>15</b>
<i>Generalidades .....</i>	<i>15</i>
<i>Marco Geológico Regional.....</i>	<i>15</i>
<i>Marco Geológico Local.....</i>	<i>16</i>
Volcán Casablanca 1 Plca1 (unidad Casablanca 1) .....	19
Volcán Casablanca 2 Plsca2 (unidad Casablanca 2) .....	19
Cráter Rayhuén Hcr (unidad Cráter Rayhuén).....	20
Volcán Casablanca 3 Hca3 (unidad Casablanca 3).....	20
Conos del cerro Colorado Hco; Hco(p) (unidad Cono Tipo) .....	21
<b>5 Resultados .....</b>	<b>22</b>
<i>Descripción macroscópica .....</i>	<i>22</i>
Casablanca 1.....	22
Casablanca 2.....	22
Casablanca 3.....	22
Cono Tipo .....	22
<i>Descripción con microscopio óptico.....</i>	<i>22</i>
Casablanca 1.....	22
Casablanca 2.....	23
Casablanca 3.....	24
Cono Tipo .....	25
<i>Análisis de texturas .....</i>	<i>26</i>
Casablanca 1.....	26

Casablanca 2.....	29
Casablanca 3.....	31
Cono Tipo.....	34
<i>Geoquímica</i> .....	37
Elementos Mayores.....	37
Elementos Trazas.....	41
<i>Química mineral</i> .....	44
Olivino.....	44
Plagioclasa.....	44
<i>Análisis de zonación de plagioclasa</i> .....	46
Consideraciones con elementos menores.....	47
Comparaciones generales.....	47
Casablanca 1.....	50
Casablanca 2.....	53
Casablanca 3.....	58
Cono Tipo.....	62
<i>Geotermobarometría</i> .....	65
Equilibrio.....	65
Contenido de agua.....	65
Presiones y temperaturas.....	66
<b>5 Discusión.....</b>	<b>69</b>
<i>Similitudes y diferencias en el CVA</i> .....	69
Texturas.....	69
Geoquímica.....	70
Análisis zonaciones en plagioclasa.....	74
Ascenso a través de la corteza.....	76
Origen común de los centros eruptivos.....	77
<i>Modelo evolutivo</i> .....	79
<b>6 Conclusiones.....</b>	<b>82</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>83</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>89</b>
<i>Anexo A Coordenadas</i> .....	89
<i>Anexo B Análisis de roca total</i> .....	90
<i>Anexo C Análisis de olivino</i> .....	98
<i>Anexo D Análisis de plagioclasa</i> .....	100
<i>Anexo E Descripción macroscópica</i> .....	105
Casablanca 1.....	105
Casablanca 2.....	105
Casablanca 3.....	106
Cono Tipo.....	106
<i>Anexo F Descripción con microscopio óptico</i> .....	108

Casablanca 1.....108  
Casablanca 2.....108  
Casablanca 3.....109  
Cono Tipo.....109

# 1 | Introducción

## Presentación

El orógeno andino comprende un sistema norte-sur que posee variaciones longitudinales en la tectónica y volcanismo (Jordan *et al.*, 1983; Kley *et al.*, 1999) que llevan a dividirlo en segmentos de distintas características geológicas: Zona Volcánica Norte, Zona Volcánica Central, Zona Volcánica Sur (ZVS) y Zona Volcánica Austral.

La Zona Volcánica Sur Central (ZVSC) es una división de la ZVS que comprende desde los 37°S hasta los 41,5°S, caracterizada por una corteza delgada (<50km) y productos poco diferenciados (Hickey *et al.*, 1986). En este segmento se encuentra el Sistema de falla de Liquiñe-Ofqui (SFLO) como rasgo tectónico mayor.

El volcanismo activo y la presencia de estructuras de gran escala se relacionan con el potencial geotérmico de una región, lo que genera en la ZVSC un atractivo especial para su exploración. En general, Chile cuenta con un potencial geotérmico importante (Lahsen, 1988; Lund *et al.*, 2005; Lahsen *et al.*, 2010; Bertani, 2012), pero no existe la información geológica suficiente para realizar explotación de recursos geotermales (Sánchez-Alfaro *et al.*, 2015).

El Complejo Volcánico Antillanca (CVA), ubicado en la ZVSC, es una región particularmente poco explorada, sin estudios petrológicos específicos publicados y al mismo tiempo con un potencial geotermal estimado de alta entalpía (Aguilera *et al.*, 2014). Surge entonces la necesidad de realizar un levantamiento geológico que abarque aspectos relevantes en geotermia, como permeabilidad, recarga hídrica y fuente de calor. En particular, la condición de la fuente de calor representa una de las mayores dificultades en la evaluación del recurso geotérmico (Sanyal *et al.*, 2002).

En este trabajo se espera determinar las condiciones previas a la erupción de distintos edificios volcánicos del CVA y con ello caracterizar el reservorio a través de herramientas petrológicas y geoquímicas.

Los centros eruptivos del CVA que comprenden este estudio son el Volcán Casablanca, el Cráter Rayhuén y algunos conos monogenéticos del complejo.

## Ubicación

La zona de estudio está ubicada en la Región de Los Lagos, Chile, unos 70 km al este de Osorno (40,8°S / 72,2°O), cerca de la localidad Entre Lagos, capital de la comuna de Puyehue (Figura 1 a y b).

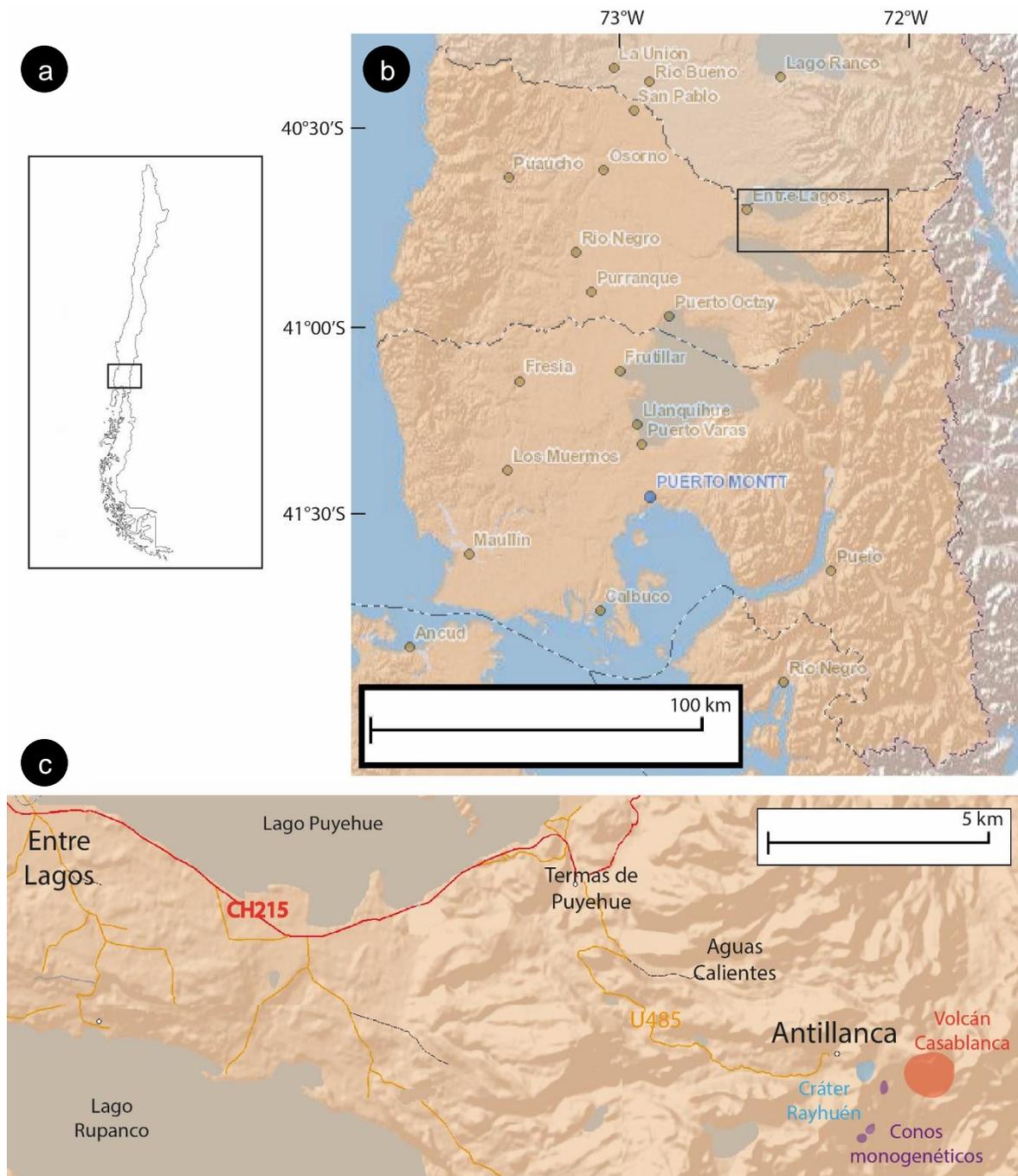


Figura 1: a. Mapa de Chile; en el recuadro la ubicación de la Región de Los Lagos. b. Región de Los Lagos; el recuadro contiene parte de la localidad de Entre Lagos donde se ubica la zona de estudio. c. Ruta desde Entre Lagos al CVA (Antillanca) donde se destacan los centros eruptivos referidos en este estudio.

El acceso a la zona de estudio se realiza desde la localidad Entre Lagos, por el camino que sigue al este hacia las Termas de Puyehue, aquí se toma la ruta al sur en dirección al complejo de esquí Antillanca que pasa primero por las termas de Aguas Calientes (Figura 1 c).

El estudio se concentra específicamente en algunos centros eruptivos de distintas morfologías que conforman el CVA y se encuentran próximos entre sí (Figura 1 c).

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

Determinar las condiciones de la fuente de los centros volcánicos del CVA: Volcán Casablanca, Cráter Rayhuén y conos monogenéticos cercanos y descubrir posibles afinidades o diferencias entre los centros eruptivos.

### **Objetivos específicos**

Analizar petrográficamente las muestras del Volcán Casablanca, Cráter Rayhuén y conos monogenéticos cercanos.

Caracterizar los centros eruptivos en base a sus composiciones químicas.

Determinar condiciones de temperatura y presión previas a la erupción de los centros volcánicos.

Probar la existencia de una génesis común entre el estratovolcán Casablanca y los conos monogenéticos que lo rodean.

### **Hipótesis de trabajo**

La hipótesis de trabajo planteada supone un origen común (o similar) de los productos pertenecientes a los centros eruptivos seleccionados del CVA, basado en su proximidad y similitud en los productos volcánicos.

## 2 Muestreo

La totalidad de las muestras (Tabla 1) corresponde a las distintas coladas de lava del Volcán Casablanca y a algunos de los conos más cercanos al cráter del volcán, y fueron obtenidas durante mayo de 2015. La nomenclatura de las unidades es adaptada de Lara y Moreno (2012).

Las muestras más antiguas Casablanca 1 (unidad Plca1n en Lara y Moreno, 2012) se toman tanto en los afloramientos aledaños al Volcán Casablanca (muestra ANT-10) como en los ubicados más al oeste, por el camino principal, cercanos a las Termas de Puyehue (ANT-26 y ANT-27) (Figura 2). Corresponden a tres muestras de lavas cristalinas que representan un pulso del Pleistoceno Medio del Volcán Casablanca. Coordenadas exactas de todas las muestras en *Anexo A, Coordenadas*.



**Figura 2: Muestreo de Casablanca 1. La colada tiene una geometría laminar con un espesor de al menos 5 m, posee una dureza alta y apariencia general cristalina.**

Más jóvenes en la secuencia estratigráfica, las muestras de la unidad Casablanca 2 (Plsca2) son lavas del Pleistoceno Superior que pertenecen a la etapa interglaciar del Complejo Volcánico Antillanca. Fueron tomadas a 1 km al suroeste del cráter del Volcán Casablanca (ANT-8 y ANT-9).

Representando una etapa de volcanismo postglaciar, las muestras de la unidad Casablanca 3 (Hca3) son lavas holocenas conseguidas en el flanco este del Cráter Rayhuén, tanto hacia el norte, donde se presentan altamente vesiculadas (ANT-1 y ANT-2) (Figura 3), como hacia el sur, en la parte superior de una colada más potente (ANT-6 y ANT-7).



**Figura 3: Lugar de muestreo Casablanca 3. Se observa una colada de lava de geometría tabular de unos pocos metros de espesor, color oscuro y altamente vesiculada.**

Las muestras restantes se obtienen de distintos conos monogenéticos, agrupados en la unidad Cono Tipo. Las muestras ANT-3 y ANT-4 (Figura 4) se recogen de la cima de un cono *spatter* ubicado unos cien metros al este del Cráter Rayhuén y la muestra ANT-5 de la base de este cono. Aproximadamente 1 km más al sur, se toman las muestras de escoria ANT-11, ANT-12 y ANT-15 y una bomba ANT-13, pertenecientes todas a diversos conos piroclásticos de edad holocena, de la unidad Hco(p).



**Figura 4: Uno de los puntos de muestreo de la unidad Cono Tipo. Cono de spatter de unos 10m de altura y 100m de diámetro, alargado hacia el sur; posee vesículas centimétricas y abundantes.**

Las muestras correspondientes al Cráter Rayhuén fueron proporcionadas por Luis Lara (Lara y Moreno, 2012) para su uso en geoquímica.

**Tabla 1: Resumen de muestras.**

Muestra	Unidad		Edad (ka)	Clasificación TAS	Referencia
	Este trabajo	Lara y Moreno, 2012			
ANT-10	Casablanca 1	Plca1n	350-150	Andesit. basáltica	1
ANT-26	Casablanca 1	Plca1n	350-150	Andesit. basáltica	1
ANT-27	Casablanca 1	Plca1n	350-150	Andesit. basáltica	1
ANT-8	Casablanca 2	Plsca2	130-12	Basalto	1
ANT-9	Casablanca 2	Plsca2	130-12	Basalto	1
LL270406-1	Cráter Rayhuén	Hcr	2,9	Basalto	2*
LL140208-1	Cráter Rayhuén	Hcr	2,9	Andesit. basáltica	2*
LL140208-2B	Cráter Rayhuén	Hcr	2,9	Basalto	2*
LL140208-3B	Cráter Rayhuén	Hcr	2,9	Andesit. basáltica	2*
LL140208-3C	Cráter Rayhuén	Hcr	2,9	Andesit. basáltica	2*
LL140208-4A	Cráter Rayhuén	Hcr	2,9	Andesit. basáltica	2*
LL140208-4B	Cráter Rayhuén	Hcr	2,9	Andesit. basáltica	2*
ANT-1	Casablanca 3	Hca3	<2,9	Basalto	1
ANT-2	Casablanca 3	Hca3	<2,9	Basalto	1
ANT-6	Casablanca 3	Hca3	<2,9	Basalto	1
ANT-7	Casablanca 3	Hca3	<2,9	Basalto	1
ANT-3	Cono Tipo	Hco(p)	2,1	Basalto	1
ANT-4	Cono Tipo	Hco(p)	2,1	Andesit. basáltica	1
ANT-5	Cono Tipo	Hco(p)	2,1	Basalto	1
ANT-11	Cono Tipo	Hco(p)	2,1	Andesit. basáltica	1
ANT-12	Cono Tipo	Hco(p)	2,1	Andesit. basáltica	1
ANT-13	Cono Tipo	Hco(p)	2,1	Andesit. basáltica	1
ANT-15	Cono Tipo	Hco(p)	2,1	Andesit. basáltica	1

1: Muestras de este trabajo.

2: Muestras Lara y Moreno, 2012.

Todas las unidades definidas en Lara y Moreno, 2012. Todas las edades en Lara y Moreno, 2012, excepto las indicadas con \*, en Singer et al., 2008.

## 3 Metodología

### Geoquímica

El análisis de roca total se realizó en Actlabs (Canadá) con el método “4Litho – Lithium Metaborate/Tetraborate Fusion – ICP and ICP/MS” (Análisis tipo fusión con plasma inductivo acoplado o Fusion-Inductively coupled plasma, Fus-ICP y Espectrometría de masa y fusión con plasma inductivo acoplado o Fusion Inductively coupled plasma-Mass spectrometry, Fus-MS), que abarca elementos mayores y trazas. Mediciones de control se usan antes y después de cada grupo de muestreo. El instrumento es recalibrado cada 40 medidas. Los principales parámetros del análisis se encuentran en *Anexo B, Análisis de roca total, Tabla 7 y Tabla 8*.

El límite de detección de la mayoría de los óxidos mayoritarios es 0,01% en peso (Al, Ca, Cr, Fe, K, Mg, Na, P, Si) para el resto de los óxidos (Mn, Ti) es 0,001% en peso; el límite de detección de los elementos traza está expresado en ppm y es más variable. El LOI o loss on ignition (pérdida de masa por calcinación) es de 0,01% en peso.

### Microscopía electrónica de barrido

Descripción de muestras de roca con microscopio electrónico de barrido (scanning electron microscope, SEM) FEI Quanta 250, en el Laboratorio de Microscopía del Departamento de Geología de la Universidad de Chile, que permitió realizar microanálisis de dispersión de energía (EDX) para obtener imágenes detalladas de los cristales descritos y realizar análisis composicional semicuantitativo del olivino. Las condiciones de análisis consideran un voltaje de 20 kV y tamaño de haz de 5 (tamaño relativo entre 1 y 10) en alto vacío.

### Análisis por microsonda electrónica

Luego del análisis petrológico, se seleccionaron ciertos cristales para examinarlos con la microsonda electrónica (Electron micro-probe analysis, EMPA) JEOL JXA-8230 en el laboratorio Lamarx, Córdoba (Argentina). Las condiciones de análisis incluyen un voltaje de aceleración de 15 keV y una corriente del haz de 10 nA para los elementos Si, Al, Ca, Na, K, Fe, Mg, Sr, Ba, Ti. El tiempo de análisis es de 20 s para cada elemento. Aparentemente no hay una pérdida de los elementos alcalinos bajo estas condiciones, lo que se comprueba comparando con tiempos menores. El tamaño del haz varía entre 1 y 15  $\mu\text{m}$ , manteniendo el valor mayor si la zona analizada se aprecia homogénea en su composición y morfología. El límite de detección estimado para las condiciones señaladas de voltaje, corriente, tiempo y haz máximo (15  $\mu\text{m}$ ) es de 100 ppm.

## Geotermobarometría

El geotermobarómetro elegido corresponde al publicado en Putirka (2005). Su selección se basa en las numerosas ventajas que posee. En primer lugar, se basa en el equilibrio de plagioclasa con fundido (vidrio); este mineral está presente como fenocristal en todas las muestras disponibles para análisis y el vidrio puede calcularse a partir de la composición de roca total considerando la baja proporción de fenocristales en comparación a la masa fundamental. Permite realizar análisis adicionales, como de variación de elementos trazas en zonaciones más complejas y variadas que otros minerales.

El método de Putirka (2005) incorpora de manera acoplada el cálculo de temperatura (A) y presión (C) con ecuaciones dependientes y errores indicados para ambas variables termodinámicas, a diferencia de otros geotermobarómetros; además está diseñado para soportar la integración con geohigrómetros y otros termómetros o barómetros.

(A)

$$\frac{10^4}{T(\text{K})} = 6.12 + 0.257 \ln \left[ \frac{[\text{An}^{\text{pl}}]}{[\text{Ca}^{\text{liq}} (\text{Al}^{\text{liq}})^2 (\text{Si}^{\text{liq}})^2]} \right] - 3.166[\text{Ca}^{\text{liq}}] + 0.2166[\text{H}_2\text{O}^{\text{liq}}] \\ - 3.137 \left[ \frac{\text{Al}^{\text{liq}}}{\text{Al}^{\text{liq}} + \text{Si}^{\text{liq}}} \right] + 1.216[\text{Ab}^{\text{pl}}]^2 - 2.475 \times 10^{-2} [P(\text{kbar})]$$

(C)

$$P(\text{kbar}) = -42.2 + 4.94 \times 10^{-2} [T(\text{K})] + 1.16 \times 10^{-2} T(\text{K}) \ln \left[ \frac{[\text{Ab}^{\text{pl}} \text{Al}^{\text{liq}} \text{Ca}^{\text{liq}}]}{[\text{An}^{\text{pl}} \text{Na}^{\text{liq}} \text{Si}^{\text{liq}}]} \right] \\ - 382.3[\text{Si}^{\text{liq}}]^2 + 514.2[\text{Si}^{\text{liq}}]^3 - 19.6 \ln[\text{Ab}^{\text{pl}}] - 139.8[\text{Ca}^{\text{liq}}] \\ + 287.2[\text{Na}^{\text{liq}}] + 163.9[\text{K}^{\text{liq}}]$$

Error de estimación estándar (SEE): 23 K y 1,8 kbar.

Los superíndices pl y liq se refieren a plagioclasa y fase líquida respectivamente. La temperatura T está en grados Kelvin y la presión P en kbar. Los componentes de la plagioclasa se calculan a partir de las fracciones catiónicas de la siguiente manera: An = CaO/(CaO+NaO<sub>0,5</sub>+KO<sub>0,5</sub>); Ab = NaO<sub>0,5</sub>/(CaO+NaO<sub>0,5</sub>+KO<sub>0,5</sub>); Or = KO<sub>0,5</sub>/(CaO+NaO<sub>0,5</sub>+KO<sub>0,5</sub>). Términos como Si<sup>liq</sup> se refieren a la fracción catiónica anhidra de SiO<sub>2</sub> en el líquido, y términos como CaAl<sup>liq</sup> se refieren al producto de las fracciones catiónicas de CaO y AlO<sub>1,5</sub> en el líquido.

## 4 Marco Geológico

### Generalidades

Los datos presentados se obtienen de la Carta Geológica de Chile, Geología del Complejo Volcánico Antillanca (Lara y Moreno, 2012), ubicado en la Región de Los Lagos, unos 70 km al este de Osorno (40,8°S / 72,2°O). A partir de esta carta, se define un cuadrante (72°8'-72°12,40'45"-40°48') (Figura 5) que incorpora las unidades a estudiar (Casablanca 1, Casablanca 2, Casablanca 3, Cono Tipo y Cráter Rayhuén) de edad Pleistoceno a Holoceno.

### Marco Geológico Regional

El CVA forma parte de la Zona Volcánica Sur de Los Andes (ZVS), donde el volcanismo se genera a partir de la subducción oblicua de la Placa de Nazca bajo la Placa Sudamericana a una velocidad entre 7 y 9 centímetros al año (Pardo-Casas y Molnar, 1987; Somoza, 1998; DeMets *et al.*, 1994); específicamente pertenece al segmento central de la Zona Volcánica Sur de los Andes del Sur (CZVS), entre los 37 y los 41,5°S (López-Escobar *et al.*, 1995), caracterizado por una corteza continental delgada y abundante volcanismo máfico. El sector norte de la ZVSC también corresponde a un arco amplio de aproximadamente 120 km de ancho con cuencas de intra-arco y volcanes en Chile y Argentina. Sin embargo, al sur de los 39°S, a la latitud de la Zona de Fractura de Valdivia (Herron, 1981), donde subducta litósfera oceánica <18 Ma, el arco se vuelve angosto hasta aproximadamente 80 km de ancho y no presenta cuencas de intra-arco. El frente volcánico en la ZVSC ocurre entre el límite del Valle Central y el borde Oeste de la Cordillera Principal. Por lo tanto, el frente volcánico de la ZVSC se movió hacia el oeste a su posición actual durante el Pleistoceno Tardío (Stern, 1989), o la amplitud de la actividad volcánica aumentó significativamente a lo largo del frente actual durante éste mismo período (Lara *et al.*, 2001). La parte Oriental del arco, ubicada al Este del frente volcánico actual estuvo activa durante el Plioceno y Pleistoceno Temprano (Muñoz y Stern, 1988) y yace sobre rocas volcánicas del Mioceno Tardío.

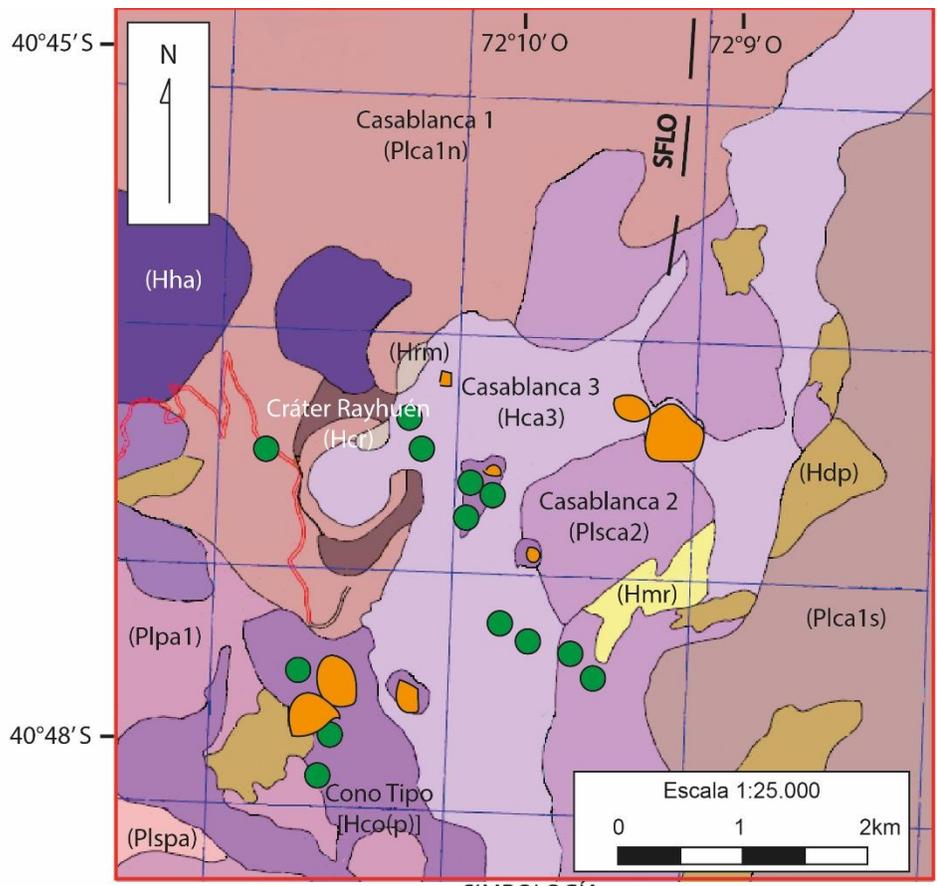
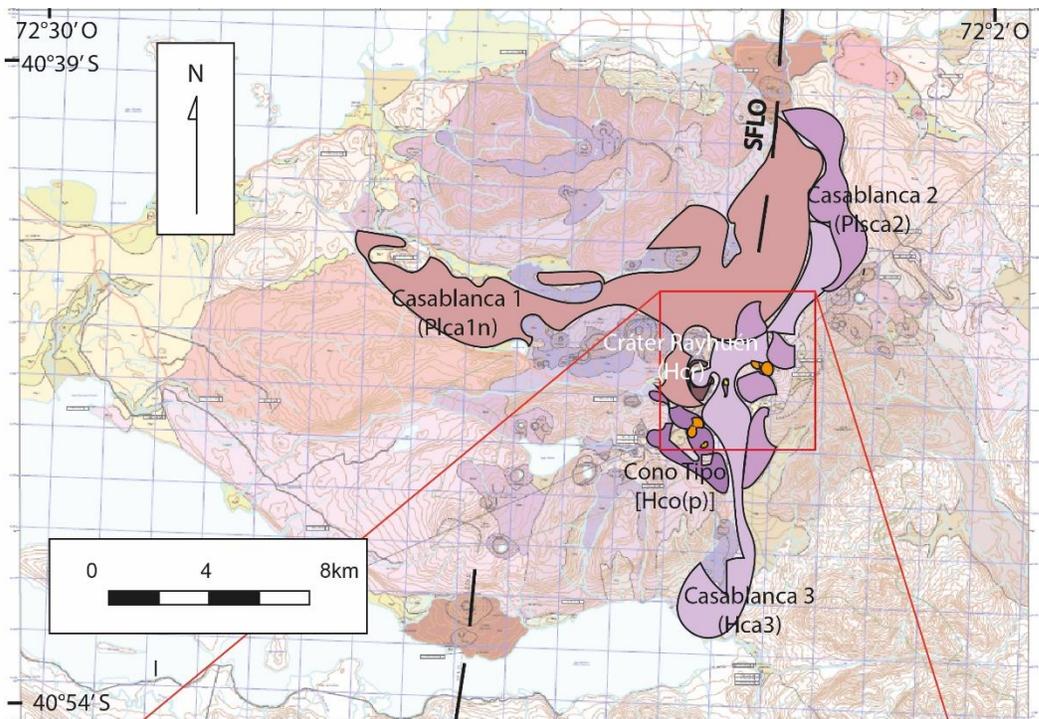
Intersectando en dirección NS se encuentra el Sistema de Fallas Liquiñe-Ofqui (SFLO), un sistema de rumbo dextral con más de 1000 km de largo (Hervé, 1994; Cembrano *et al.*, 1996; 2000b; López-Escobar and Moreno, 1994; Cembrano and Lara, 2009). El volcanismo de la zona podría relacionarse con el SFLO; los centros eruptivos definen un patrón sigmoidal que sugiere una relación genética entre las estructuras del basamento y el ascenso de magmas (Lara y Moreno, 2012).

## Marco Geológico Local

(Adaptado de Lara y Moreno, 2012; referencias en ese trabajo).

El CVA es un complejo volcánico que incluye numerosos centros eruptivos (entre ellos el volcán Casablanca y unos 70 conos piroclásticos, maares y estratoconos) que se organizan en un arreglo de orientación aproximada NE-SW (Figura 5). El CVA está integrado por estructuras volcánicas erosionadas y secuencias volcánicas que en conjunto alcanzan una superficie de unos 700 km<sup>2</sup> y el espesor local de las unidades podría superar los 1000 m generando un volumen actual cercano a los 450 km<sup>3</sup>.

El CVA es un campo volcánico formado por múltiples centros eruptivos cuya actividad se habría iniciado en el Pleistoceno Medio. Durante su evolución, se han desarrollado diferentes aparatos volcánicos tanto monogénicos como poligenéticos, algunos de los cuales han alcanzado la envergadura de estratoconos de tamaño mediano. En los estadios más recientes, la actividad se ha concentrado en los conos piroclásticos menores y el volcán Casablanca. La distribución espacial de estos centros de emisión modernos define una geometría sigmoideal con la mayor parte de los centros organizados en un alineamiento noreste-suroeste, que podría responder a la tectónica cortical como forzante externo. A su vez, las unidades basales constituyen un extenso *plateau* profundamente erosionado durante las últimas glaciaciones del Pleistoceno, sobre el cual se imponen otras estructuras volcánicas también erosionadas y el conjunto de conos piroclásticos y estratoconos modernos.

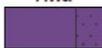
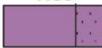
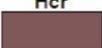


SIMBOLOGÍA

- |                |                       |                            |
|----------------|-----------------------|----------------------------|
| Contacto       | Camino pavimentado    | Cráter / centro de emisión |
| Falla inferida | Camino no pavimentado | Muestra                    |

LEYENDA

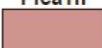
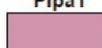
**VOLCANES POSTGLACIALES RECIENTES**

<p>Hha</p> 	<p><b>Conos del Haique</b> (&lt; 1,9 ka)          Conjunto de conos de piroclastos y lavas basálticas asociadas (49-52% SiO<sub>2</sub>), dispuesto en alineamiento de rumbo ENE-WSW.          (p) Conos piroclásticos.</p>
<p>Hco</p> 	<p><b>Conos del Cerro Colorado</b> (ca. 2,1 ka)          Conjunto de conos de piroclastos y lavas basálticas a andesítico-basálticas (51-55% SiO<sub>2</sub>) asociadas, dispuestos en un alineamiento NE-SW.          (p) Conos piroclásticos.</p>
<p>Hca3</p> 	<p><b>Volcán Casablanca 3</b> (&lt; 2,9 ka)          Conjunto de lavas basálticas (48-52% SiO<sub>2</sub>) que forman el segmento superior del edificio actual del volcán Casablanca e incluye coladas que se extienden en los valles situados al norte y sur.</p>
<p>Hcr</p> 	<p><b>Cráter Rayhuén</b> (ca. 2,9 ka)          Conjunto de depósitos piroclásticos de caída y flujo asociados al cráter de explosión que forman un anillo en torno a él. Los fragmentos juveniles son mayoritariamente de composición basáltica (48-52% SiO<sub>2</sub>) a dacítica (63-64% SiO<sub>2</sub>) con excepcionales componentes riolíticos.</p>

**LAVAS Y EDIFICIOS INTRAGLACIALES**

<p>Plspa</p> 	<p><b>Lavas de Lago Paraíso</b> (Pleistoceno Superior ca. 50-38 ka)          Lavas basálticas (52% SiO<sub>2</sub>) que forman una secuencia de escudo.</p>
<p>Plsca2</p> 	<p><b>Volcán Casablanca 2</b> (Pleistoceno Superior)          Conjunto de lavas basálticas (50-52% SiO<sub>2</sub>) y brechas que forman el núcleo principal de edificio actual del volcán Casablanca.</p>

**VOLCANES ANCESTRALES POST 'PLATEAU'**

<p>Plca1s</p> 	<p><b>Volcán Casablanca 1 Sur</b> (Pleistoceno Medio &gt; ca. 193-150 ka)          Lavas basálticas a andesíticas (50-64% SiO<sub>2</sub>) y brechas que forman secuencias asociadas a un estratovolcán ancestral juxtapuesto a otro situado al norte, en cuyo interior se ha construido el edificio actual volcán Casablanca.</p>
<p>Plca1n</p> 	<p><b>Volcán Casablanca 1 Norte</b> (Pleistoceno Medio &gt; ca. 500-230 ka)          Lavas basálticas a andesíticas (50-64% SiO<sub>2</sub>) y brechas que forman secuencias asociadas a un estratovolcán ancestral juxtapuesto a otro situado al sur, en cuyo interior se ha construido el edificio actual volcán Casablanca.</p>
<p>Plpa1</p> 	<p><b>Volcán Paraíso 1</b> (Pleistoceno Medio &lt; ca. 570 ka)          Lavas basálticas a andesíticas (50-56% SiO<sub>2</sub>) y brechas que forman secuencia asociada a volcán ancestral.</p>

**DEPÓSITOS SEDIMENTARIOS Y VOLCANOCLÁSTICOS**

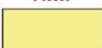
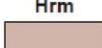
<p>Hmr</p> 	<p><b>Depósitos morrénicos recientes</b> (Holoceno)          Agregados diamícticos gravoarenosos que presentan morfología de cordones laterales y frontales.</p>
<p>Hrm</p> 	<p><b>Depósitos de remoción en masa</b> (Holoceno)          Agregados monomícticos de bloques angulosos, con formas cónicas o lobulares de superficie irregular. Con frecuencia incluyen, aunque escasa, una matriz edáfica.</p>
<p>Hdp</p> 	<p><b>Depósitos piroclásticos</b> (Holoceno)          Conjunto de niveles volcanoclásticos indiferenciados y el material de retrabajo de ellos. Corresponden fundamentalmente a niveles de caída de piroclastos mayoritariamente escoriáceos que localmente alcanzan espesores métricos.</p>

Figura 5: Mapa geológico parcial del Complejo Volcánico Antillanca, adaptado de Lara y Moreno (2012) y detalle en la zona de estudio. Las unidades analizadas están rotuladas con el nombre asignado en Lara y Moreno (2012) entre paréntesis para facilitar su identificación.

## **Volcanes ancestrales post 'plateau'**

Volcanes y secuencias volcánicas constituidas por lavas y brechas volcánicas que forman sucesiones de manto suave y radial en torno de centros emisores erosionados que aún pueden reconocerse como cuellos volcánicos o complejos de diques. Estas unidades presentan intensa erosión glacial y se disponen en un alineamiento noreste-suroeste.

### ***Volcán Paraíso 1 Plpa1***

(Pleistoceno Medio; < ca. 570 ka)

Estratovolcán con erosión glacial, dispuesto en el sector sur del complejo volcánico. Una prominente cima situada al este del lago homónimo, cuya altura alcanza los 1456 m s.n.m, constituiría parte del centro emisor erosionado. Las lavas de esta unidad son de composición basáltica a andesítico-basáltica (50-56% SiO<sub>2</sub>), con fenocristales de olivino y clinopiroxeno. Se obtuvo una edad de 570±20 ka (<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar en masa fundamental).

### ***Volcán Casablanca 1 Plca1 (unidad Casablanca 1)***

(Pleistoceno Medio; >ca. 350-150 ka)

Estratovolcán con erosión glacial, dispuesto en el sector central del complejo volcánico. Una estructura anular en la parte alta de este centro define una depresión que contiene al actual volcán Casablanca. Los productos de esta unidad cubren un amplio espectro composicional (51-64% SiO<sub>2</sub>) aunque los componentes basálticos a andesítico basálticos son predominantes. La secuencia brechosa, localmente afectada por fallas mesoscópicas subverticales de desplazamiento normal, presenta intercalaciones de areniscas tobáceas de grano grueso y algunas lavas hacia su sección media. Se obtuvo una edad de 300±90 ka (<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar en masa fundamental) mientras en un basalto ubicado en el mismo sector, se obtuvo una edad de 350±100 ka por igual método.

## **Lavas y edificios intraglaciales**

Conjunto lavas y centros de emisión con rasgos de erosión glacial pero morfológicamente frescos que se emplazan como relleno de los valles glaciales principales o sobreyacen a los volcanes ancestrales más erosionados. En algunos casos no es posible reconocer el centro de emisión y en otros se observa una estructura parcialmente erosionada es especialmente cubierta por depósitos piroclásticos modernos.

### ***Volcán Casablanca 2 Plsca2 (unidad Casablanca 2)***

(Pleistoceno Superior)

Conjunto de lavas que forman el núcleo del volcán Casablanca, el centro individual más prominente del complejo. Las lavas de esta unidad son fundamentalmente basaltos y andesitas basálticas (50-52% SiO<sub>2</sub>) de olivino y clinopiroxeno con masa generalmente intergranular.

### ***Lavas de Lago Paraíso Plspa***

(Pleistoceno Superior; ca. 80-12 ka)

Conjunto de lavas que forman un pequeño volcán de escudo parcialmente desmantelado en el sector centro-sur del complejo. Las coladas se apoyan sobre lavas del antiguo Volcán Paraíso 1 (Plpa1) y son cubiertas por los conos piroclásticos modernos (Hpa; Hco). Las lavas de esta unidad son fundamentalmente basaltos (52% SiO<sub>2</sub>) de olivino y clinopiroxeno con masa generalmente intergranular. En estas rocas se obtuvo dos edades concordantes de 50±30 ka y 38±26 ka (<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar en masa fundamental).

### **Volcanes postglaciales recientes**

Conjunto de conos piroclásticos y lavas asociadas a los centros de emisión más recientes de complejo. Se trata fundamentalmente de estructuras volcánicas muy bien conservadas, muchas de ellas libres de vegetación estando inmersas en una zona de bosque denso. La mayoría no está cubierta por depósitos piroclásticos indicando que, al menos localmente, representan el último evento eruptivo. Se organizan como clusters independientes cuya actividad no parece necesariamente relacionada.

#### ***Cráter Rayhuén Hcr (unidad Cráter Rayhuén)***

(Holoceno, ca. 2,9 ka)

Centro de emisión situado al oeste del volcán Casablanca, definido por un cráter de explosión de 1,5 km de diámetro máximo y sus depósitos asociados. El cráter está labrado en rocas volcánicas antiguas del volcán Casablanca 1 (Plca1) y los depósitos piroclásticos relacionados forman una secuencia métrica que cubre el borde con mejor expresión en el extremo nororiental. En ese lugar, una columna de hasta 10 m de espesor está integrada por sucesivas capas ricas en bombas basálticas y dacíticas, con lapilli pumíceo en algunas de ellas y abundante material lítico en gran parte de los horizontes (Lara *et al.*, 2007; Escribano, 2010). Las características de los depósitos dispuestos en el borde del cráter sugieren una secuencia eruptiva compleja compuesta por una primera fase magmática seguida por una etapa freatomagmática con generación de oleadas piroclásticas. En la primera etapa, el material juvenil representaría la interacción entre dos componentes extremos. Los basaltos y andesitas basálticas de esta unidad poseen abundantes fenocristales en masa vítrea (hasta 50%). Entre los primeros se encuentra plagioclasa (An<sub>70-90</sub>), clinopiroxeno (augita), anfíbola pargasítica que generalmente incluye microlitos de plagioclasa (An<sub>46-58</sub>), olivino (Fo<sub>71-72</sub>) y opacos (Escribano, 2010). Los depósitos del cráter Rayhuén serían equivalentes a un horizonte de tefra pumícea reconocido fuera del área de estudio, cuya edad se ha establecido en ca. 2,9 ka (Singer *et al.*, 2008).

#### ***Volcán Casablanca 3 Hca3 (unidad Casablanca 3)***

(Holoceno; < ca. 2,9 ka)

Conjunto de lavas emitidas desde el cráter central del volcán Casablanca que configuran la cubierta del edificio moderno. Estas lavas, con marcada estructura cordada y ocasionales túmulos, presentan composición basáltica a andesítico basáltica (48-52%

SiO<sub>2</sub>). Por su relación estratigráfica con los depósitos del cráter Rayhuén (Hcr), estas coladas serían más jóvenes que ca. 2,9 ka.

### **Conos del cerro Colorado Hco; Hco(p) (unidad Cono Tipo)**

(Holoceno; ca. 2,1 ka)

Conjunto de conos piroclásticos con lavas asociadas, dispuestos en el sector central del complejo volcánico y que integran el alineamiento volcánico que definen los Conos Paraíso Este (Hpae). Corresponden a un cono elongado en dirección noreste-suroeste (cerro Colorado) con tres cráteres anidados; dos conos cuyos cráteres se yuxtaponen y un tercer centro situado al sur del alineamiento principal. El cerro Colorado está formado por un aglomerado de 'spatters' soldados de composición basáltica (51% SiO<sub>2</sub>). A su vez, la secuencia de depósitos de caída proximal, muestra mayor variedad composicional con predominio de bombas andesítico basálticas (55% SiO<sub>2</sub>) parcialmente soldadas. La misma unidad contiene pómez amarillas, a veces bandeadas, de composición dacítica (63% SiO<sub>2</sub>) y tamaño lapilli grueso. Este depósito contiene, además, líticos angulosos entre los que predominan tonalitas de anfíbola y en menor proporción brechas polimícticas de matriz con alteración propilítica. Inmerso en el depósito, un fragmento de madera carbonizada fue datado mediante <sup>14</sup>C en 2140±40 aAP.

### **Conos del Haique Hha; Hha(p)**

(Holoceno; < ca. 1,9 ka)

Conjunto de conos piroclásticos y lavas asociadas dispuestos en el sector central del complejo volcánico. Está compuesto por un cono mayor y más joven, anidado, junto a otros centros de menor envergadura que forman en conjunto un alineamiento de rumbo este-noreste. La amplitud de los cráteres, equivalente a la de los mares más conspicuos en la ZVS, sugiere erupciones freatomagmáticas que pudieran estar reflejadas en la sucesión de depósitos distales que contienen abundantes líticos en algunas capas (Lara *et al.*, 2006; Singer *et al.*, 2008). Tanto el cono principal como los menores han emitido también lavas cuya composición es fundamentalmente basáltica (49-52% SiO<sub>2</sub>). Por relación estratigráfica la edad de este grupo sería inferior a ca. 1,9 ka.

## 5 Resultados

### Descripción macroscópica

Las muestras analizadas corresponden a Casablanca 1, Casablanca 2, Casablanca 3 y Cono Tipo, no incluyendo a la unidad Cráter Rayhuén, con el objetivo de dar énfasis en el estudio de las muestras recopiladas para este trabajo. Dadas las similitudes macroscópicas entre las muestras de una misma unidad, se agrupan bajo este criterio en 4 conjuntos. Descripciones detalladas en *Anexo E, descripción macroscópica*.

#### Casablanca 1

Lavas porfíricas con bajo contenido de cristales (20%), correspondientes a plagioclasa y olivino de hasta 4 mm. La plagioclasa presenta zonaciones.

#### Casablanca 2

Lavas porfíricas vesiculadas con muy bajo contenido de cristales (10%). Los fenocristales corresponden a plagioclasa en su mayoría y olivino.

#### Casablanca 3

Lavas porfíricas con bajo contenido de cristales (20%) dominado por plagioclasa (90%) y olivino (10%).

#### Cono Tipo

Lavas porfíricas con fenocristales escasos (10%) y de grano fino (<2 mm), principalmente de plagioclasa.

### Descripción con microscopio óptico

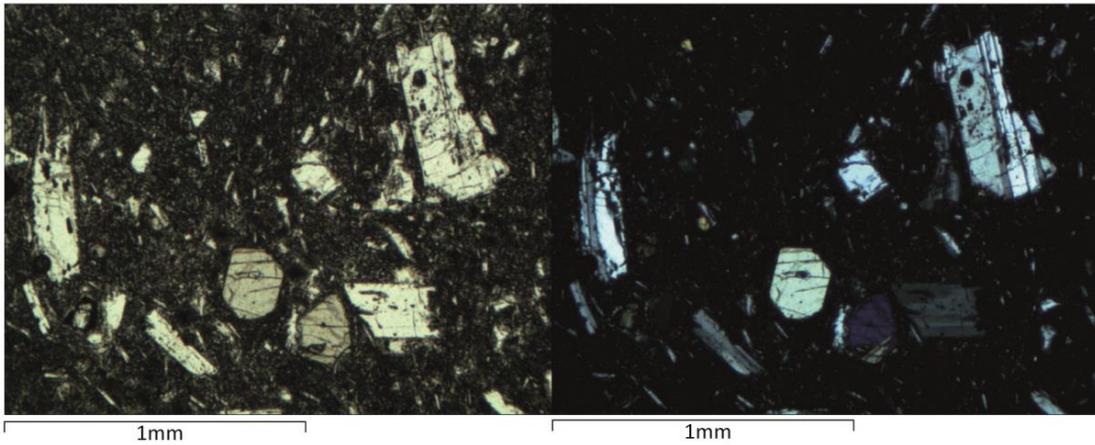
Se describe la petrografía de algunas muestras representativas de las distintas unidades. Las muestras seleccionadas corresponden principalmente a lavas porfíricas, acotadas al rango de basaltos a andesitas basálticas, con fenocristales de plagioclasa y olivino y ausencia de minerales hidratados. Se apunta a determinar los minerales presentes en las rocas, reconocer minerales con zonaciones, y determinar minerales que muestren potencial de análisis geotermobarométrico en base a su asociación o presencia. Descripciones más detalladas en *Anexo F, Descripción con microscopio óptico*.

#### Casablanca 1

Las texturas principales de esta unidad son porfírica e intergranular. Los fenocristales de plagioclasa representan un 90% de total y su tamaño es de hasta 2,5 mm y los de olivino en torno al 10% no superan 1 mm de largo (Figura 6). La masa fundamental se compone de plagioclasa, piroxeno, olivino y óxidos (Figura 14).

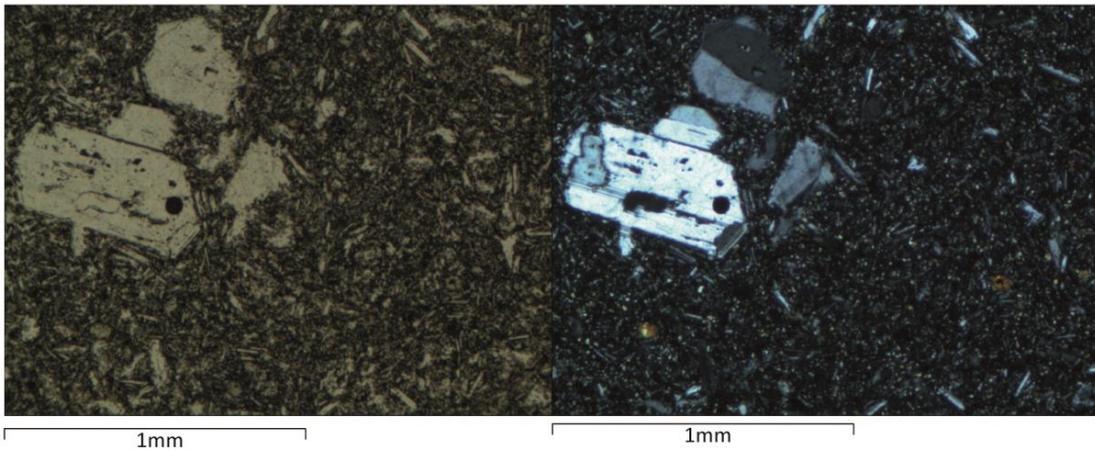
ANT-10

---



ANT-26

---



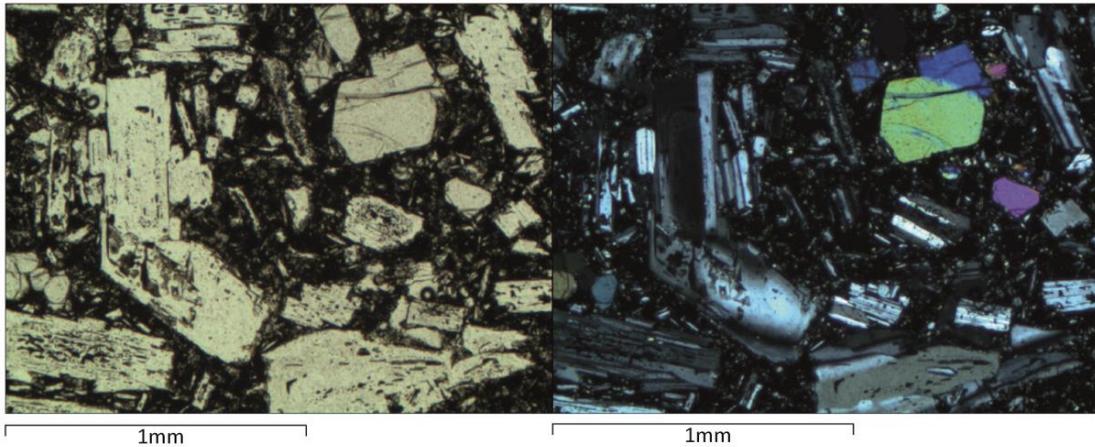
**Figura 6:** Vista general al microscopio de algunas muestras de la unidad Casablanca 1, en nicols paralelos a la izquierda y nicols cruzados a la derecha. Destacan el alto porcentaje de masa fundamental y fenocristales de plagioclasa más abundantes y crecidos que los de olivino.

## **Casablanca 2**

Las texturas principales de esta unidad son porfírica e intergranular. Los fenocristales comprenden en torno a un 30% de la roca. La plagioclasa representa un 80% de total y su tamaño es de hasta 3,5 mm y los de olivino en torno al 20% no superan 2,5 mm de largo (Figura 7). La masa fundamental se compone de plagioclasa, piroxeno, olivino y óxidos (Figura 19).

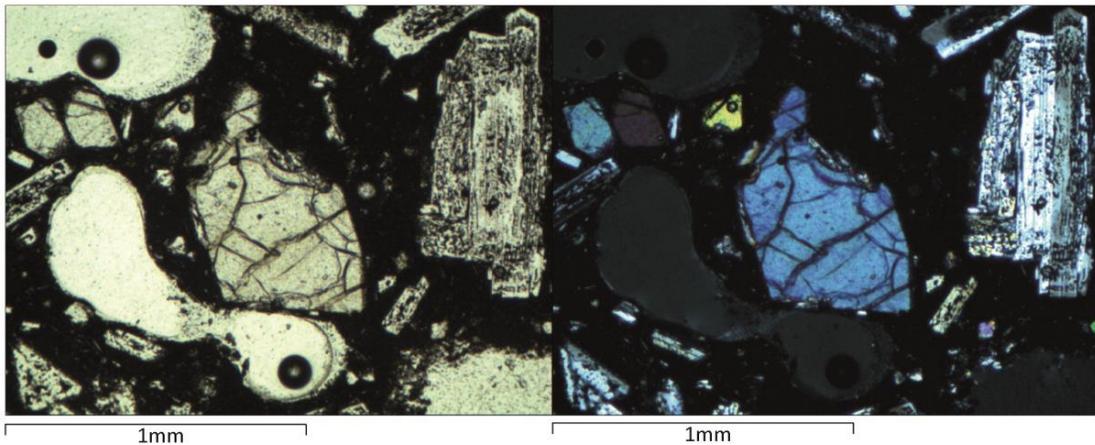
ANT-08

---



ANT-09

---



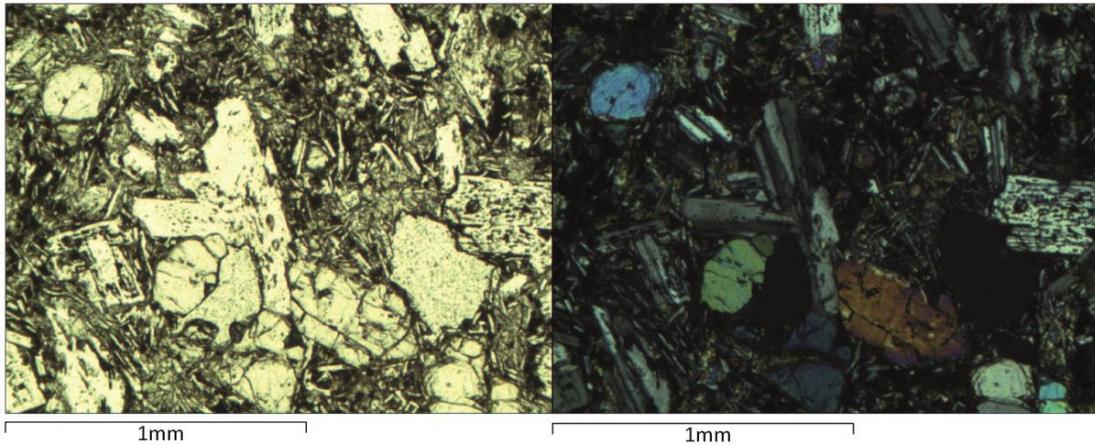
**Figura 7:** Vista general al microscopio de algunas muestras de la unidad Casablanca 2, en nicols paralelos a la izquierda y nicols cruzados a la derecha. Presenta una baja proporción de masa fundamental y fenocristales de olivino y plagioclasa por sobre los 3,5 mm.

### **Casablanca 3**

Las texturas principales de esta unidad son porfírica e intergranular. Los fenocristales comprenden en torno a un 25% de la roca. La plagioclasa representa un 90% de total y su tamaño es de hasta 2,5 mm y los de olivino en torno al 10% no superan 1,5 mm de largo (Figura 8). La masa fundamental se compone de plagioclasa, piroxeno, olivino y óxidos (Figura 25).

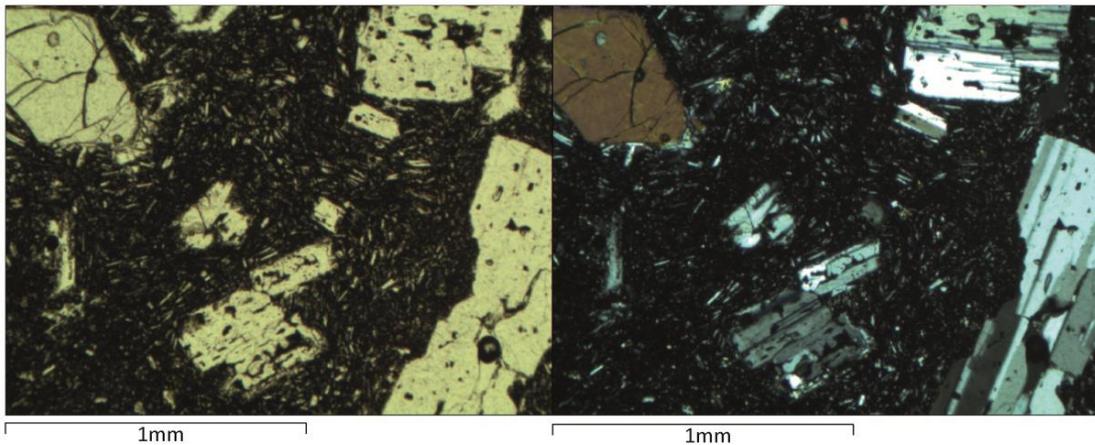
ANT-01

---



ANT-07

---



**Figura 8:** Vista general al microscopio de algunas muestras de la unidad Casablanca 3, en nicols paralelos a la izquierda y nicols cruzados a la derecha. Los fenocristales de olivino y plagioclasa poseen tamaños similares en torno a los 2 mm y la proporción de masa fundamental (70%) es intermedia en comparación al resto de las unidades.

### Cono Tipo

Las texturas principales de esta unidad son porfírica e intergranular. Los fenocristales comprenden en torno a un 35% de la roca. La plagioclasa representa un 70% de total y su tamaño es de hasta 2,5 mm y los de olivino en torno al 30% no superan 3,5 mm de largo (Figura 9). La masa fundamental se compone de plagioclasa, piroxeno, olivino y óxidos (Figura 30).

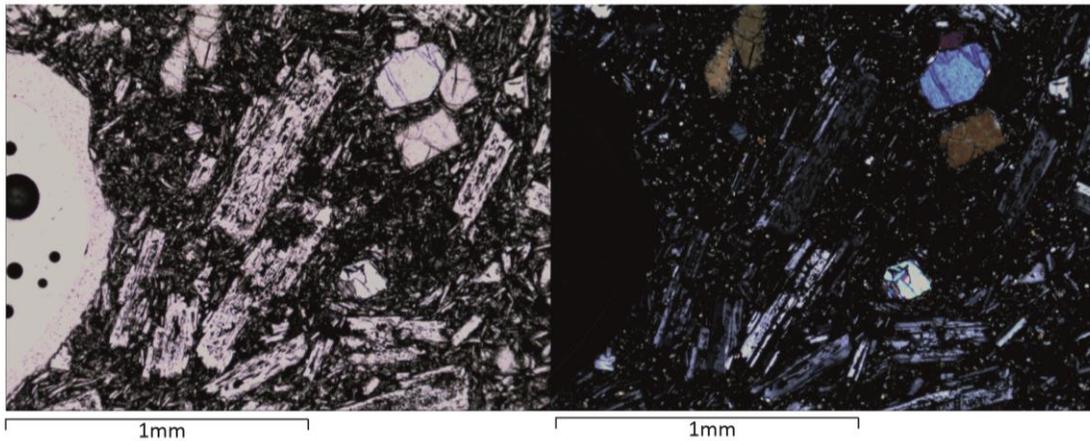


Figura 9: Vista general al microscopio de algunas muestras de la unidad Cono Tipo, en nicols paralelos a la izquierda y nicols cruzados a la derecha. Los fenocristales de olivino son los más grandes y más abundantes en proporción en comparación a todas las unidades.

### Análisis de texturas

Adicionalmente a la descripción petrográfica general de cada unidad, se realiza un apartado a los rasgos morfológicos y relaciones espaciales cristalográficas en un análisis detallado de las numerosas texturas presentes en las rocas del Complejo Volcánico Antillanca.

### Casablanca 1

Fenocristales de olivino y plagioclasa forman parte de aglomerados dando lugar a la textura cumulofírica (Figura 10).

#### Casablanca 1 (Plca1n)

---

Glomeroporfírica

---

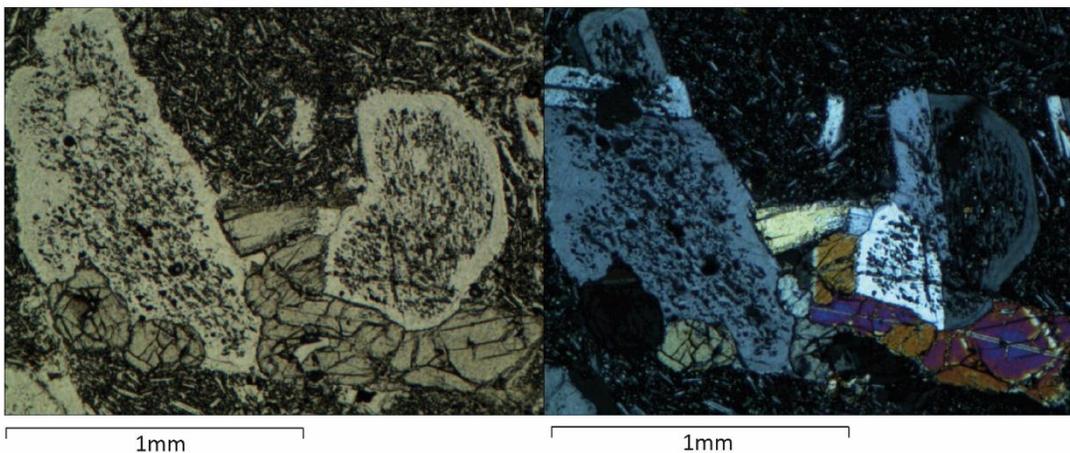


Figura 10: Vista en microscopio óptico (izquierda, nicols paralelos; derecha, nicols cruzados) de un aglomerado en la unidad Casablanca 1 conformado por fenocristales de plagioclasa y olivino.

Se pueden encontrar texturas de reabsorción en el olivino (Figura 11). La mayor parte de los cristales presenta esta textura en los bordes pero también en el centro.

Casablanca 1 (Plca1n)

---

De reabsorción

---

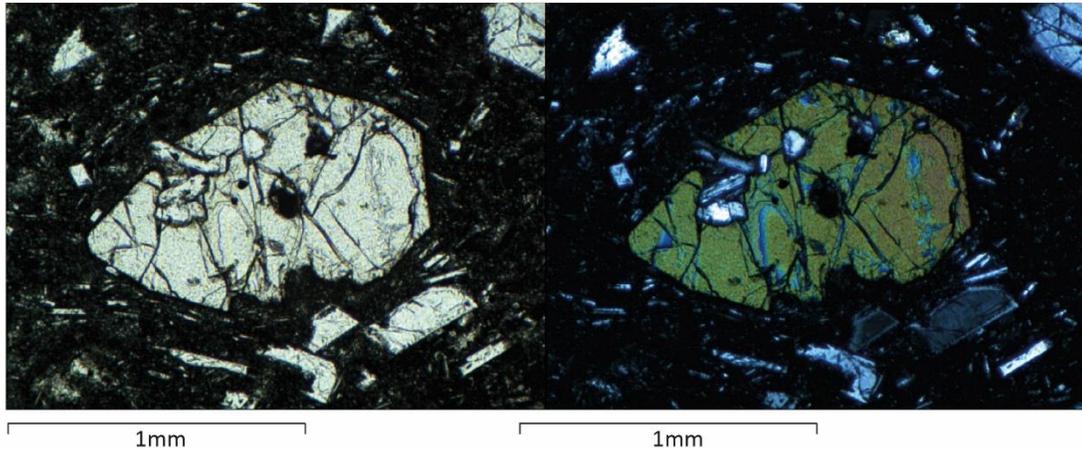


Figura 11: Vista en microscopio óptico (izquierda, nícoles paralelos; derecha, nícoles cruzados) de la textura de reabsorción en la unidad Casablanca 1 en un fenocristal de olivino.

La plagioclasa presenta zonación en que se pueden distinguir etapas de cristalización (Figura 12). El tamaño de los fenocristales zonado en Casablanca 1 no supera los 2 mm.

Casablanca 1 (Plca1n)

---

Zonada

---

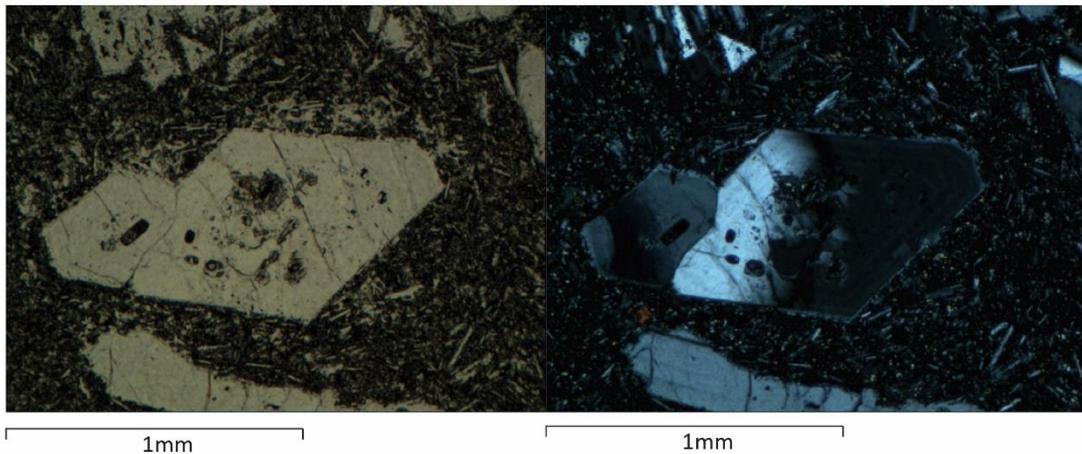


Figura 12: Vista en microscopio óptico (izquierda, nícoles paralelos; derecha, nícoles cruzados) de la textura zonada en la unidad Casablanca 1 en un fenocristal de plagioclasa.

Abundante es la textura en tamiz (Figura 13), también conocida como *sieve* o *patchy zoning*, en la plagioclasa zonada, mayoritariamente en su núcleo. Consiste en cristales de zonación oscilatoria, con núcleos reabsorbidos, rodeados por plagioclasa que

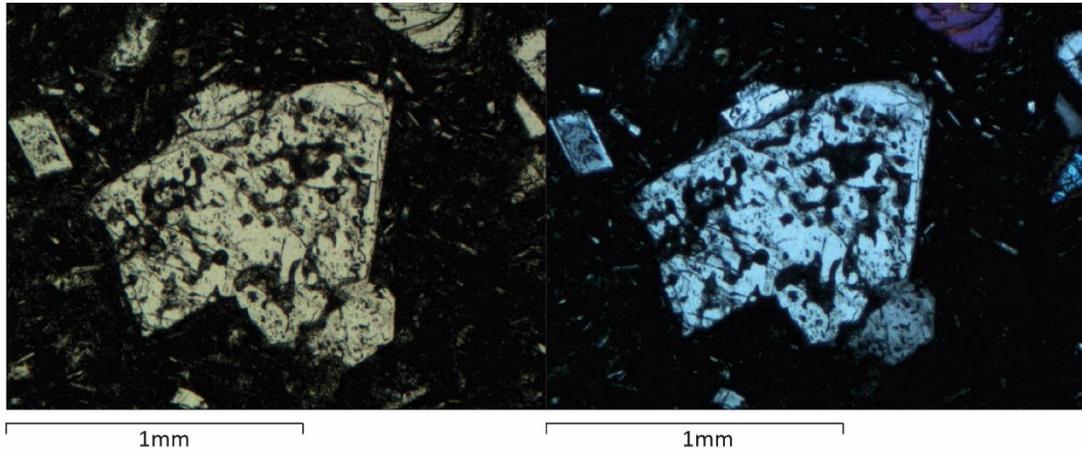
cristaliza posteriormente y que además forma inclusiones en el núcleo que le dan el aspecto de tamiz al cristal.

#### Casablanca 1 (Plca1n)

---

En tamiz

---



**Figura 13:** Vista en microscopio óptico (izquierda, nícoles paralelos; derecha, nícoles cruzados) de la textura en tamiz en la unidad Casablanca 1 en un fenocristal de plagioclasa. Se observa que el borde del cristal no presenta esta textura.

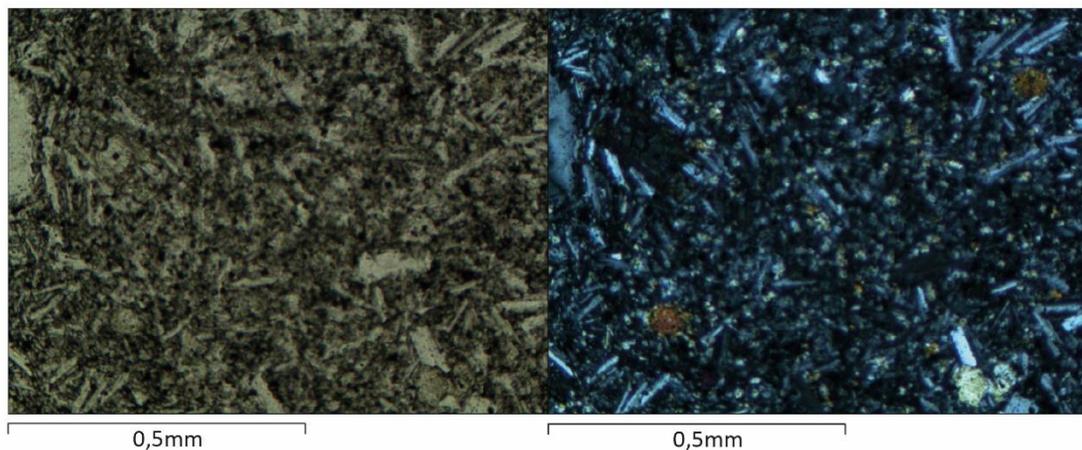
La masa fundamental está dominada por la ocurrencia de textura intergranular en piroxeno entre plagioclasa (Figura 14), con microlitos de plagioclasa subhedrales y orientados aleatoriamente, rodeados por piroxeno anhedral de tamaño similar o menor.

#### Casablanca 1 (Plca1n)

---

Intergranular

---



**Figura 14:** Vista en microscopio óptico (izquierda, nícoles paralelos; derecha, nícoles cruzados) de la textura intergranular en la unidad Casablanca 1. La masa fundamental está compuesta primordialmente por piroxeno y plagioclasa, esta última de tamaño igual o mayor al piroxeno. También incluye óxidos de hierro y olivino en cantidades menores al 5%.

## Casablanca 2

Numerosos fenocristales de olivino y plagioclasa se agrupan en las rocas de esta unidad generando textura cumuloefírica (Figura 15). En general los conjuntos presentan ambos minerales en proporciones similares.

Casablanca 2 (Plsca2)

---

Glomeroporfírica

---

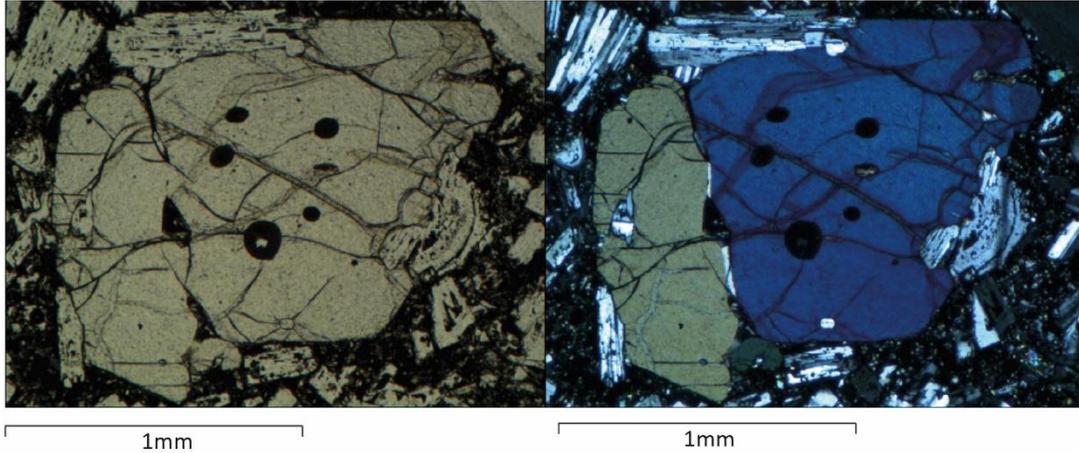


Figura 15: Vista en microscopio óptico (izquierda, nícoles paralelos; derecha, nícoles cruzados) de un aglomerado en la unidad Casablanca 2 conformado por fenocristales de plagioclasa y olivino.

El olivino posee abundante textura de reabsorción (Figura 16), incluso en agrupaciones de cristales. El tamaño de los cristales reabsorbidos es incluso menor al definido como límite para los fenocristales.

Casablanca 2 (Plsca2)

---

De reabsorción

---

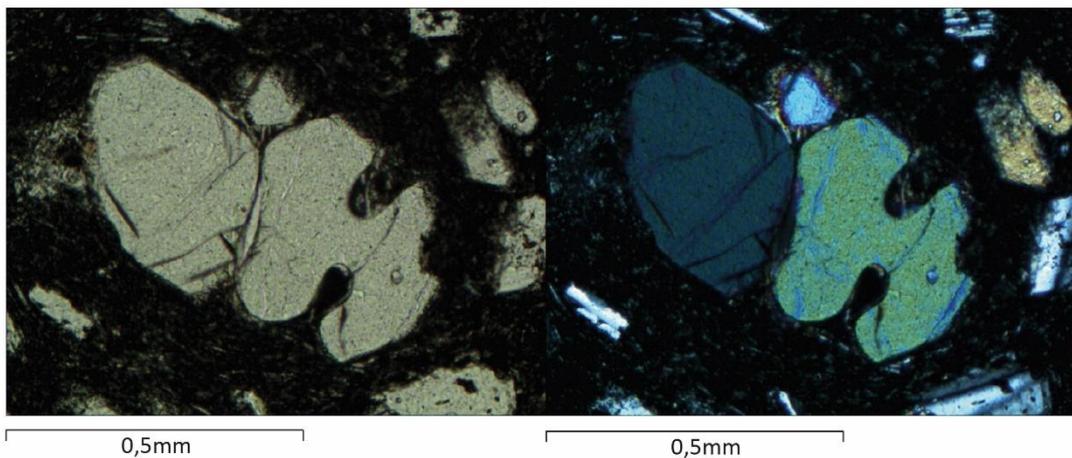


Figura 16: Vista en microscopio óptico (izquierda, nícoles paralelos; derecha, nícoles cruzados) de la textura de reabsorción en la unidad Casablanca 2 en un fenocristal de olivino. Las bahías apuntan al centro del cristal y se ensanchan al acercarse a este, además siempre están presentes en caras que no tienen contacto con otros fenocristales.

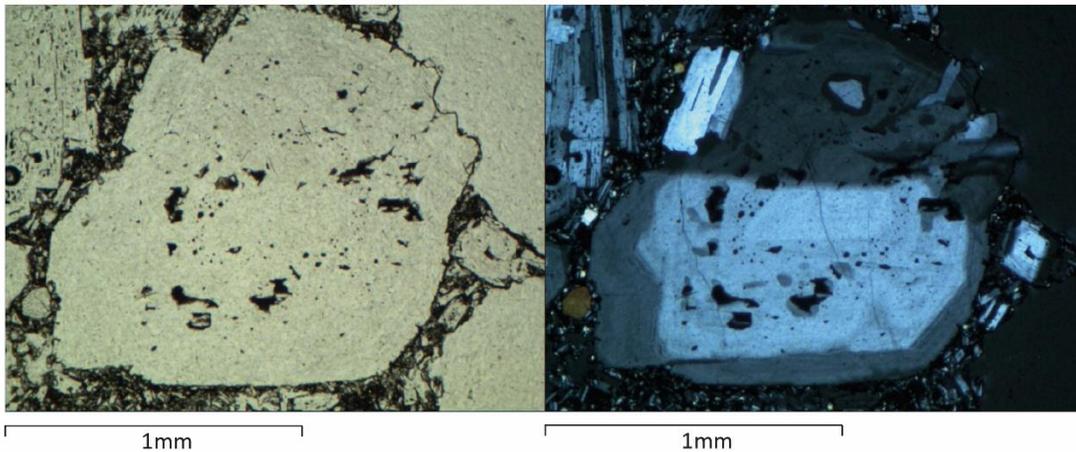
La plagioclasa de esta unidad presenta zonación (Figura 17) en cristales que superan los 2 mm; es la unidad con los fenocristales zonados de mayor tamaño.

#### Casablanca 2 (Plsca2)

---

Zonada

---



**Figura 17:** Vista en microscopio óptico (izquierda, nícoles paralelos; derecha, nícoles cruzados) de la textura zonada en la unidad Casablanca 2 en un fenocristal de plagioclasa en el que se distinguen sectores con distinta extinción, no presentando continuidad cristalográfica.

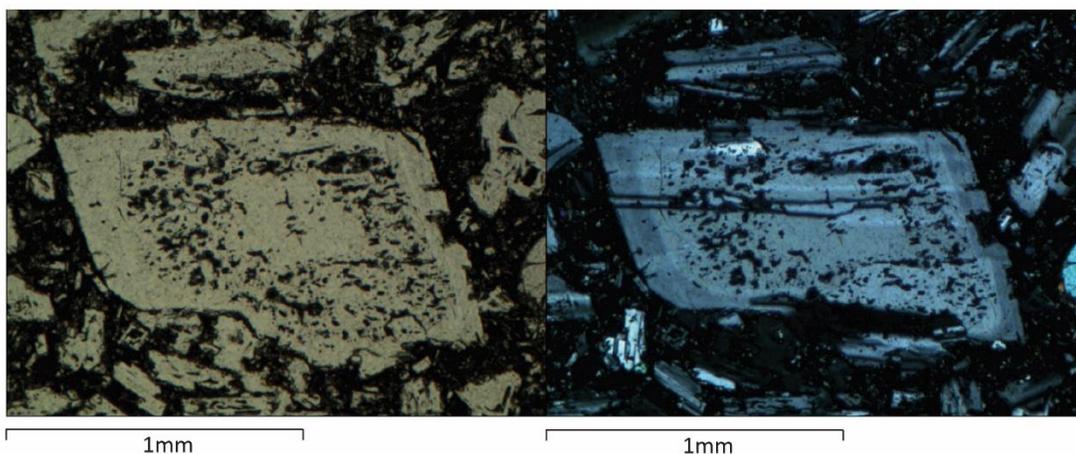
La mayoría de los fenocristales de plagioclasa presentan textura *sieve* (Figura 18), en el su núcleo de la plagioclasa zonada. Consiste en cristales de zonación oscilatoria, con núcleos reabsorbidos, rodeados por plagioclasa que además forma inclusiones en el núcleo que le dan el aspecto de tamiz al cristal.

#### Casablanca 2 (Plsca2)

---

En tamiz

---



**Figura 18:** Vista en microscopio óptico (izquierda, nícoles paralelos; derecha, nícoles cruzados) de la textura en tamiz en la unidad Casablanca 2 en un fenocristal de plagioclasa. Se observa que el borde del cristal no presenta esta textura.

En la masa fundamental la textura predominante es intergranular de piroxeno entre plagioclasa (Figura 19), con microlitos de plagioclasa subhedrales y orientados aleatoriamente, rodeados por piroxeno anhedral de tamaño menor.

#### Casablanca 2 (Plsca2)

---

Intergranular

---

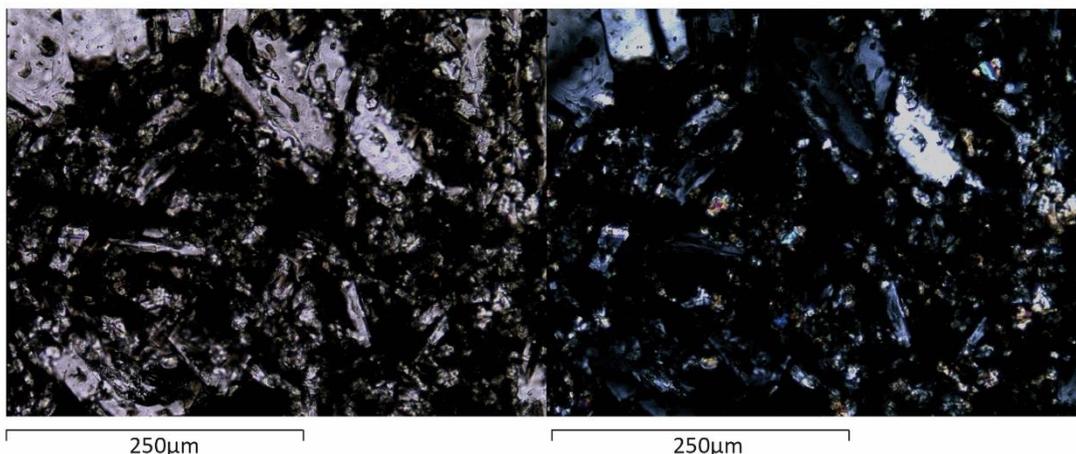


Figura 19: Vista en microscopio óptico (izquierda, nicoles paralelos; derecha, nicoles cruzados) de la textura intergranular en la unidad Casablanca 2. La masa fundamental está compuesta primordialmente por piroxeno y plagioclasa, esta última de tamaño igual o mayor al piroxeno. También incluye óxidos de hierro y olivino en cantidades menores al 5%.

#### Casablanca 3

Fenocristales de olivino y plagioclasa forman parte de aglomerados dando lugar a la textura cumulofírica (Figura 20). En esta unidad predomina la plagioclasa en los cúmulos, acompañado de olivino en una proporción mucho menor.

#### Casablanca 3 (Hca3)

---

Glomeroporfírica

---

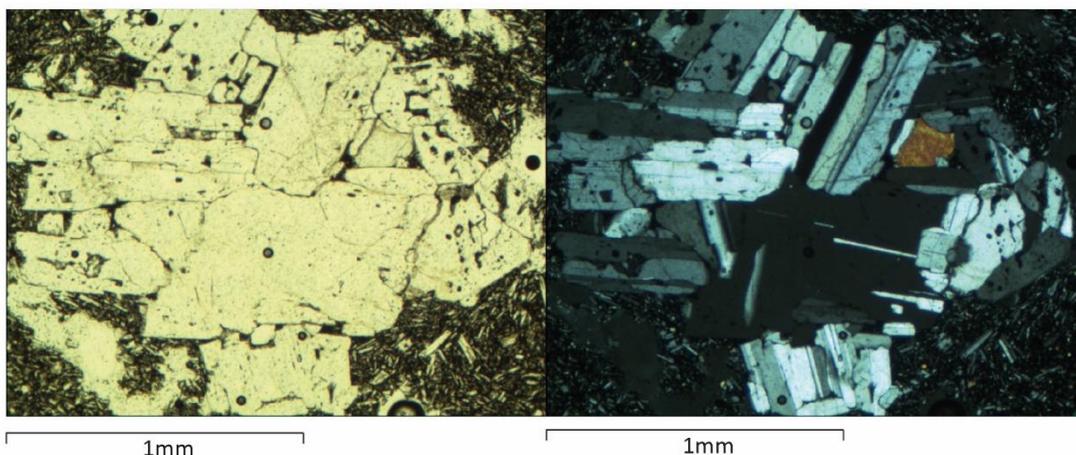


Figura 20: Vista en microscopio óptico (izquierda, nicoles paralelos; derecha, nicoles cruzados) de un aglomerado en la unidad Casablanca 3 conformado por fenocristales de plagioclasa en su mayoría y olivino.

Se pueden encontrar texturas de reabsorción en el olivino (Figura 21) rellenos posteriormete de manera parcial por otros minerales, principalmente plagioclasa.

#### Casablanca 3 (Hca3)

---

##### De reabsorción

---

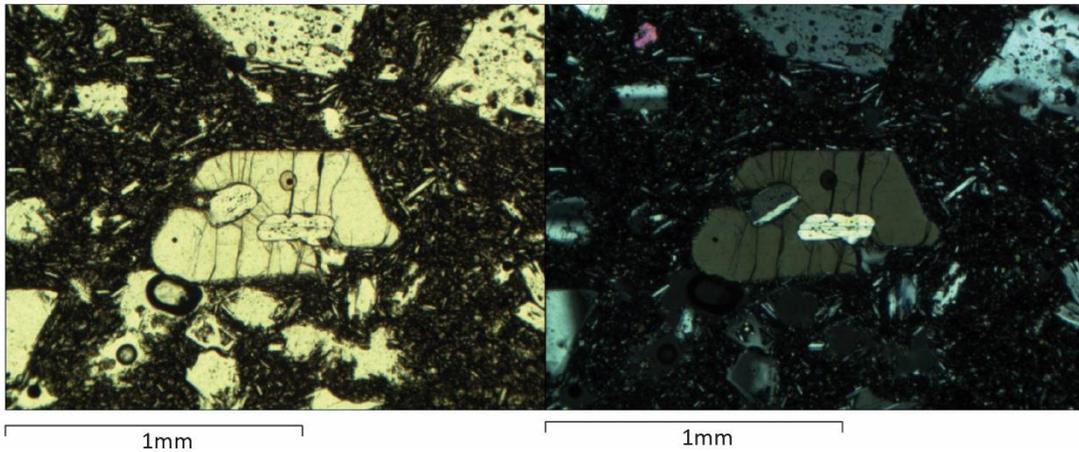


Figura 21: Vista en microscopio óptico (izquierda, nícoles paralelos; derecha, nícoles cruzados) de la textura de reabsorción en la unidad Casablanca 3 en un fenocristal de olivino. Las bahías apuntan al centro del cristal y se ensanchan al acercarse a este, luego fueron rellenas por cristales de tamaño menor, como plagioclasa.

Se observa zonación en algunos cristales de plagioclasa de menor tamaño (Figura 22) en que se pueden distinguir etapas de cristalización.

#### Casablanca 3 (Hca3)

---

##### Zonada

---

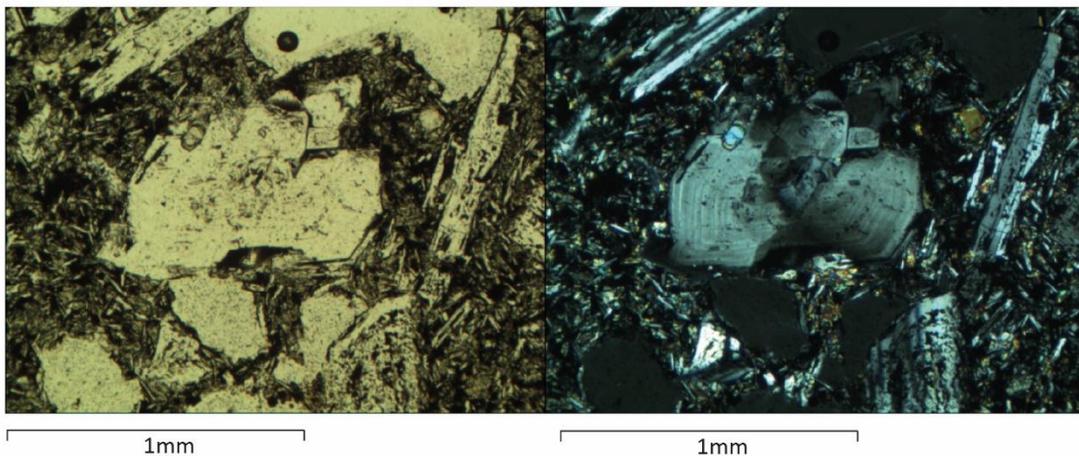


Figura 22: Vista en microscopio óptico (izquierda, nícoles paralelos; derecha, nícoles cruzados) de la textura zonada en la unidad Casablanca 3 en un fenocristal de plagioclasa en el que se distinguen sectores con distinta extinción reflejo de las variaciones composicionales.

Textura en tamiz o *sieve* (Figura 23) se puede encontrar en la plagioclasa zonada, afectando prácticamente la totalidad de cada cristal. La zonación es de tipo oscilatoria,

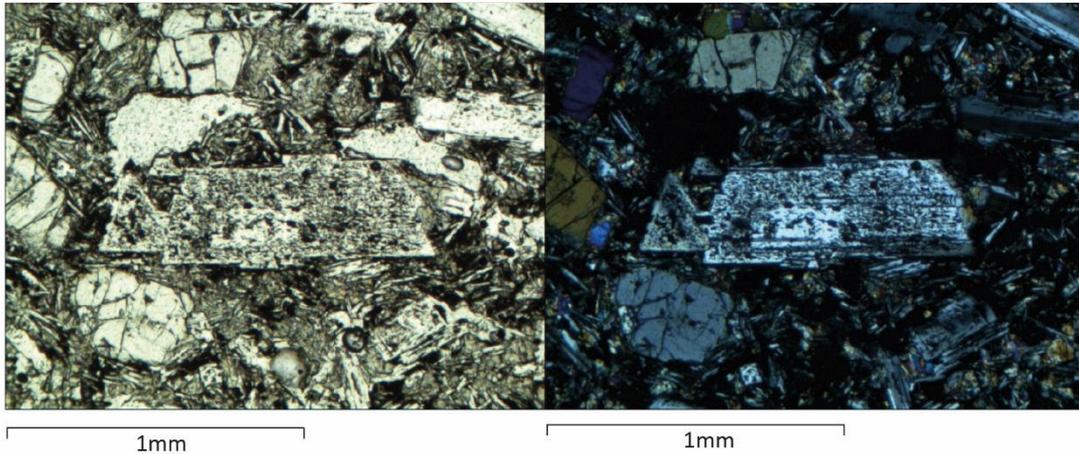
con núcleos reabsorbidos, rodeados por plagioclasa que además forma inclusiones en el núcleo que le dan el aspecto de tamiz al cristal.

#### Casablanca 3 (Hca3)

---

En tamiz

---



**Figura 23:** Vista en microscopio óptico (izquierda, nícoles paralelos; derecha, nícoles cruzados) de la textura en tamiz en la unidad Casablanca 3 en un fenocristal de plagioclasa. Se observa que un borde muy delgado del cristal no presenta esta textura.

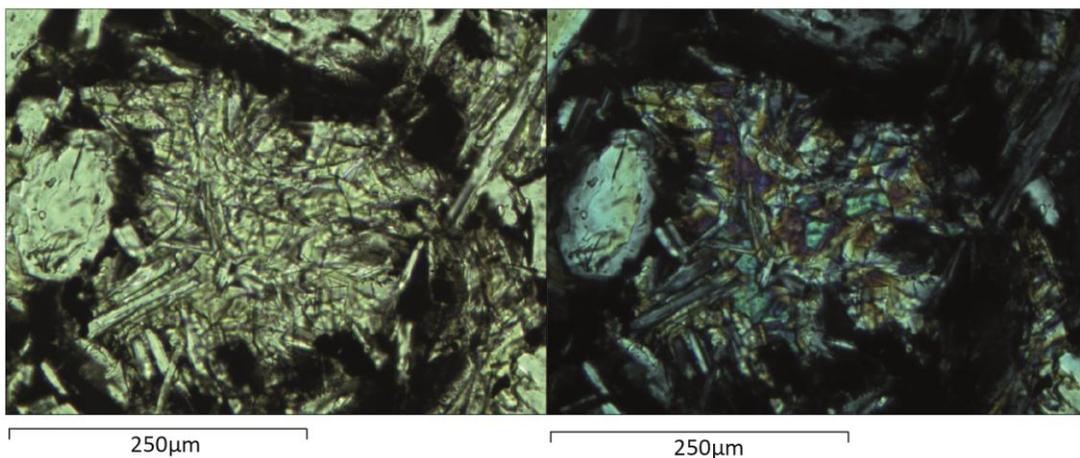
La masa fundamental posee agrupaciones de textura subofítica con piroxeno rodeando parcialmente plagioclasa (Figura 24), muy abundante en las muestras de esta unidad.

#### Casablanca 3 (Hca3)

---

Subofítica

---



**Figura 24:** Vista en microscopio óptico (izquierda, nícoles paralelos; derecha, nícoles cruzados) de la textura subofítica en la unidad Casablanca 3. La masa fundamental incluye numerosos conjuntos formados por cristales de piroxeno rodeando parcialmente plagioclasas de tamaño menor. También incluye óxidos de hierro y olivino en cantidades menores al 5%.

En la masa fundamental también se encuentra la textura intergranular en piroxeno entre plagioclasa (Figura 25), con microlitos de plagioclasa subhedrales y orientados aleatoriamente, rodeados por piroxeno anhedral de tamaño similar o menor.

#### Casablanca 3 (Hca3)

---

Intergranular

---

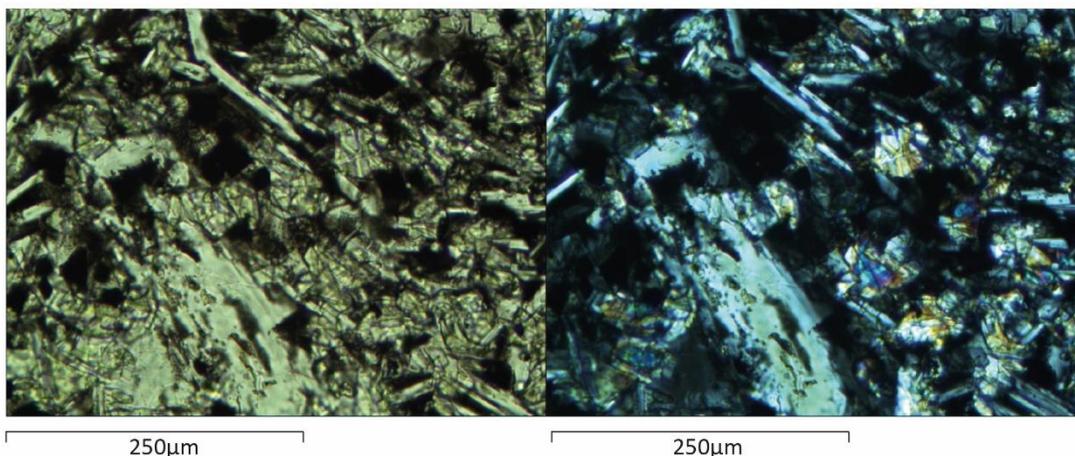


Figura 25: Vista en microscopio óptico (izquierda, nícoles paralelos; derecha, nícoles cruzados) de la textura intergranular en la unidad Casablanca 3. La masa fundamental está compuesta primordialmente por piroxeno y plagioclasa, esta última de tamaño igual o mayor al piroxeno. También incluye óxidos de hierro y olivino en cantidades menores al 5%.

#### Cono Tipo

Fenocristales de olivino y plagioclasa forman parte de aglomerados dando lugar a la textura cumuloefírica (Figura 26). En esta unidad los aglomerados son escasos pero contienen cristales de gran tamaño.

#### Cono Tipo [Hco(p)]

---

Glomeroporfírica

---

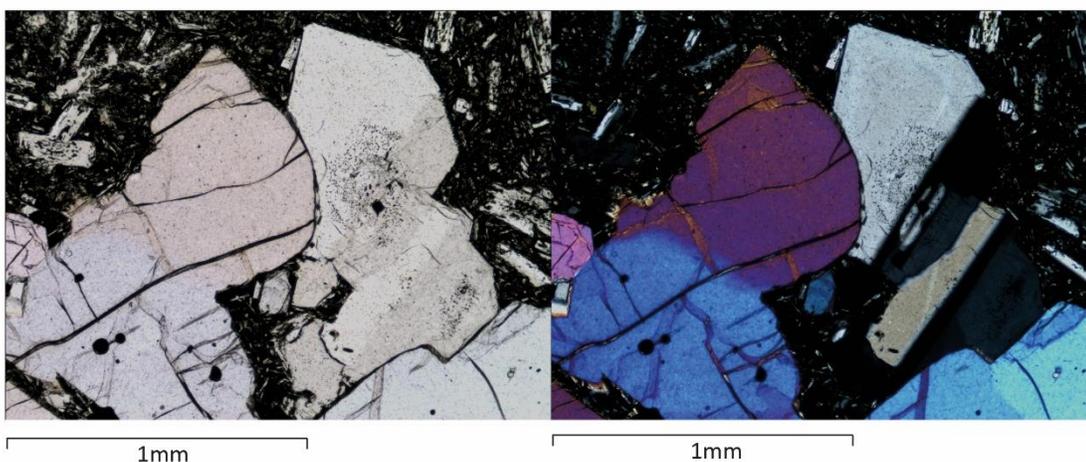


Figura 26: Vista en microscopio óptico (izquierda, nícoles paralelos; derecha, nícoles cruzados) de un aglomerado en la unidad Cono Tipo conformado por fenocristales de plagioclasa y olivino de más de 2 mm.

Se pueden encontrar texturas de reabsorción en el olivino (Figura 27), afectando en mayor medida a cristales de tamaño menor a 1 mm.

#### Cono Tipo [Hco(p)]

---

De reabsorción

---

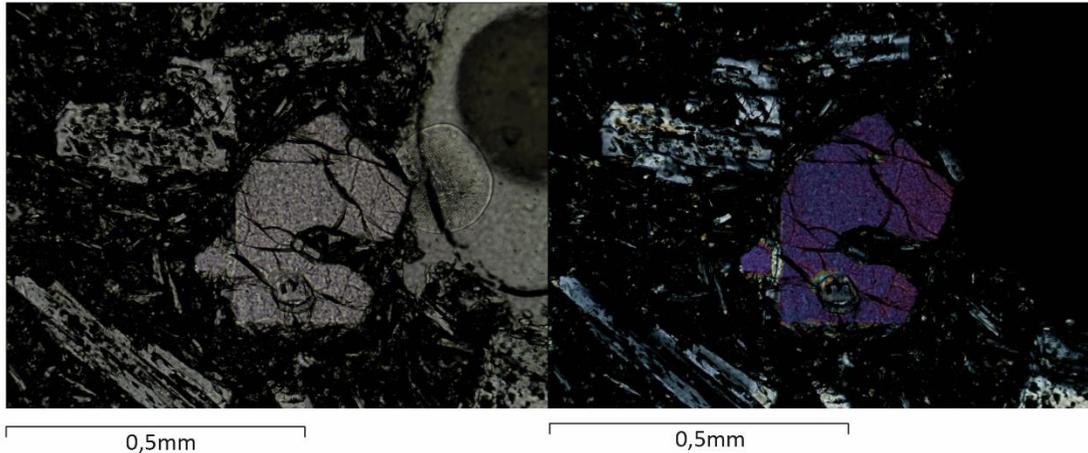


Figura 27: Vista en microscopio óptico (izquierda, nícoles paralelos; derecha, nícoles cruzados) de la textura de reabsorción en la unidad Cono Tipo en un fenocristal de olivino. Las bahías apuntan al centro del cristal y se ensanchan al acercarse a este.

La plagioclasa presenta zonación (Figura 28) en que se pueden distinguir diferentes etapas de cristalización.

#### Cono Tipo [Hco(p)]

---

Zonada

---

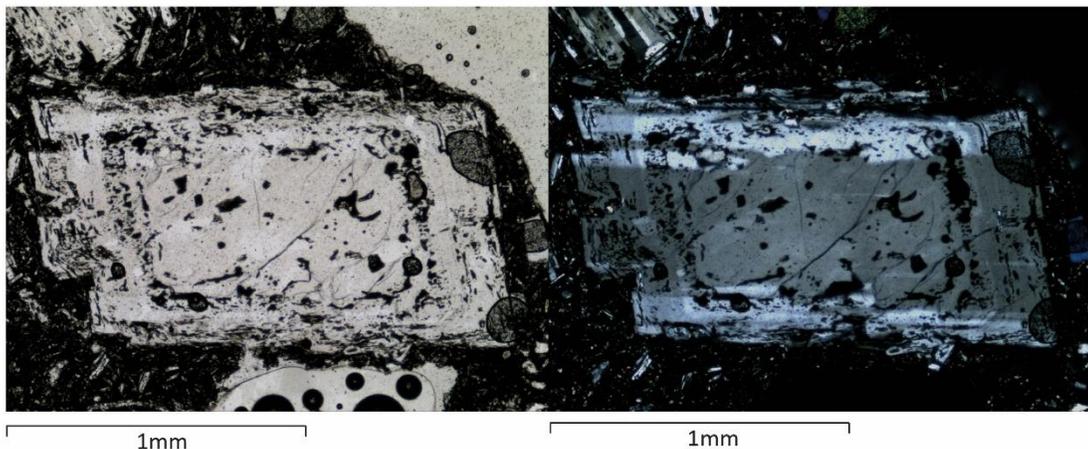


Figura 28: Vista en microscopio óptico (izquierda, nícoles paralelos; derecha, nícoles cruzados) de la textura zonada en la unidad Cono Tipo en un fenocristal de plagioclasa en el que se distinguen sectores concéntricos con distinta extinción reflejo de las variaciones composicionales.

Abundante es la textura en tamiz (Figura 29), también conocida como *sieve* o *patchy zoning*, en la plagioclasa zonada, mayoritariamente en su núcleo o siguiendo un patrón concéntrico. Consiste en cristales de zonación oscilatoria, con núcleos reabsorbidos,

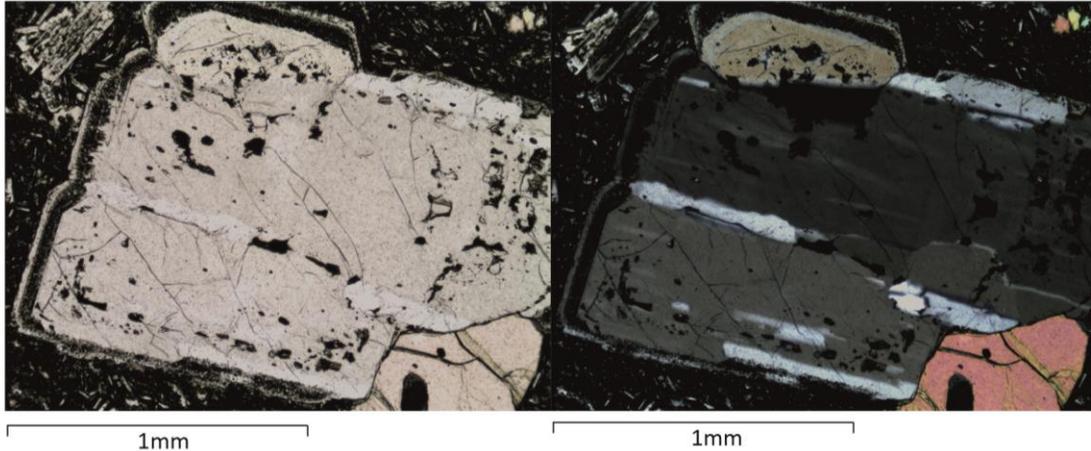
rodeados por plagioclasa que en ocasiones forma inclusiones en el núcleo que le dan el aspecto de tamiz al cristal.

#### Cono Tipo [Hco(p)]

---

En tamiz

---



**Figura 29:** Vista en microscopio óptico (izquierda, nícoles paralelos; derecha, nícoles cruzados) de la textura en tamiz en la unidad Cono Tipo en un fenocristal de plagioclasa. Se observa que un borde delgado del cristal no presenta esta textura.

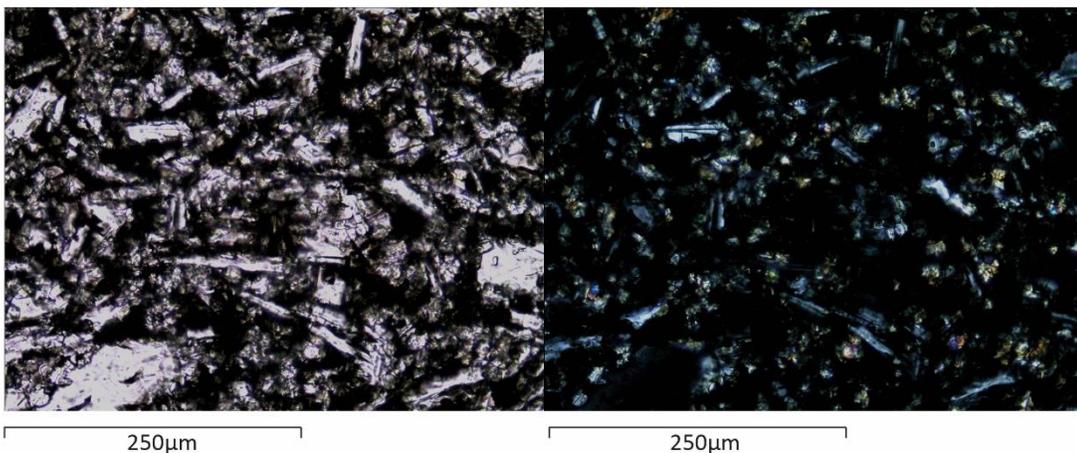
La masa fundamental está dominada por la ocurrencia de textura intergranular en piroxeno entre plagioclasa (Figura 30), con microlitos de plagioclasa subhedrales y orientados aleatoriamente, rodeados por piroxeno anhedral de tamaño similar o menor. Aparentemente el contenido de plagioclasa es más abundante en proporción a los piroxenos.

#### Cono Tipo [Hco(p)]

---

Intergranular

---



**Figura 30:** Vista en microscopio óptico (izquierda, nícoles paralelos; derecha, nícoles cruzados) de la textura intergranular en la unidad Cono Tipo. La masa fundamental está compuesta primordialmente por piroxeno y plagioclasa, esta última de tamaño igual o mayor al piroxeno. También incluye óxidos de hierro y olivino en cantidades menores al 5%.

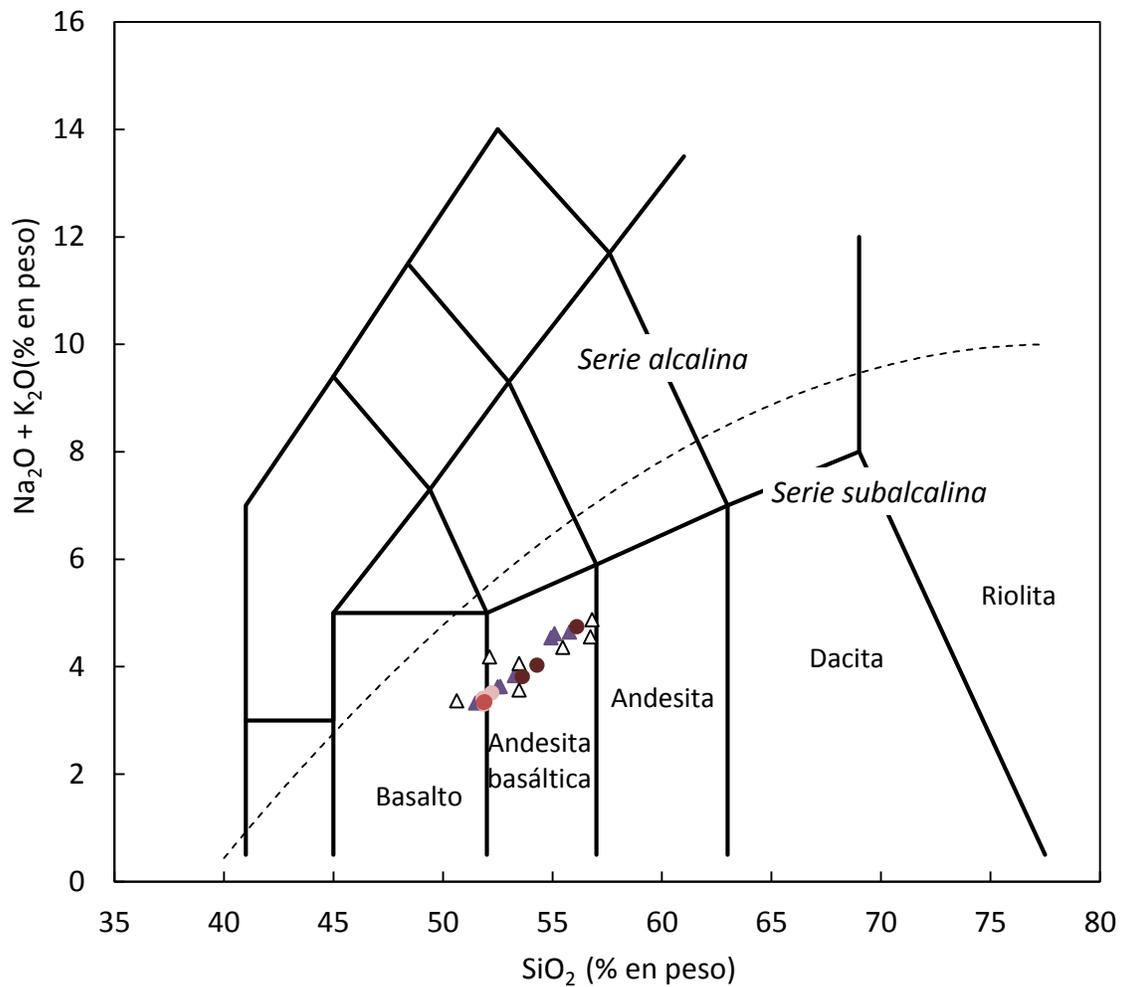
## **Geoquímica**

Los gráficos de la sección Geoquímica se realizan con datos de muestras tomadas para este trabajo excepto por los datos de Cráter Rayhuén, obtenidas desde Lara y Moreno (2012) (*Anexo B, Análisis de roca total, Tabla 6*).

Un estudio geoquímico se hace necesario para identificar procesos geológicos a nivel subsuperficial. Diagramas de elementos mayores se utilizan para clasificar las rocas y caracterizarlas, además pueden aportar información de un posible mecanismo de cristalización fraccionada, mientras que la signatura de los elementos traza revela una gama mayor de mecanismos de diferenciación (mezcla de magmas, asimilación, contaminación, etc.) ubicándola como una herramienta crítica para la clasificación e identificación de los procesos de la fuente. El tratamiento de los datos se encuentra en *Metodología, Geoquímica*.

### **Elementos Mayores**

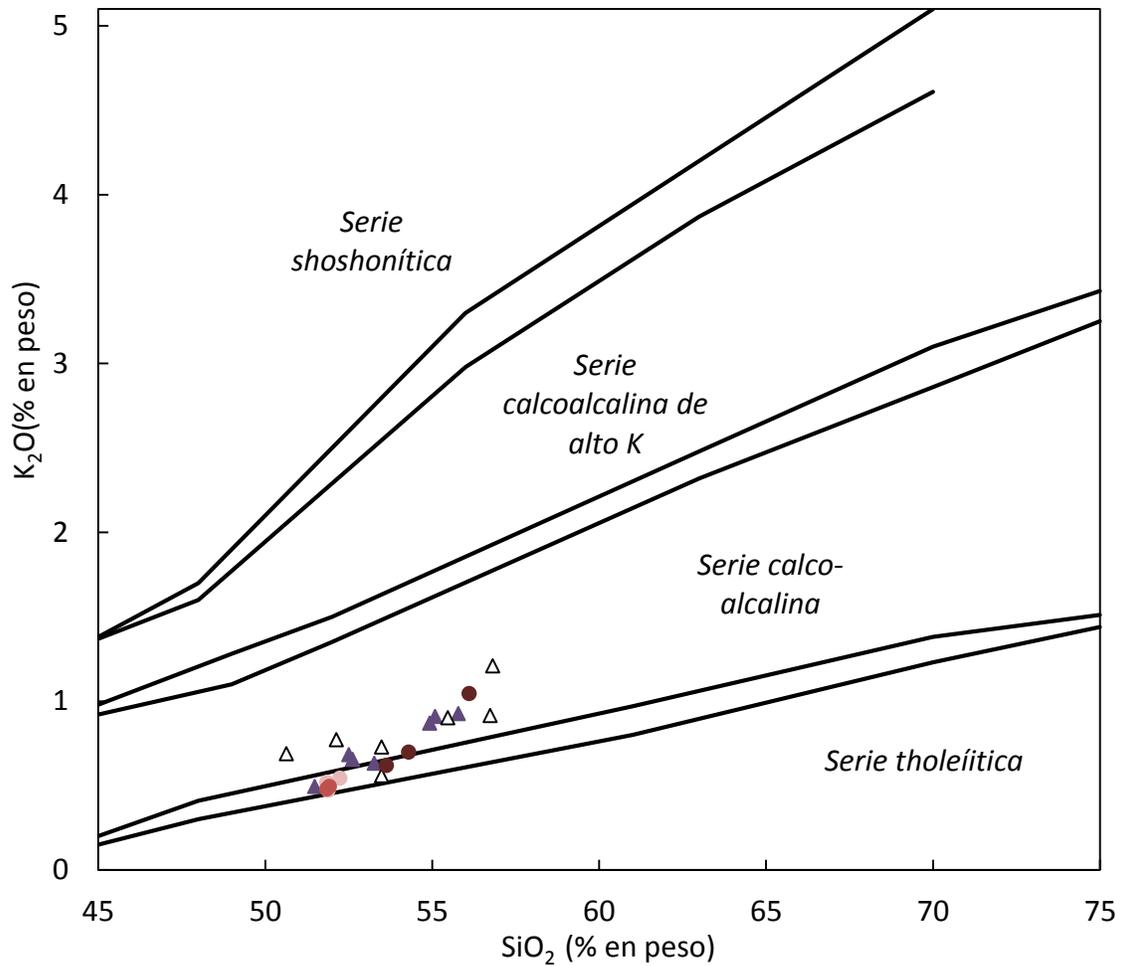
En el caso de los elementos mayores se utilizan los siguientes diagramas. El diagrama de álcalis-sílice total (TAS) para rocas volcánicas (Le Maitre *et al.*, 1989) clasifica la roca en una de las quince áreas por su contenido de sílice y álcalis, permite una fácil visualización de su carácter composicional y discrimina entre serie magmática alcalina o subalcalina. A partir de estos resultados las rocas analizadas del CVA clasifican en la serie subalcalina (Figura 31).



● Casablanca 1   ● Casablanca 2   △ Cráter Rayhuén   ○ Casablanca 3   ▲ Cono Tipo

**Figura 31:** Diagrama de clasificación química de rocas volcánicas, Total Álcalis versus Sílice (TAS) (Le Maitre *et al.*, 1989), con la división entre series alcalina y subalcalina (Irvine y Baragar, 1971).

El diagrama potasio contra sílice (Peccerillo y Taylor, 1976) divide a su vez las rocas subalcalinas en las series tholeiítica, calco-alcalina (K intermedio), calco-alcalina (K alto) y shoshonítica. Los resultados arrojan que estas rocas pertenecen a la serie calco-alcalina (Figura 32).



● Casablanca 1 ● Casablanca 2 △ Cráter Rayhuén ○ Casablanca 3 ▲ Cono Tipo

Figura 32: Diagrama de división de rocas subalcalinas, K<sub>2</sub>O versus sílice; separado en cuatro series (Rickwood, 1989). Cada serie (shoshonítica, calcoalcalina de alto K, calcoalcalina y tholeítica) está dividida de otra por un campo comprendido entre las líneas gruesas, definido por una compilación de datos (Rickwood, 1989).

Los diagramas de Harker muestran la variabilidad de los elementos mayores (óxidos) con respecto al contenido de sílice; pueden reflejar fases de cristalización. Los diagramas bivariados MgO son similares a los diagramas Harker, pero cambiando el sílice por el óxido de magnesio, son especialmente apropiados en rocas máficas, como es el presente caso (Figura 33).

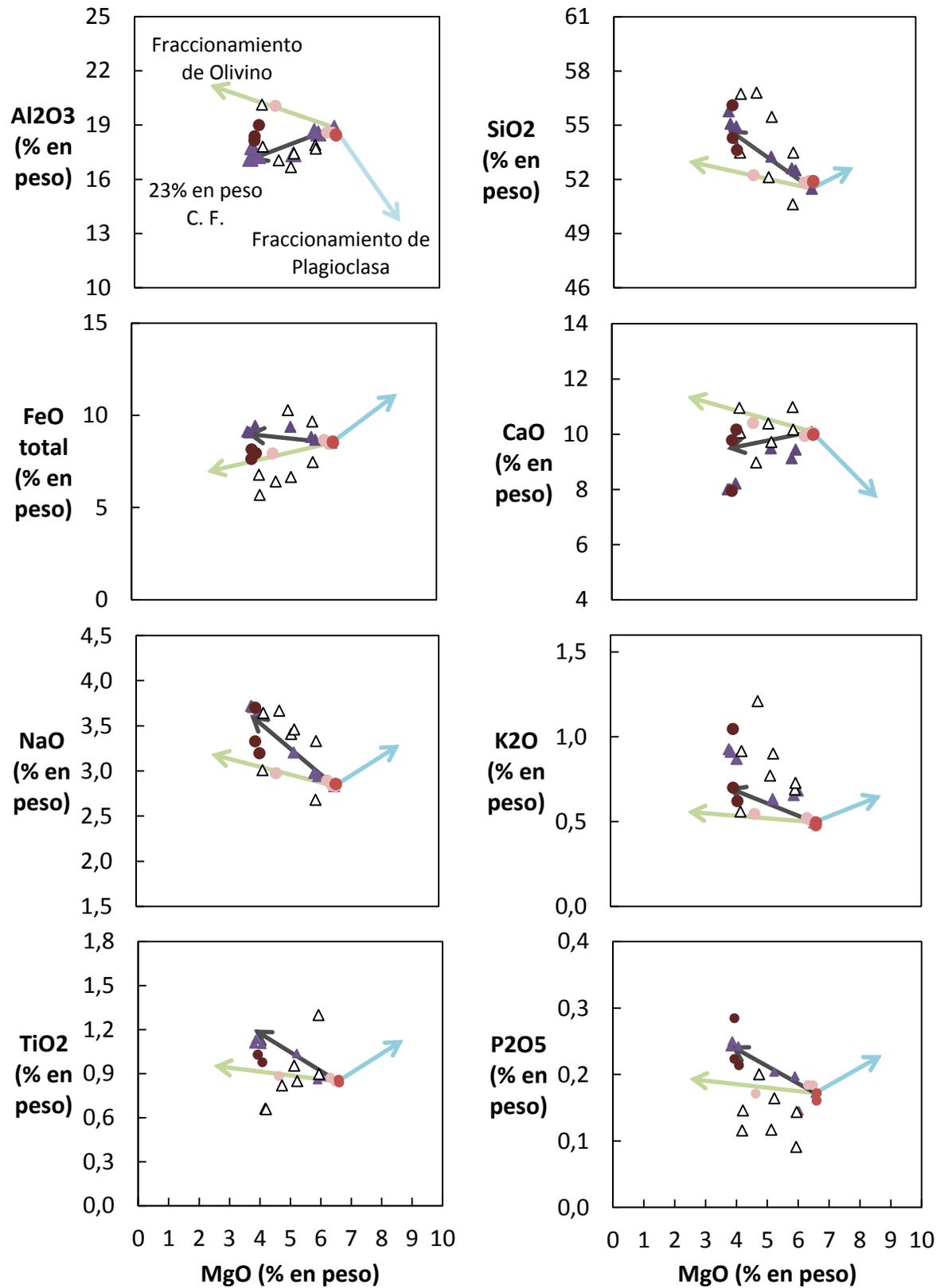


Figura 33: Diagrama de dos variables MgO (“tipo Harker”) para óxidos de Al, Si, Fe, Ca, K, Na, Ti y P, todos expresados en porcentaje en peso con respecto a la roca total. Los vectores muestran el cambio composicional del fundido al fraccionarse olivino, plagioclasa y una combinación de ambas que representa un 23% de cristalización fraccionada (detalles en *Discusión*).

Los basaltos se caracterizan por un contenido de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sobre 16% en peso. El rango en el contenido de sílice en la mayoría de las muestras volcánicas varía entre 50% y 56% en peso. FeO, CaO y en cierto grado Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> muestran una correlación positiva con MgO; en contraste, SiO<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O y P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> tienen una correlación negativa con el contenido de magnesio; el patrón de TiO<sub>2</sub> muestra una correlación positiva en la unidad Cráter Rayhuén y negativa en Cono Tipo (Figura 33).

### Elementos Trazas

Los datos utilizados para elementos trazas corresponden a 23 muestras (todas las muestras, disponibles en *Anexo B, Análisis de roca total, Tabla 6*) pertenecientes a las 5 unidades; en el caso de existir más de una muestra en una misma unidad, se promedian los datos.

Los elementos tierras raras (rare earth elements, REE) se presentan en un gráfico de concentración ordenados por su número atómico. Se grafican en spider-diagram (diagramas de araña) normalizados por condrito, adecuado para este caso en que las rocas son menos diferenciadas. Se puede ver la homogeneidad de los patrones en rangos generales. En todas las unidades existe una anomalía positiva de Eu muy leve ( $Eu/Eu^*=1,02-1,09$ ) y un enriquecimiento de tierras raras livianas (LREE) en relación a las tierras raras pesadas (HREE), con una razón  $(La/Lu)_N = 5,7$  para la unidad Cráter Rayhuén y 2,9-3,2 para las restantes (Figura 34).

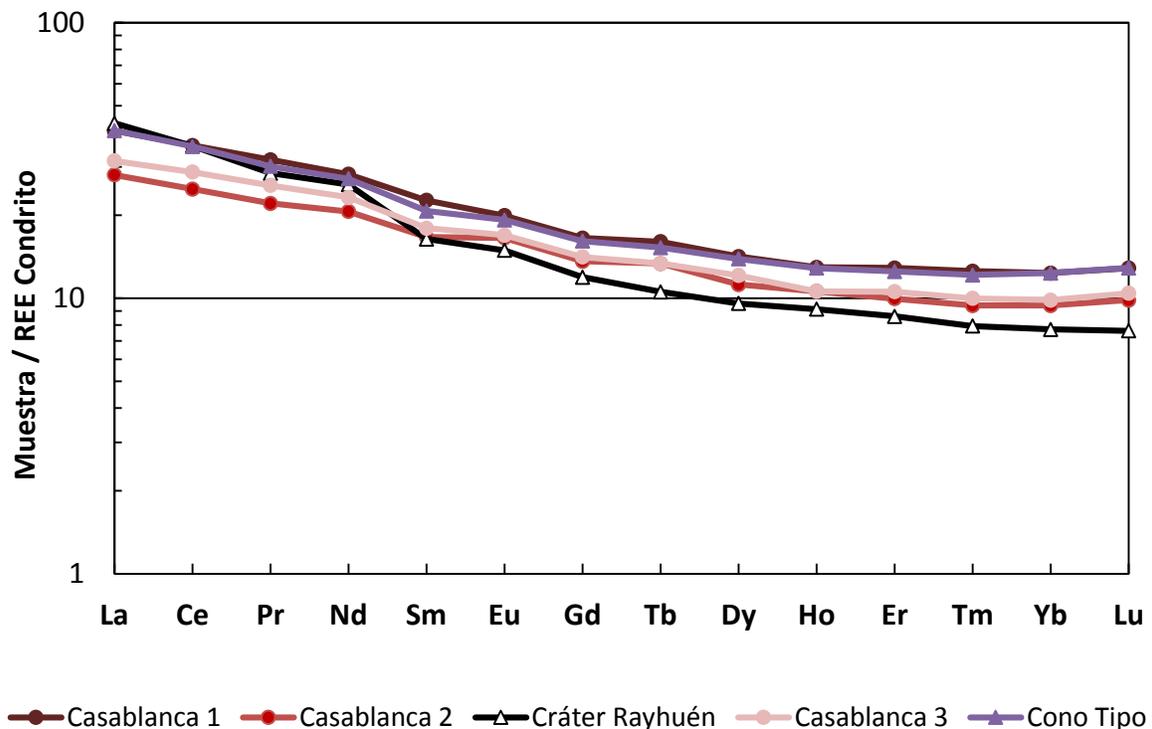


Figura 34: Diagrama *spider* de REE normalizado a condrito, Sun y McDonough (1989) condrito CI.

Un diagrama multielemento muestra el comportamiento de numerosos elementos agrupados por su compatibilidad, pudiendo reflejar, por ejemplo, los LILE (large ion lithophile elements o elementos litófilos de radio iónico grande) a la fase fluida o al grado de contaminación cortical y los HFSE (high field strength elements o elementos de alto potencial iónico) a la fuente y procesos evolutivos de los cristales y el fundido. Se presenta un diagrama normalizado a condrito para comparar la química de las rocas con la fuente (Figura 35). La química de elementos traza muestra concentraciones no más allá de las 70 veces en comparación a condrito. Los LILE se encuentran unas 6 veces enriquecidos con respecto a HFSE, Casablanca 3 y Casablanca 2 en menor medida con respecto a Casablanca 1 y Cono Tipo. Los HFSE no muestran mayores diferencias entre ellos, presentando un patrón “plano”. Existen anomalías negativas de Nb y Ta en todas las unidades y anomalía negativa de P en Cráter Rayhuén. Se encuentran anomalías positivas para Sr en todas las unidades.

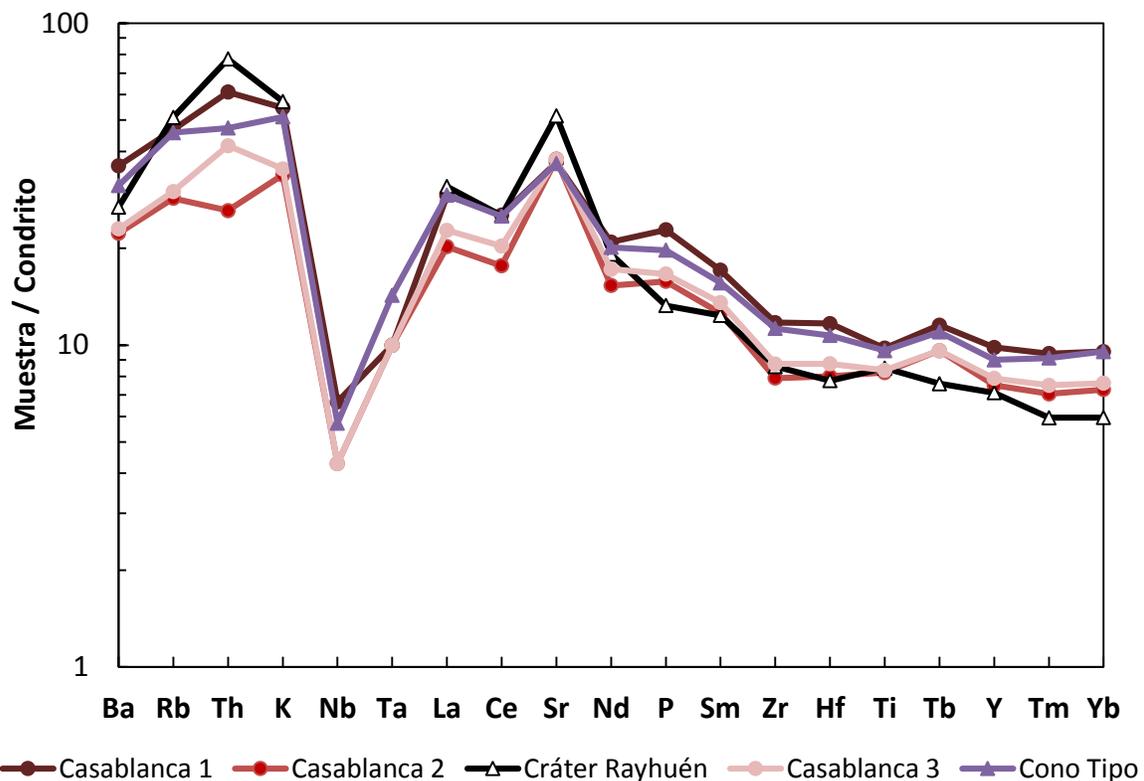


Figura 35: Concentración de elementos traza normalizados a condritos y ordenados aumentando la compatibilidad en una pequeña fracción de fundido del manto desde la izquierda hacia la derecha. Valores de Thompson (1982); Rb, K, P de Sun (1980).

Tanto por su importancia como por su diversidad, los diagramas de elementos traza de dos variables requieren un estudio detallado de elementos incompatibles: sensibles a los procesos de fusión parcial, describen la proporción en la fuente cuando se grafica un par de elementos de similar coeficiente de partición (Figura 36) y pueden trazar distintas pendientes si se les plotea a manera de razones entre incompatibles (Figura 37).

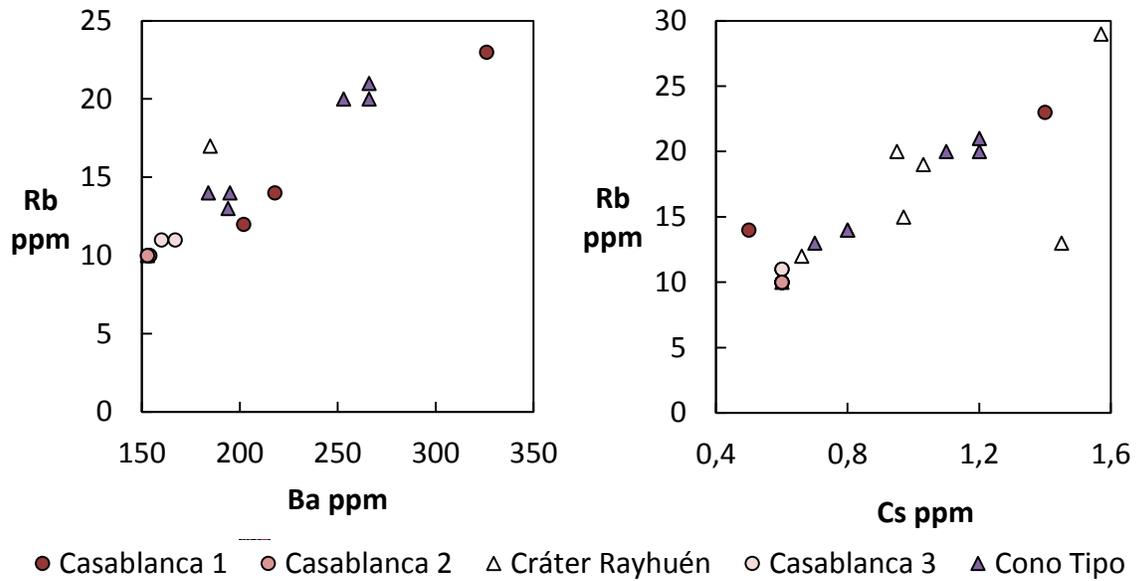


Figura 36: Diagramas de elementos altamente incompatibles de coeficiente de partición similar durante la fusión mantélica, Rb-Ba-Cs.

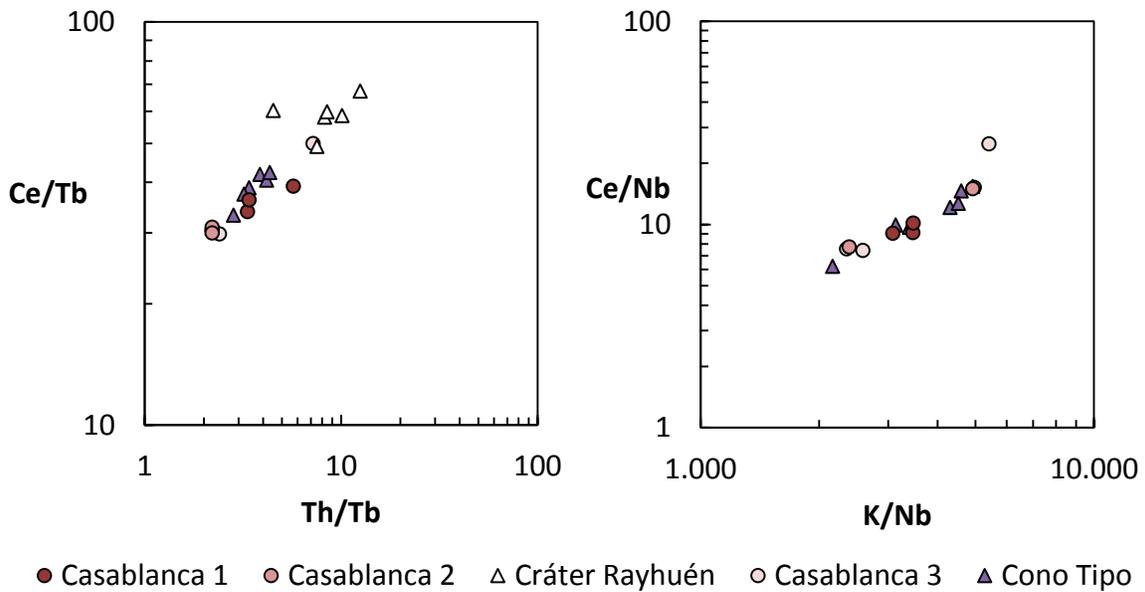


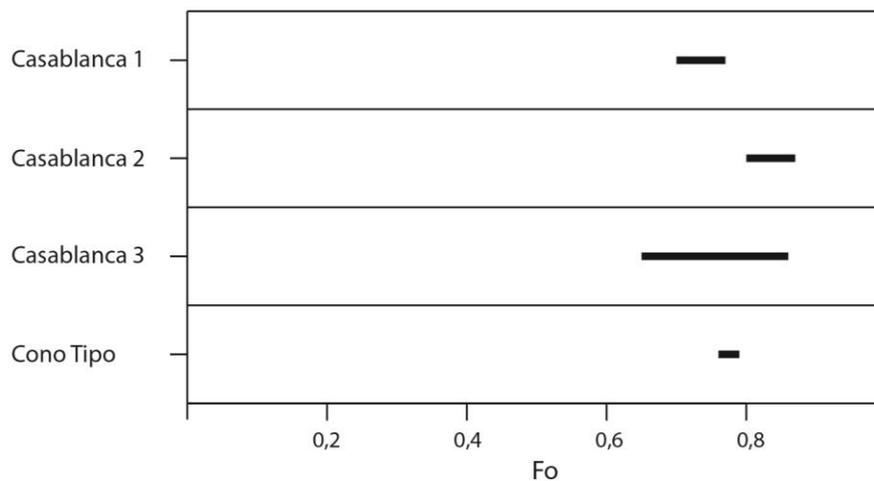
Figura 37: Diagrama de razones de elementos altamente incompatibles Ce, K, Th, Tb, Nb de coeficiente de reparto similar.

## Química mineral

Para la descripción de minerales, se analizan al menos dos cristales por cada muestra, con al menos dos análisis en cada uno, seleccionados todos de manera aleatoria. Los datos son entregados en peso por elemento, así que deben ser transformados a peso de óxidos y luego a proporción catiónica y obtener la proporción de forsterita.

### Olivino

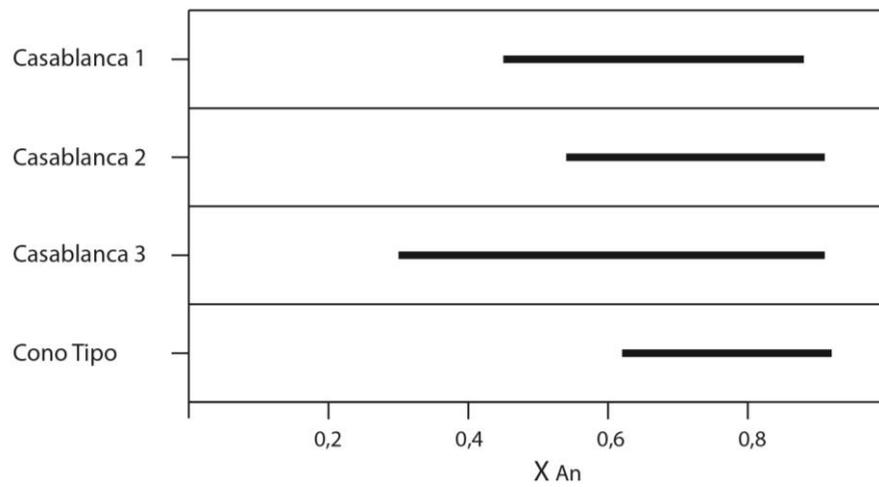
Para las unidades Casablanca 1, Casablanca 2, Casablanca 3 y Cono Tipo se realiza un análisis semicuantitativo de algunas muestras representativas de este mineral utilizando el detector EDX de un microscopio electrónico de barrido en los fenocristales (datos en *Anexo C, Análisis de olivino*, tratamiento de datos en *Metodología, Microscopía electrónica de barrido*). Por lo general el contenido de forsterita disminuye hacia los bordes, aunque a veces es constante en todo el cristal. Las unidades presentan variaciones significativas en los rangos composicionales (Figura 38). El máximo pertenece a Casablanca 2 ( $F_o = 0,87$ ) y el mínimo se encuentra en Casablanca 3 ( $F_o = 0,65$ ).



**Figura 38: Contenido de forsterita en los fenocristales de olivino. El rango global es desde forsterita 0,87 hasta 0,65. El número de datos de cada unidad es el siguiente: Casablanca 1 N=4, Casablanca 2 N=28, Casablanca 3 N=37, Cono Tipo N=3.**

### Plagioclasa

Se analizan las zonaciones de plagioclasa en cristales de las unidades Casablanca 1, Casablanca 2, Casablanca 3 y Cono Tipo empleando la microsonda electrónica (Figura 39) (datos en *Anexo D, Análisis de plagioclasa*, procesamiento de datos según *Metodología, Análisis por microsonda electrónica*). El rango composicional (expresado en  $X_{An} * 100$ ) de todas las unidades es variable, Casablanca 1  $An_{45-88}$ , Casablanca 2  $An_{54-91}$ , Casablanca 3  $An_{30-91}$  y Cono Tipo  $An_{62-92}$ , pero con un valor máximo común aproximadamente  $An_{90}$ .



**Figura 39: Rangos globales de contenido de anortita en fenocristales de plagioclasa. El número de datos de cada unidad es el siguiente: Casablanca 1 N=20, Casablanca 2 N=73, Casablanca 3 N=37, Cono Tipo N=22.**

## Análisis de zonación de plagioclasa

En este estudio se analizan fenocristales de plagioclasa seleccionados en base a la mayor amplitud de la zonación y el tamaño de los cristales; de esta manera los fenocristales preservan un registro más amplio de la historia magmática y puede realizarse una correlación de las zonas entre distintos fenocristales.

Los datos se seleccionan en primer lugar en base al error en porcentaje de masa: se tolera un error menor o igual a 2,5% en masa total, cualquier análisis con error mayor se elimina. Asimismo, se toma en consideración el contenido de los elementos menores Fe y Mg: se acepta solamente un valor menor al 2% en masa, una concentración mayor podría indicar un muestreo de otro mineral, dada la presencia de piroxeno y óxidos de hierro como inclusión en la plagioclasa. Cristales que posean menos de cuatro muestras tampoco son considerados. De esta manera, de un total de 222 análisis en 22 cristales, se descartan 36 por valores de error, 29 por contenido de Fe o Mg mayor a 2% y 5 por pertenecer a cristales con un número de muestreos insuficiente, dando un total de 152 análisis válidos en 18 cristales (Tabla 2). Las muestras seleccionadas son:

**Tabla 2: Cristales de plagioclasa analizados con microsonda según muestra y unidad.**

Unidad	Muestra	
Casablanca 1	ANT-26	PL21, PL22, PL23
Casablanca 2	ANT-8 y ANT-9	PL11, PL12, PL13, PL14 y PL15, PL16, PL17
Casablanca 3	ANT-1 y ANT-7	PL1, PL4, PL5 y PL7, PL9
Cono Tipo	ANT-5	PL24, PL25, PL26

A continuación se calcula el contenido de anortita de cada zona examinada. Los resultados entregados por el laboratorio se encuentran disponibles tanto en porcentaje en peso como en fracción catiónica. Para transformarlos desde fracción a proporción catiónica se suman todos los valores y cada elemento se divide por esta suma. El contenido de Ca se divide por la suma de los contenidos de K, Ca y Na para obtener el contenido de anortita.

Cada unidad es estudiada en detalle por separado para determinar la evolución en la historia de cristalización y finalmente trazar una posible evolución entre las unidades. Los análisis permiten graficar el contenido de anortita, hierro y magnesio a través de plagioclasas zonadas desde el borde hasta el centro del cristal. El límite entre borde y centro se considera la textura sieve más externa presente en cada fenocristal. Los perfiles de análisis se trazan en imágenes conseguidas con un detector de electrones retrodispersados (BSE) en un microscopio SEM y las vistas generales de cada cristal en un microscopio óptico. Los datos se encuentran en *Anexo D, Análisis de plagioclasa* y fueron tratados acorde a *Metodología, Análisis por microsonda electrónica* y *Metodología, Análisis de zonación de plagioclasa*. El límite de detección de la microsonda es de 100 ppm bajo las condiciones analíticas empleadas, por lo tanto las variaciones

composicionales descritas en la plagioclasa (zonada) deben ser mayores a los 200 ppm para considerarse relevantes.

### **Consideraciones con elementos menores**

Las variaciones de Fe y Mg en plagioclasa se pueden producir por cambios en los coeficientes de partición o por variaciones en la composición del fundido (Ginibre *et al.*, 2002).

Si bien en las unidades estudiadas el contenido de Fe y Mg en roca total depende del grado de diferenciación del magma, en la plagioclasa esta relación no es necesariamente cierta debido a la influencia de otros efectos. La mayor abundancia de Fe en plagioclasa comparado con Mg se traduce en mayor precisión de los análisis, sin perjuicio de que el Fe medido pueda sufrir modificaciones, como por ejemplo una variación en el contenido de agua del magma podría modificar la fugacidad de oxígeno que a su vez influye en el coeficiente de partición de Fe (Wilke y Behrens, 1999). También existe un efecto cinético en el borde de los cristales que produce un aumento significativo en las concentraciones de Fe (Ginibre *et al.*, 2002) que podría ser confundido con un cambio en la fugacidad de oxígeno; para evitar este inconveniente, en el límite externo de los cristales ambos elementos (Mg y Fe) deben variar de manera acoplada para considerar el cambio como un reflejo del fundido y no solo un efecto de borde.

### **Comparaciones generales**

Las unidades muestran tendencias distintas del contenido de anortita, Fe y Mg en los fenocristales de plagioclasa para el centro en comparación con el borde. Se observa una relación inversa entre anortita y Fe, con los valores más altos de anortita pertenecientes al centro de los cristales y los valores bajos al borde; el contenido de Fe de la unidad Cono Tipo es más bajo que las demás unidades, de composición similar entre ellas (Figura 40). También existe una relación inversamente proporcional al comparar Mg con anortita, con la excepción de Casablanca 1 cuyo contenido de Mg es independiente del de anortita; en todas las unidades los contenidos mayores de anortita predominan en el centro de los cristales mientras que los menores en el borde (Figura 41).

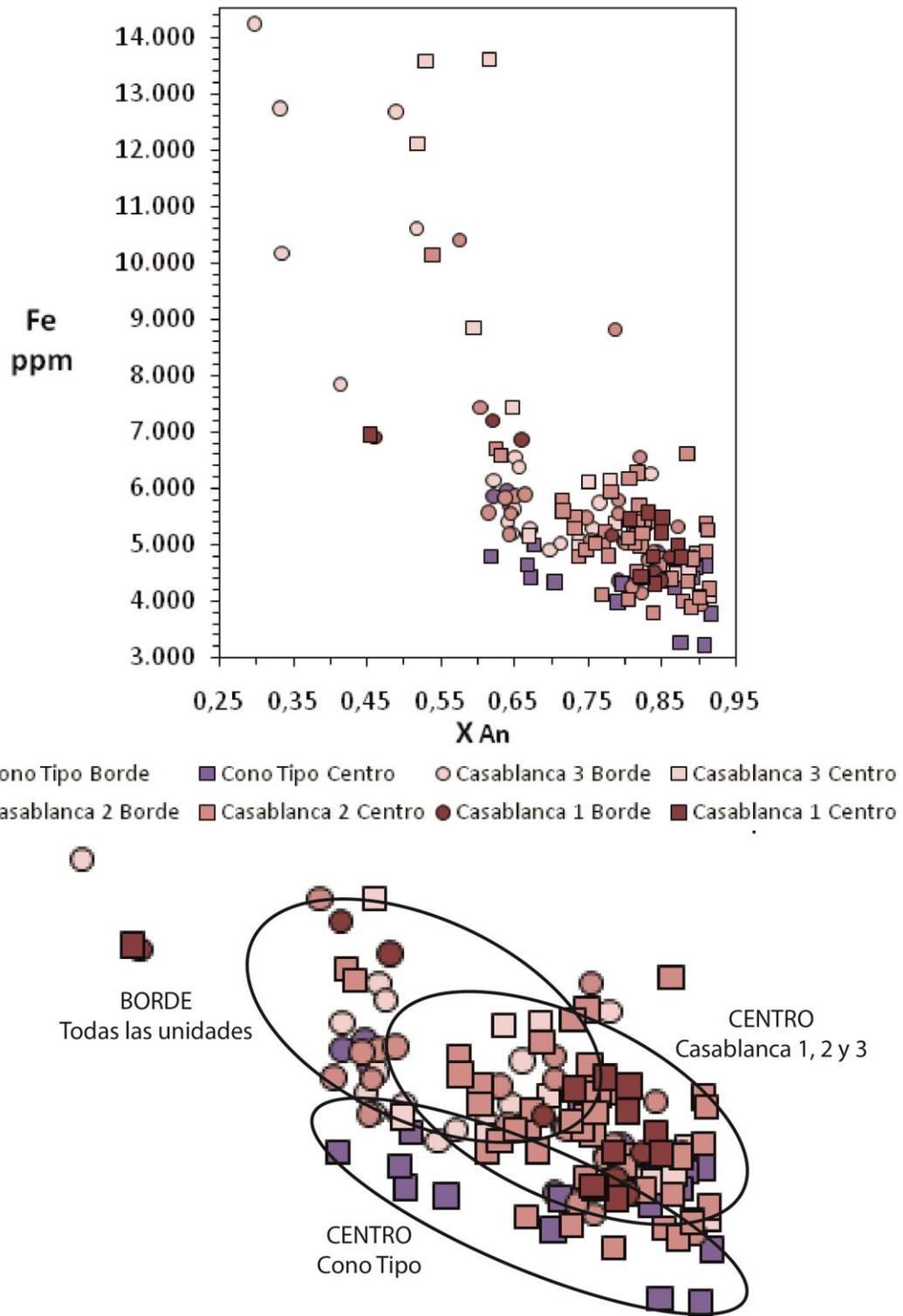


Figura 40: Variación del contenido de hierro en plagioclasa ante diferentes valores de anortita.

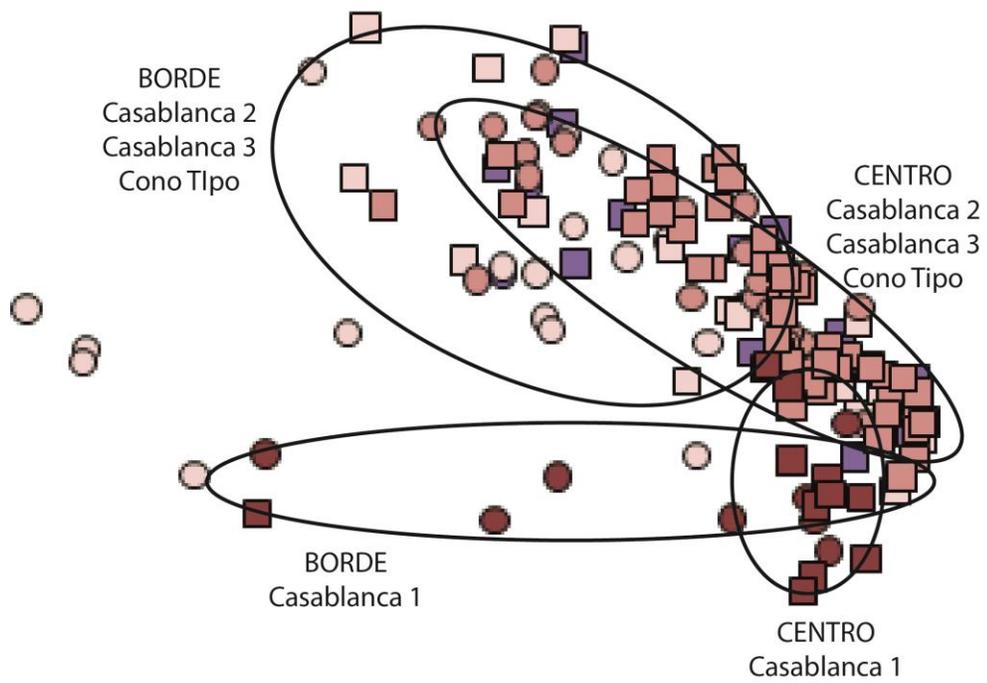
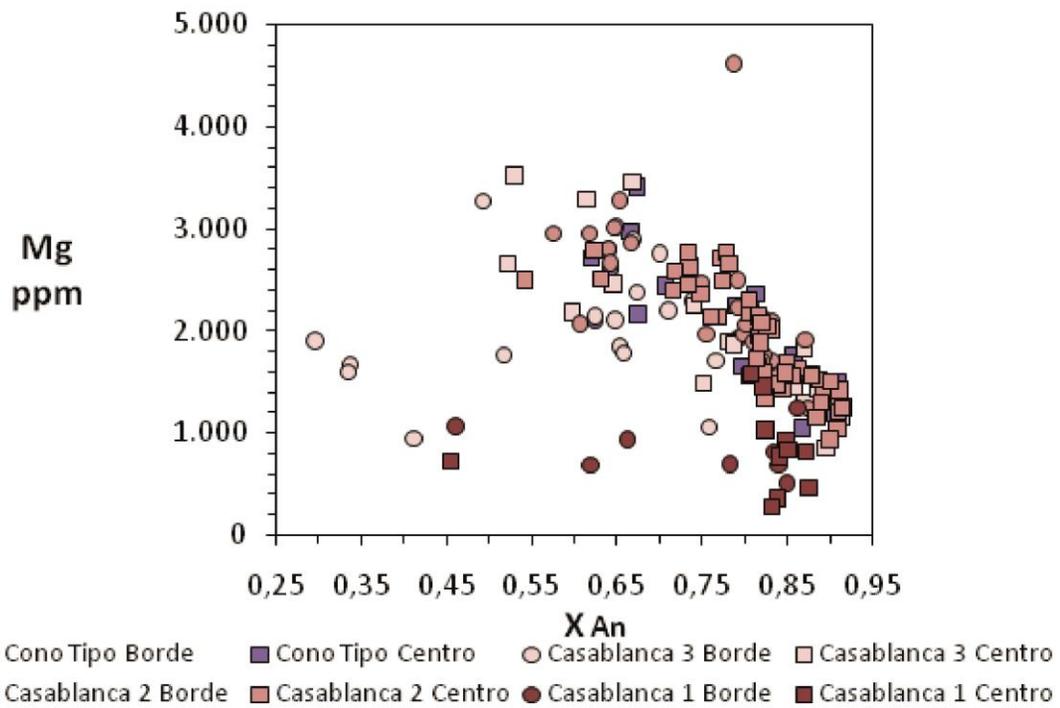


Figura 41: Variación del contenido de magnesio en plagioclasa con el contenido de anortita.

## **Casablanca 1**

El número de cristales descritos es tres. En un intento de unificar la información, los cristales de esta unidad se dividen en cinco segmentos (A, B, C, D, E) según cambios en su morfología y composición, perteneciendo al borde los tres primeros y al centro los otros dos ( Figura 42 PL21 b, PL22 b y PL23 b).

Borde A es el borde más externo del cristal, se observa del color más oscuro al igual que los microlitos. Su composición es  $An_{50}$  (similar a los microlitos), 7000-9000 ppm Fe y en torno a 1000 ppm Mg.

Borde B está inmediatamente a continuación de A, a menos de 40  $\mu m$  del borde, también se ve como una zona oscura casi indistinguible de A que representa una transición química hacia C, de composición variable entre  $An_{60-70}$ , 7000 ppm Fe y 1000 ppm Mg.

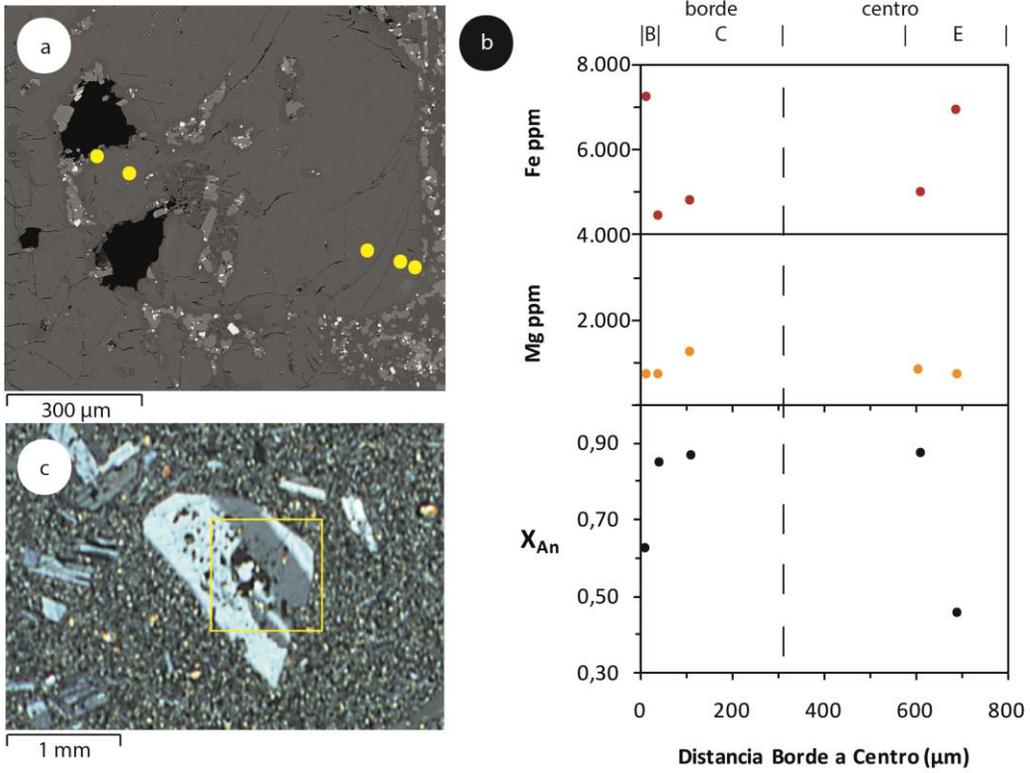
Borde C es una zona de zonación oscilatoria que acaba en la zona de textura sieve del cristal. Se compone de  $An_{75-90}$ , 4500-5500 ppm Fe y 500-1000 Mg.

Siguiendo hacia el centro está la zona Centro D, puede poseer sieve leve a moderada. Contiene  $An_{80-90}$ , 4000-6000 ppm Fe y 500-1500 ppm Mg.

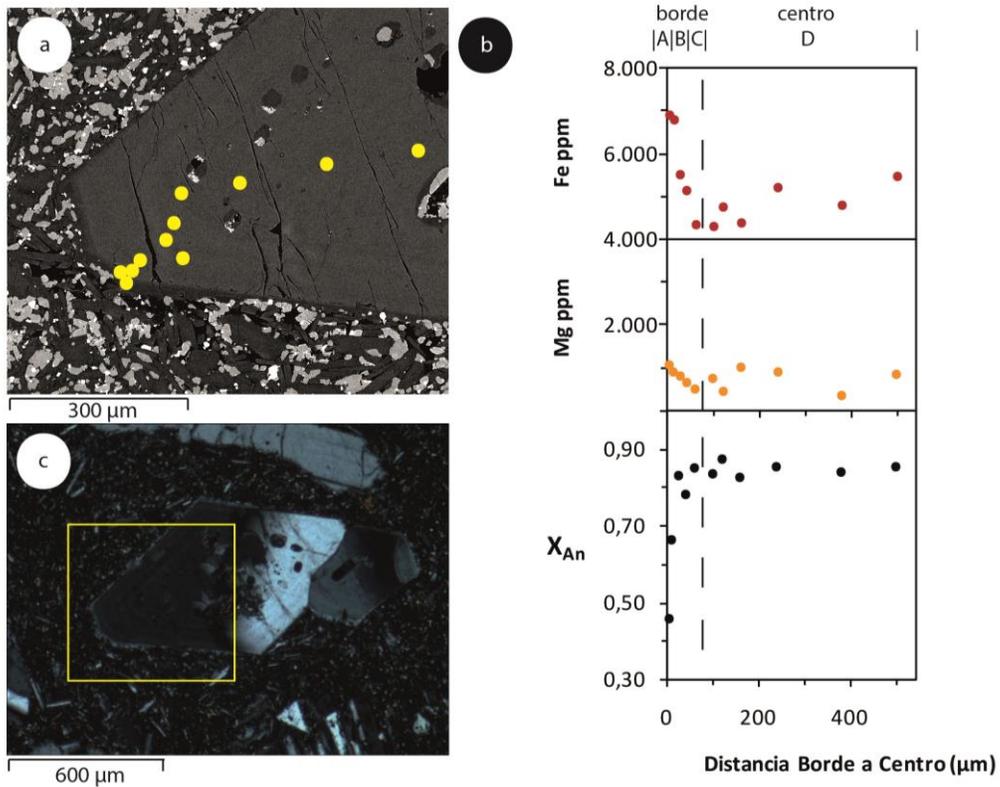
Centro E es el centro con textura sieve intensa e inclusiones, puede ser de composición similar a D ( $An_{90}$ , 5000 ppm Fe y 1000 ppm Mg) o también a A ( $An_{50}$ , 7000 ppm Fe y 1000 ppm Mg).

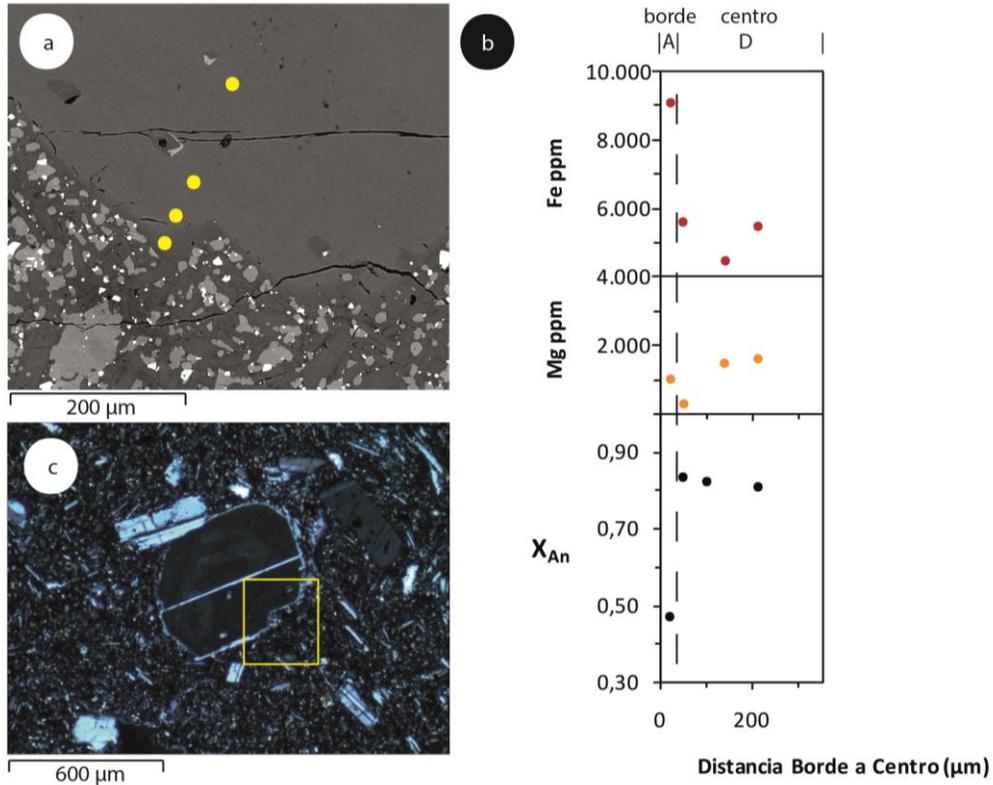
En general la concentración de los elementos menores analizados disminuye suavemente de centro a borde (excepto centro relleno en, Figura 42 PL21 a) hasta Borde B y Borde A, donde aumenta de manera brusca.

PL21



PL22





**Figura 42:** Análisis composicional en plagioclasa de la unidad Casablanca 1, plagioclasas PL21, PL22 y PL23. La vista “a” muestra una imagen SEM de la zona descrita del cristal con los puntos de disparo en amarillo. “b” resume el contenido de Fe (rojo, en ppm), Mg (naranja, en ppm) y anortita (negro, en fracción mineral) a lo largo del cristal; la línea punteada divide el centro del borde y las letras mayúsculas representan diferentes sectores (ver texto). La fotografía “c” es una vista completa en microscopio óptico del cristal examinado; en amarillo el área aproximada cubierta por la imagen SEM.

## Casablanca 2

En esta unidad se describen 7 cristales, que se dividen en cinco segmentos (A, B, C, D, E) pertenecientes al borde los tres primeros y al centro los otros dos (Figura 43 PL11 b, PL12 b, PL13 b, PL14 b, PL15 b, PL16 b, PL17 b).

Borde A es el borde del cristal, comprende los primeros 20 a 100  $\mu\text{m}$  en algunos casos, de color oscuro al igual que las plagioclasas que forman parte de la masa fundamental. Su composición es  $\text{An}_{55-70}$ , 5000-10000 ppm Fe y 2000-3000 ppm Mg.

Borde B está a continuación de A, presenta zonación oscilatoria con tendencia a aumentar el contenido de anortita hacia el centro,  $\text{An}_{75-90}$ , 4000-6000 ppm Fe y 1000-2500 ppm Mg.

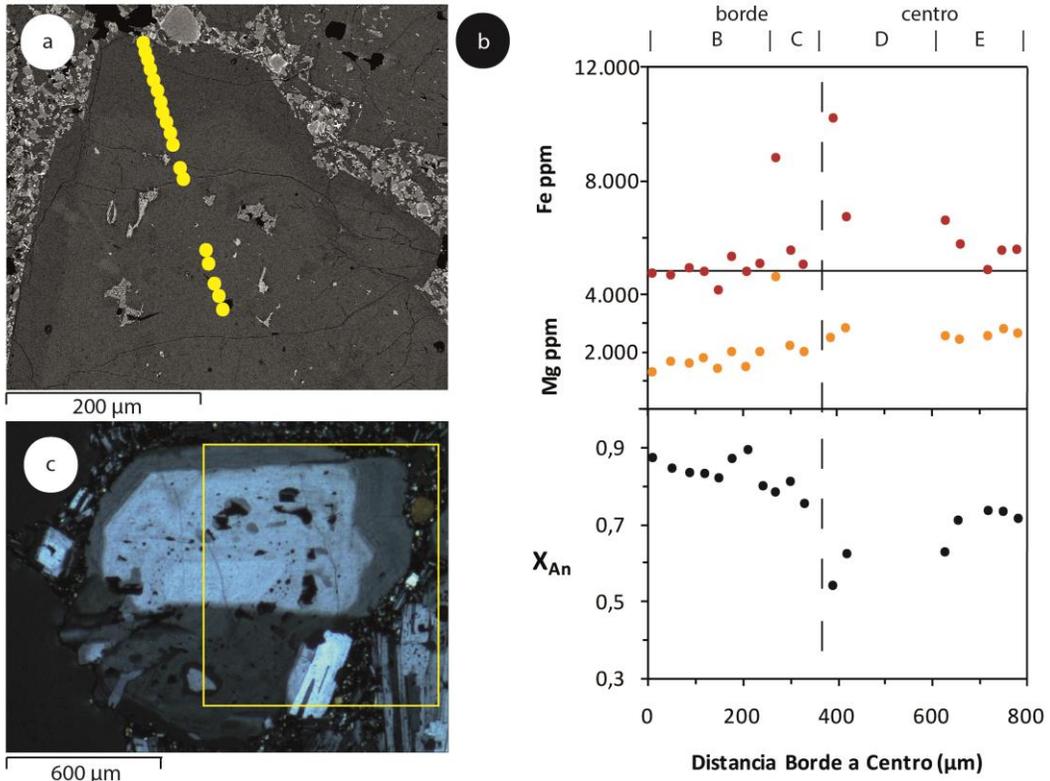
Borde C es un segmento que se encuentra solo en un cristal, posee zonación oscilatoria igual a B y una composición similar de anortita pero contrastante en elementos traza, con 5000-9000 ppm Fe y 2000-5000 ppm Mg.

Centro D posee sieve moderada a intensa y su composición es de  $\text{An}_{55-90}$ , 4000-10000 ppm Fe descendente hacia el centro, 1000-3000 ppm Mg oscilante.

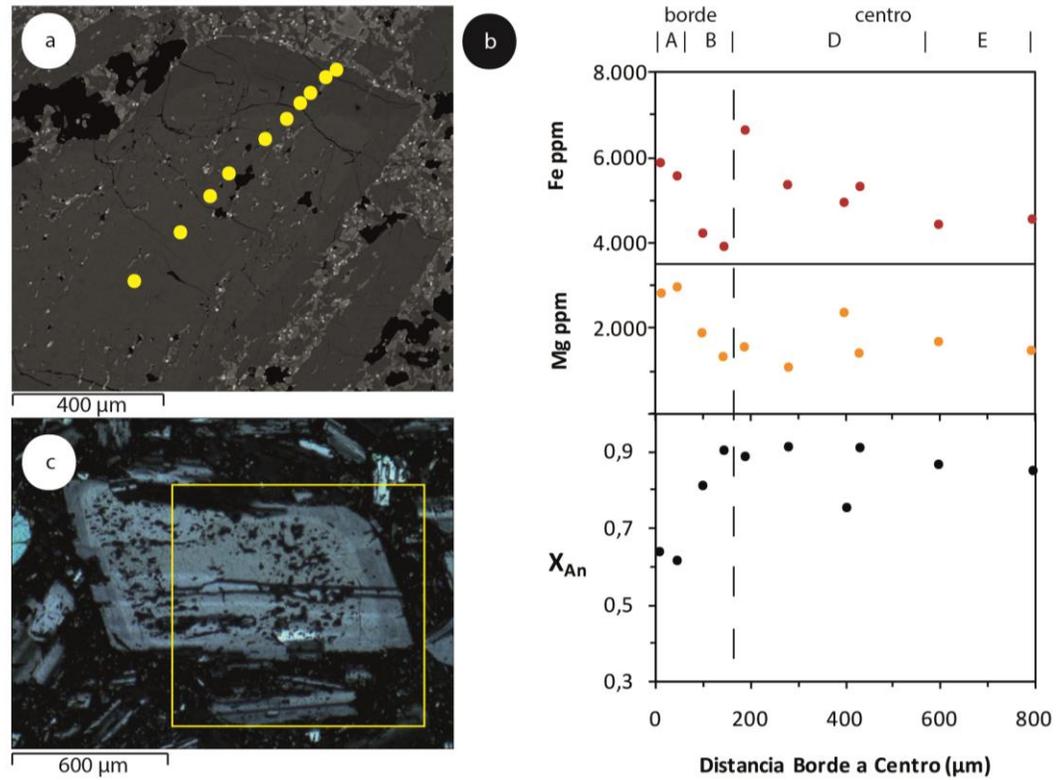
Centro E es el centro con textura sieve leve o sin ella de composición similar a D  $\text{An}_{60-90}$ , 4000-7000 ppm Fe y 1000-3000 ppm Mg.

En general el comportamiento de los traza es constante en el centro con excepciones en el Centro D de valores altos especialmente en su límite con el borde. Este comportamiento muestra un aumento leve en Borde B y un alza brusca en Borde A.

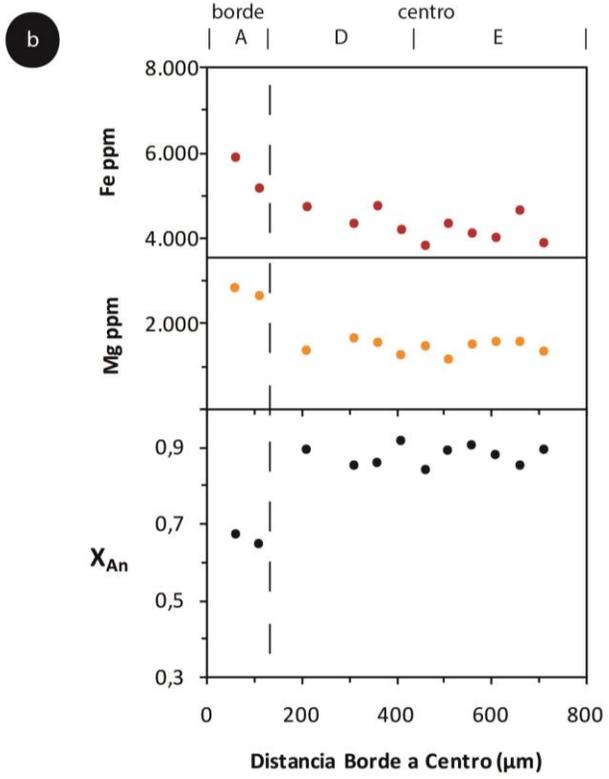
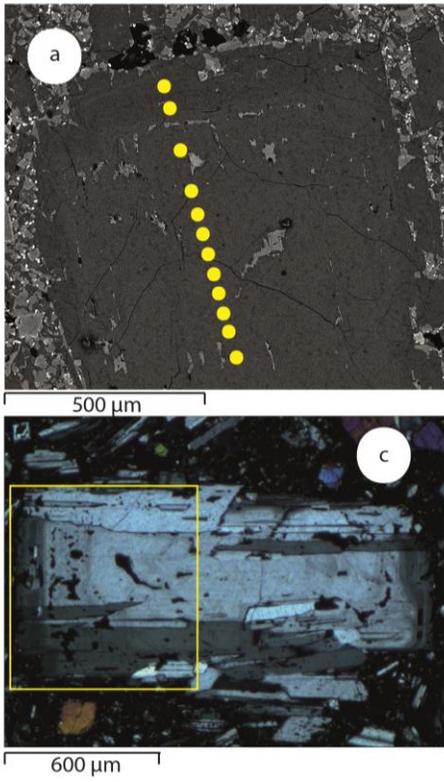
PL11



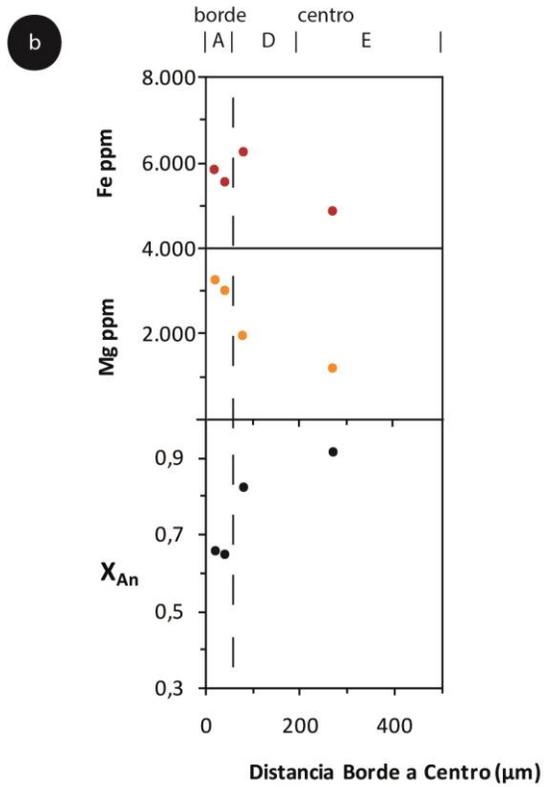
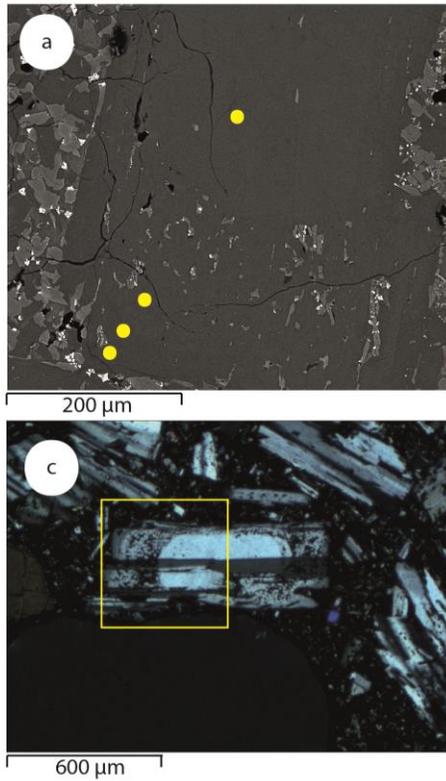
PL12



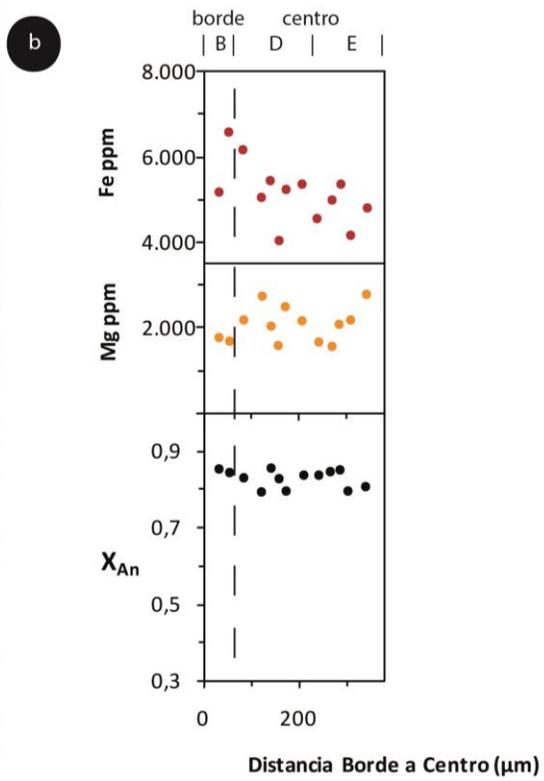
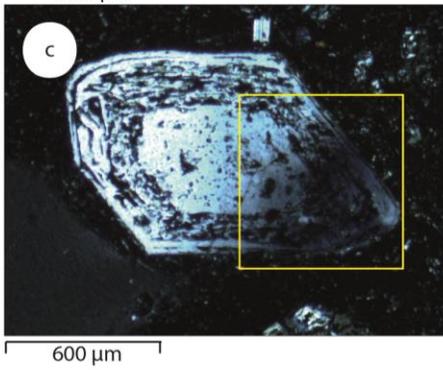
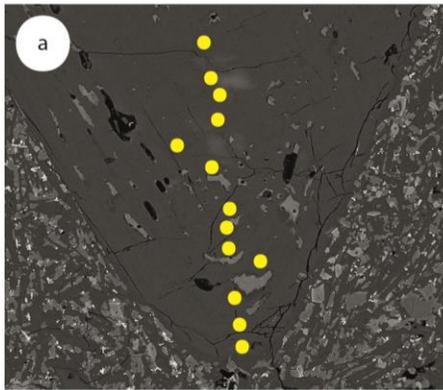
PL13



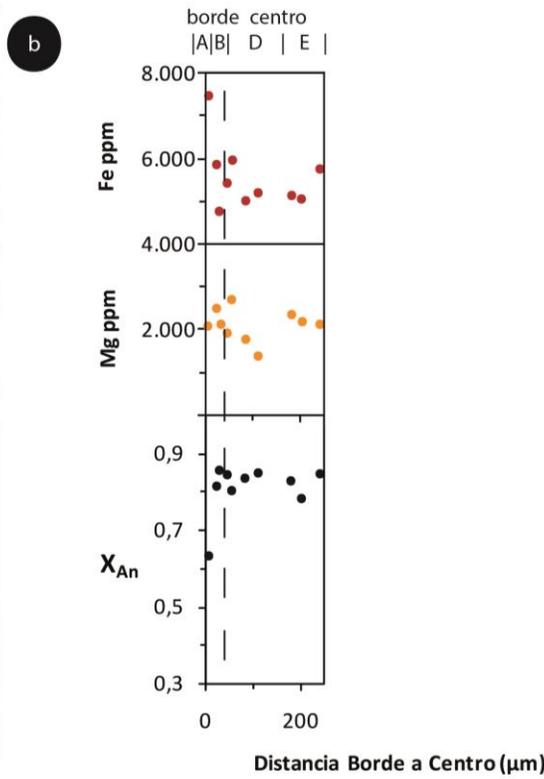
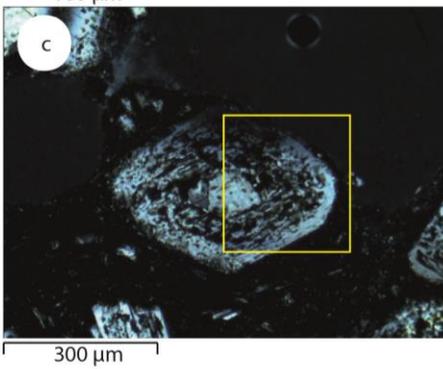
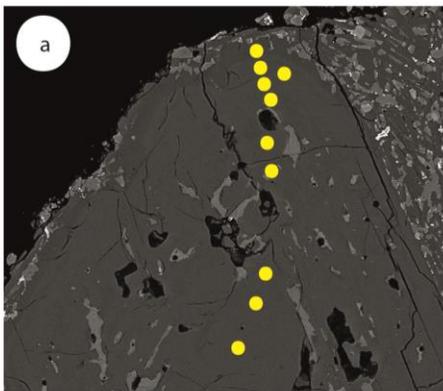
PL14



PL15



PL16



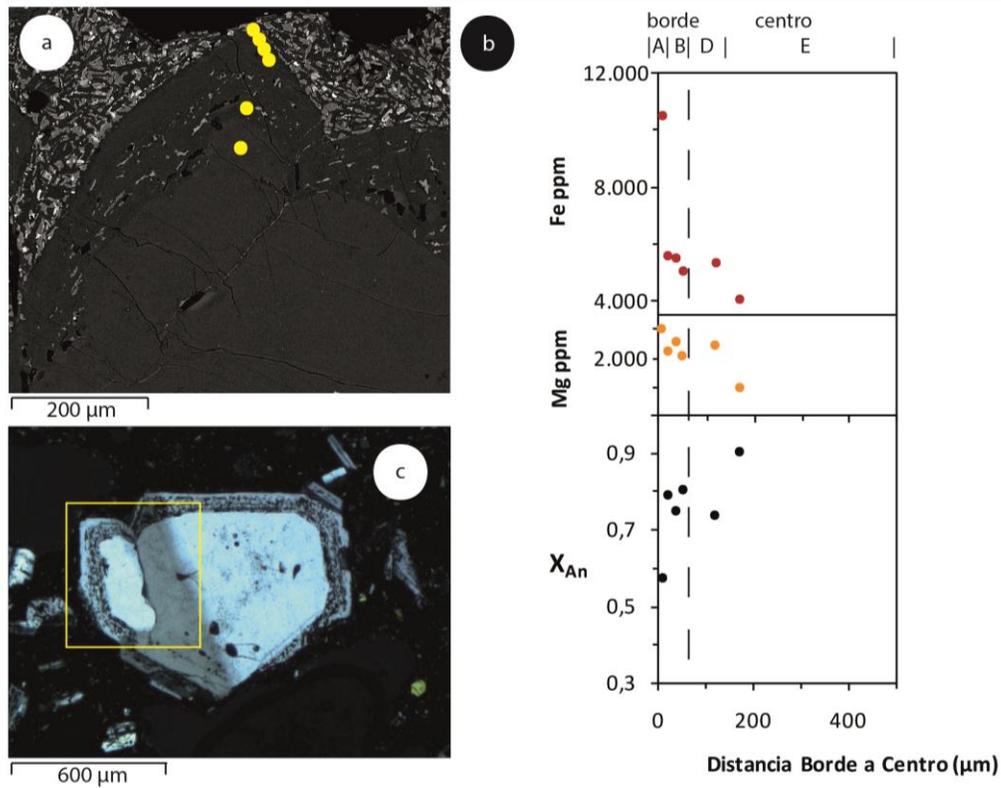


Figura 43: Análisis composicional en plagioclasa de la unidad Casablanca 2, plagioclasas PL11, PL12, PL13, PL14, PL15, PL16 y PL17. La vista “a” muestra una imagen SEM de la zona descrita del cristal con los puntos de disparo en amarillo. “b” resume el contenido de Fe (rojo, en ppm), Mg (naranja, en ppm) y anortita (negro, en fracción mineral) a lo largo del cristal; la línea punteada divide el centro del borde y las letras mayúsculas representan diferentes sectores (ver texto). La fotografía “c” es una vista completa en microscopio óptico del cristal examinado; en amarillo el área aproximada cubierta por la imagen SEM.

### **Casablanca 3**

El número de cristales descritos es 5. Los cristales se dividen en cinco segmentos (A, B, C, D, E) los tres primeros del borde y los otros del centro (Figura 44 PL01 b, PL04 b, PL05 b, PL07 b, PL09 b).

Borde A es el borde del cristal, de composición  $An_{50}$ , 13000 ppm Fe y 3000 ppm Mg.

Borde B está solo a 20  $\mu m$  del borde, presenta zonación oscilatoria con tendencia a aumentar el contenido de anortita hacia el centro,  $An_{60-85}$ , 4500-6500 ppm Fe y 1000-3000 ppm Mg.

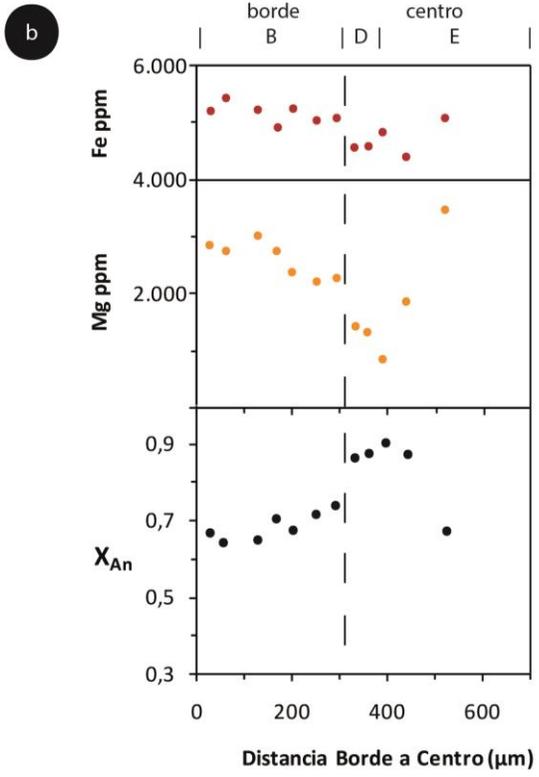
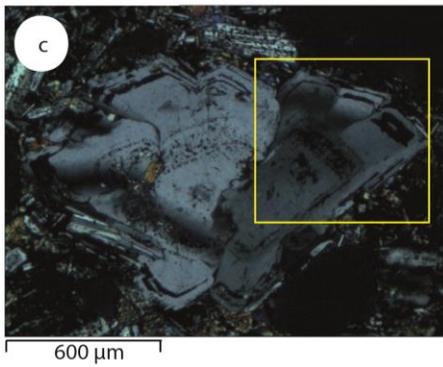
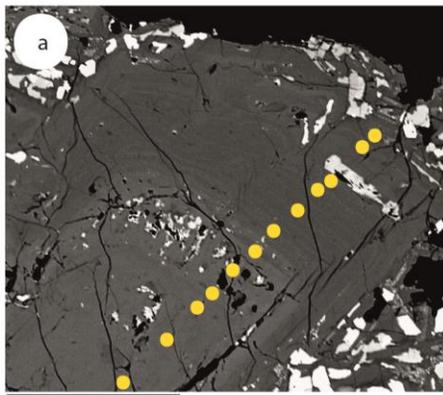
La zona Borde C está presente solo en cristal después de B, posee textura zonada oscilatoria de contenido  $An_{30-50}$ , 8000-14000 ppm Fe y 1000-2000 ppm Mg.

Centro D posee sieve moderada a intensa y algunas inclusiones, en el rango  $An_{65-85}$ , 5000-14000 ppm Fe y 1500-3500 ppm Mg.

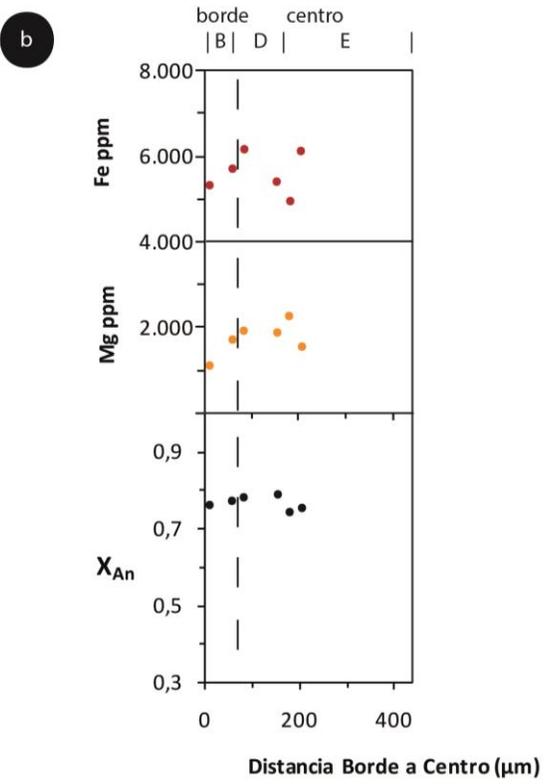
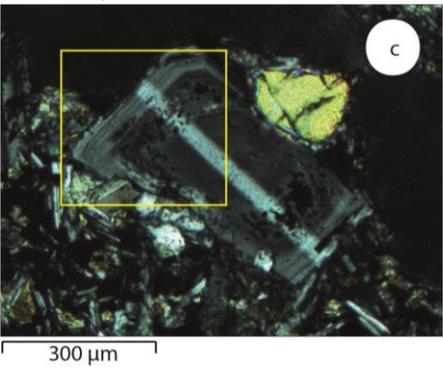
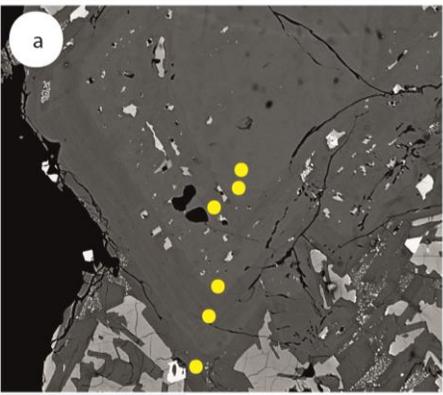
Finalmente en el Centro E con algunas inclusiones de composición  $An_{50-90}$  en general con tendencia a disminuir hacia el centro, 4000-13000 ppm Fe aumentando hacia el centro y 500-3500 ppm Mg oscilatoria.

Desde el centro, Fe y Mg disminuyen su concentración en Centro E y luego aumentan en Centro D. Borde C oscila desde valores muy altos hasta disminuir en Borde B, también oscilante pero que aumenta progresivamente hasta los valores más altos en Borde A.

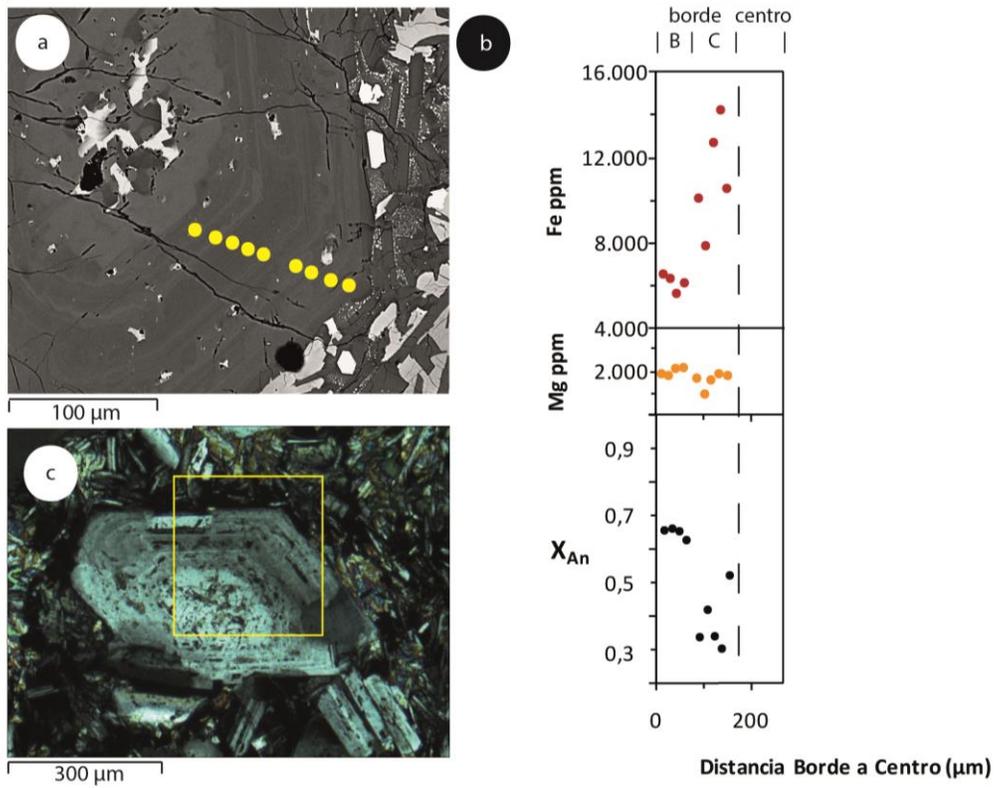
PL01



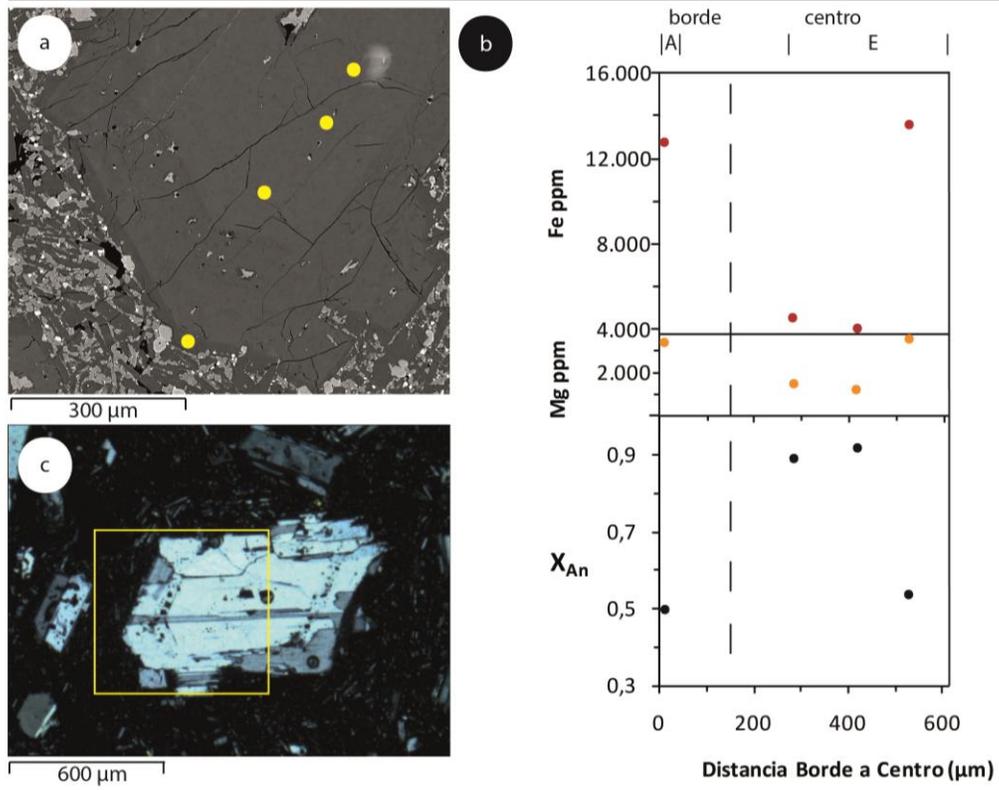
PL04



PL05



PL07



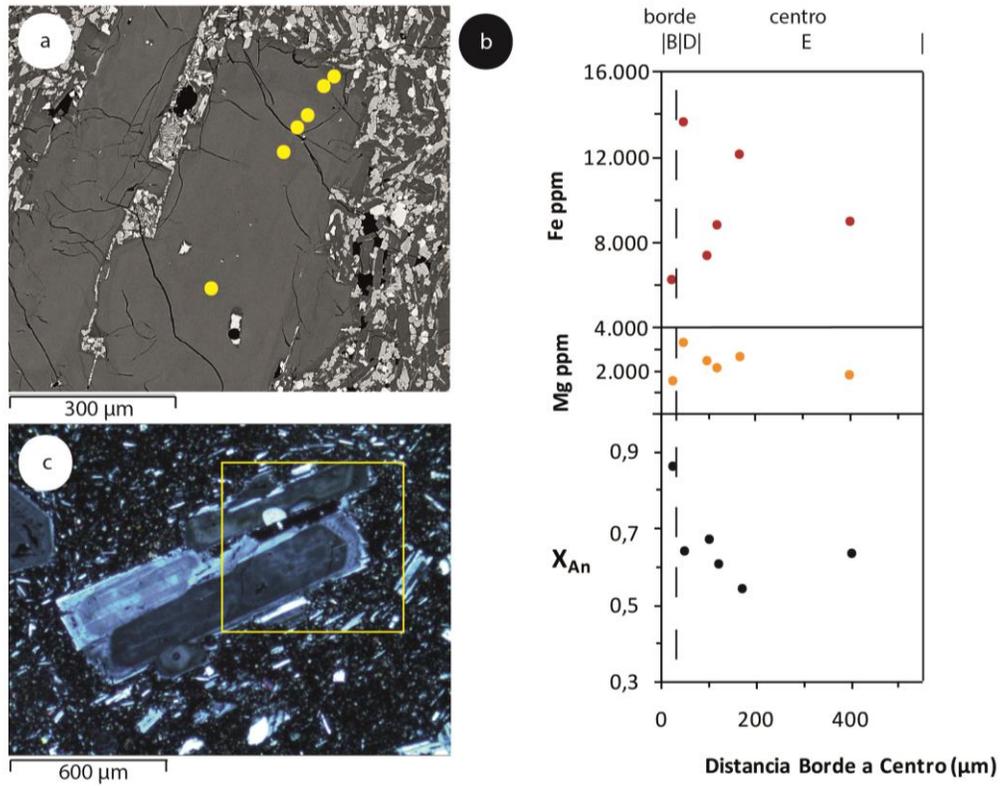


Figura 44: Análisis composicional en plagioclasa de la unidad Casablanca 3, plagioclasas PL1, PL4, PL5, PL7 y PL9. La vista “a” muestra una imagen SEM de la zona descrita del cristal con los puntos de disparo en amarillo. “b” resume el contenido de Fe (rojo, en ppm), Mg (naranja, en ppm) y anortita (negro, en fracción mineral) a lo largo del cristal; la línea punteada divide el centro del borde y las letras mayúsculas representan diferentes sectores (ver texto). La fotografía “c” es una vista completa en microscopio óptico del cristal examinado; en amarillo el área aproximada cubierta por la imagen SEM.

### **Cono Tipo**

Se analizan tres cristales, divididos en cuatro segmentos (A, B, D, E) que pertenecen al borde los dos primeros y al centro los otros dos (Figura 45 PL24 b, PL25 b, PL26 b).

La sección Borde A es el borde del cristal, de composición  $An_{60-65}$ , 5500-6000 ppm Fe y 2000-2500 ppm Mg.

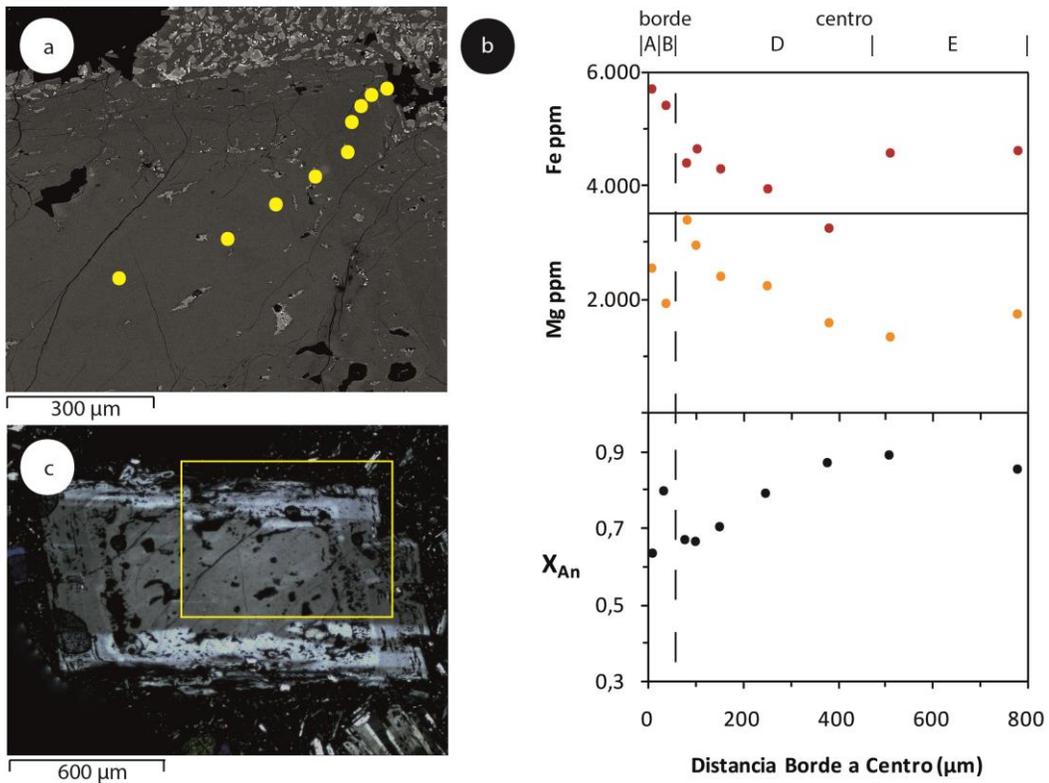
Borde B está a unos 40  $\mu m$  del borde y junto con A comprenden menos de 100  $\mu m$ , su contenido de anortita es  $An_{80-85}$ , 4500-5500 ppm Fe y 1500-2000 ppm Mg.

Centro D, con textura en tamiz moderada a intensa e inclusiones, se compone de  $An_{60-90}$ , 4000-5000 ppm Fe aumentando hacia el borde y 1500-3500 ppm Mg también aumenta.

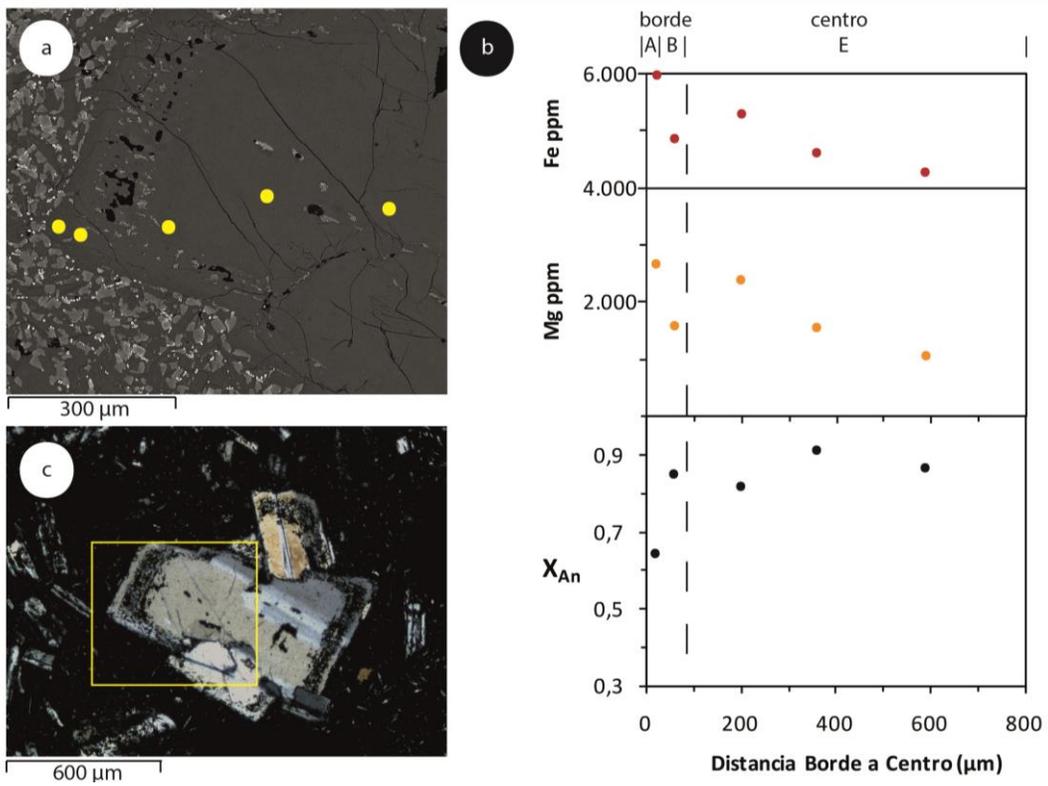
En el centro se encuentra la zona Centro E, posee sieve leve y algunas inclusiones, comprende  $An_{80-90}$ , 3000-5000 ppm Fe y 1000-2500 ppm Mg.

En esta unidad se observa que los elementos traza Fe y Mg disminuyen hacia el borde su concentración en Centro E y luego aumentan en Centro D hasta llegar a una discontinuidad con Borde B, que desde valores menores a Centro D aumenta hacia el borde hasta Borde A, donde alcanza los valores máximos.

PL24



PL25



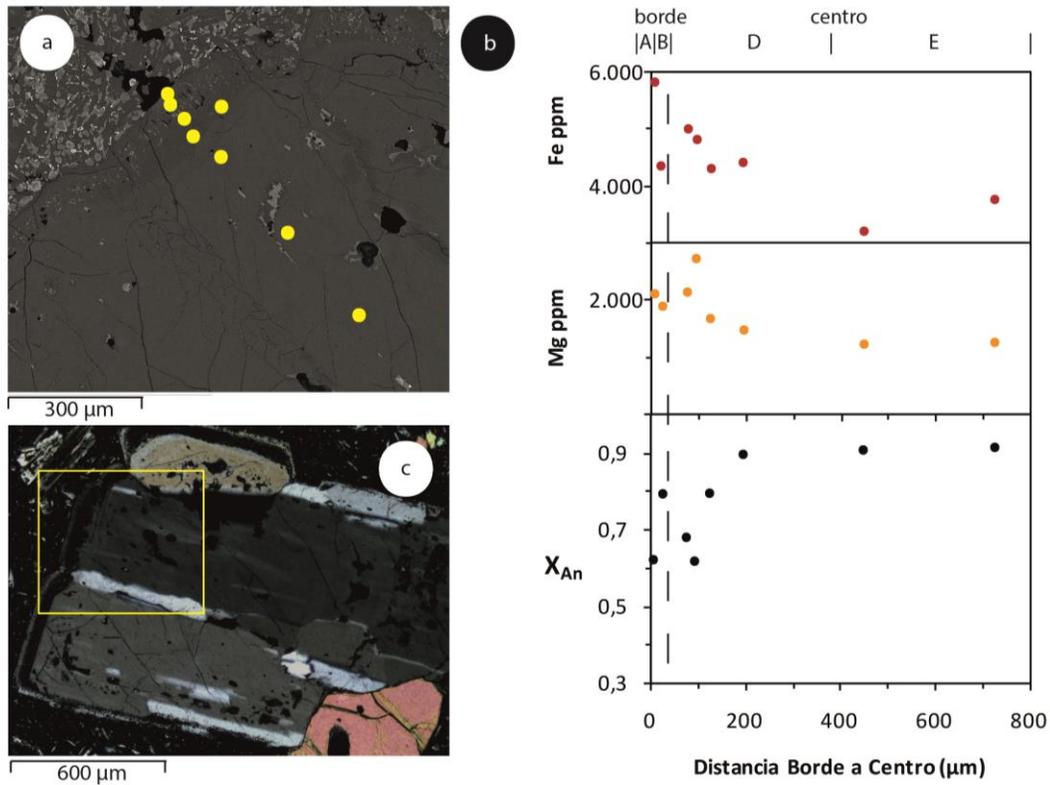


Figura 45: Análisis composicional en plagioclasa de la unidad Cono Tipo, plagioclasas PL24, PL25 y PL26. La vista “a” muestra una imagen SEM de la zona descrita del cristal con los puntos de disparo en amarillo. “b” resume el contenido de Fe (rojo, en ppm), Mg (naranja, en ppm) y anortita (negro, en fracción mineral) a lo largo del cristal; la línea punteada divide el centro del borde y las letras mayúsculas representan diferentes sectores (ver texto). La fotografía “c” es una vista completa en microscopio óptico del cristal examinado; en amarillo el área aproximada cubierta por la imagen SEM.

## **Geotermobarometría**

Temperatura y presión juegan un papel crítico en la formación de las rocas volcánicas. En un intento de estimar estas condiciones en profundidad, se emplea un termobarómetro apropiado a la mineralogía presente. En este caso se considera plagioclasa en equilibrio con el fundido. Las consideraciones termodinámicas y ecuaciones son extraídas de Putirka, 2005; los modelos usados corresponden a los llamados A y C, que conjugan temperatura y presión con errores estándar (standard error estimation, SEE) de 23 K y 1,8 kbar respectivamente. Los datos usados se encuentran en *Anexo D, Análisis de plagioclasa* bajo los protocolos expuestos en *Metodología, Análisis por microsonda electrónica y Metodología, Geotermobarometría*.

Por su parte, la geotermobarometría debe su reconocimiento a la versatilidad del método y al acercamiento que produce a información imposible de obtener en superficie. Enfoques actuales incluyen por ejemplo el equilibrio de un mineral con el líquido (vidrio) (Putirka, 2005; Mollo *et al.* 2011), que facilita su uso para casos en que no se encuentran dos fases minerales en equilibrio, y la medición de elementos traza en cristales (Bindeman *et al.*, 1997; Ginibre *et al.*, 2002), aportando un nuevo acercamiento al enfocarse en elementos comúnmente mayores como el Mg en fases en que no está presente como mayor, como en plagioclasa.

### **Equilibrio**

Los datos necesarios para hacer el cálculo de temperatura y presión se obtienen, para el caso de la plagioclasa, del análisis de microsonda electrónica (EMPA) que incluye composición del centro de los cristales, con textura *sieve*, y del borde, sin esta textura (ver sección Resultados, Análisis de zonación de plagioclasa), y para el caso del fundido (vidrio ausente en las muestras), de la composición de roca total, que puede considerarse una buena aproximación dado el bajo porcentaje de fenocristales en proporción a la masa fundamental (ver *Resultados, Descripción con microscopio óptico*).

Se toman en consideración los rasgos petrográficos de equilibrio (y desequilibrio) presentes, como la reabsorción, reflejados principalmente en la textura *sieve* que afecta a sectores específicos del cristal dependiendo de la unidad; en las restantes zonas del cristal se espera que la presión estimada disminuya hacia el borde, de lo contrario el análisis se considera inválido por lo poco realista que resultaría un descenso del magma en la corteza (aumento de presión).

### **Contenido de agua**

El contenido del agua cumple un rol fundamental en el comportamiento del magma y es una variable importante en el geotermómetro. Por la naturaleza del ambiente de subducción, se espera que el magma no sea completamente anhidro; por otra parte hay características que no apuntan a un contenido alto de agua (>4% en peso): vidrio prácticamente ausente (respaldado por la presencia de textura subofítica e intergranular, (ver *Resultados, Análisis de texturas*) o de plagioclasas mayores a An<sub>90</sub> en algunas

unidades (ver *Resultados, Química mineral, Plagioclasa*), argumentos propuestos en Sisson y Grove (1993). Cabe señalar que la ausencia de hornblenda no necesariamente es evidencia de un contenido de agua bajo (Sisson y Grove, 1993)

Para estimar el contenido de agua se usa una aproximación basada en Zimmer *et al.*, 2010:

$$H_2O \text{ \% en peso } \pm 1,2 = \exp[(1,26-THI)/0,32],$$

con THI el índice tholeiítico, que se obtiene del promedio de FeO (% en peso) en las muestras con MgO (% en peso) =  $4 \pm 1$  dividido en el promedio de FeO (% en peso) en las muestras con MgO (% en peso) =  $8 \pm 1$ , es decir

$$THI = [FeO/(MgO=4 \pm 1)] / [FeO/(MgO=8 \pm 1)]$$

Se obtiene un promedio global del contenido de agua de 2,91 % en peso (N=20). Por cada unidad, se tienen los siguientes resultados de H<sub>2</sub>O % en peso: Casablanca 1 =  $2,81 \pm 1,2$ ; Casablanca 2 =  $2,91 \pm 1,2$ ; Casablanca 3 =  $2,79 \pm 1,2$ ; Cono Tipo =  $1,75 \pm 1,2$ . En las unidades que no existen datos con MgO % en peso adecuado se usa el dato mayor (o menor según corresponda) disponible y si no hay datos cercanos, se usa un promedio de todos los valores de MgO % en peso mayores (o menores) de todas las unidades; para el termobarómetro se asume el valor central calculado de contenido de H<sub>2</sub>O.

### **Presiones y temperaturas**

La presión obtenida para Casablanca 1 se encuentra en el intervalo 2 a  $8 \pm 1,8$  kbar (Figura 46 a), con una concentración de datos en 2,5 kbar. Existe un grupo de datos que registran presiones mayores a 3 kbar que corresponden a análisis de borde externo del cristal (Borde A) o al centro afectado por textura *sieve* y relleno simultáneamente al borde externo (Centro E), y por lo tanto representan la plagioclasa que más se aleja del equilibrio con un fundido de composición inicial (sin fenocristales), estimada en base a roca total.

Para Casablanca 2, el rango es de 3 a  $6 \pm 1,8$  kbar (Figura 46 b) y los datos se agrupan mayoritariamente entre 3 a 4 kbar; datos con mayor presión corresponden principalmente a cristales de borde más externo (Borde A) o que pudieran tener *sieve* y relleno posterior (Centro D y Centro E).

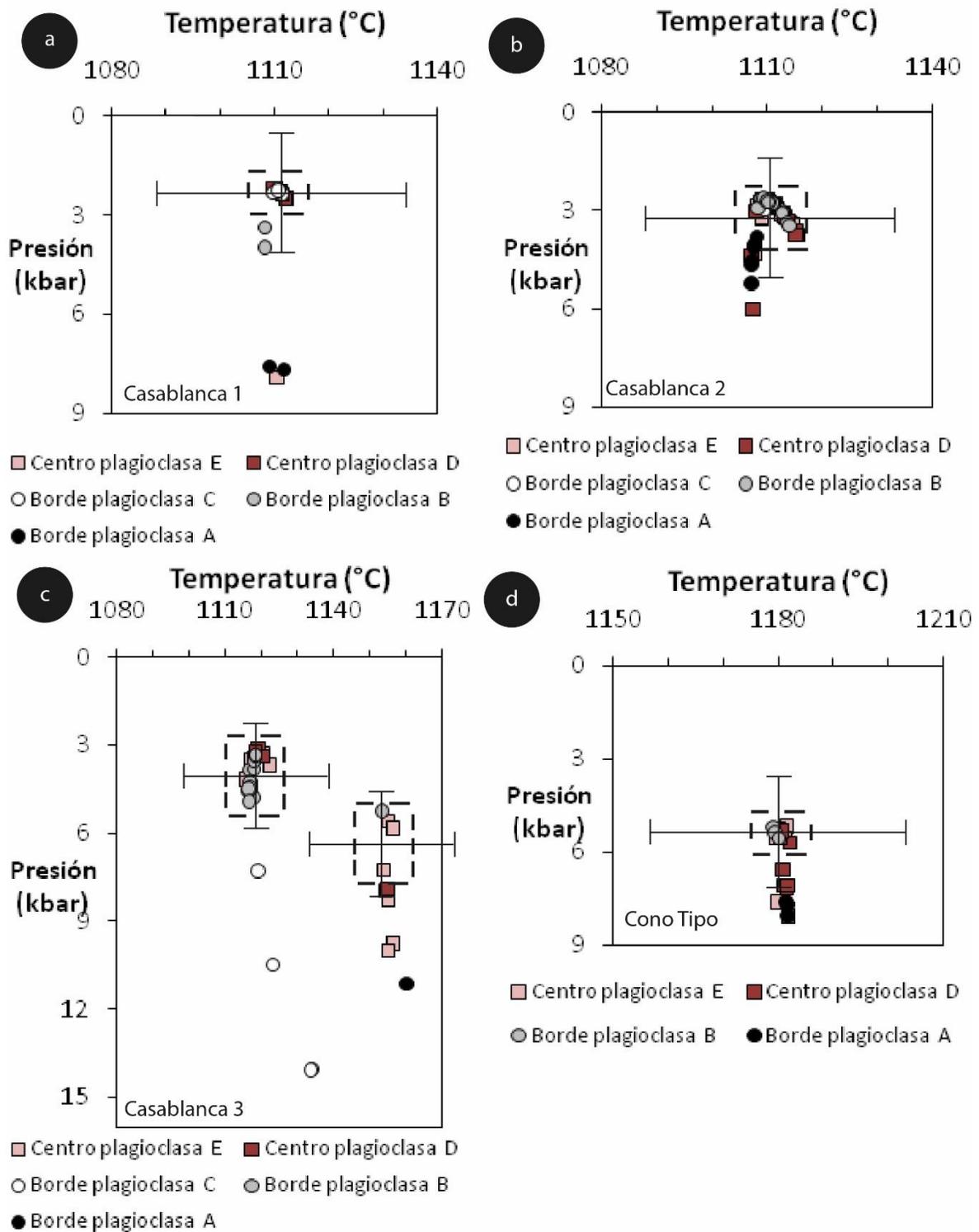
En Casablanca 3 los datos van desde 3 hasta  $14 \pm 1,8$  kbar (Figura 46 c) y se encuentran en tres poblaciones principales: una que posee la mayor parte de los datos entre 3 a 5 kbar, una moderadamente poblada entre 5 a 11 kbar de alta temperatura y una serie de cinco datos de borde de plagioclasa de 7 hasta 14 kbar que forman parte de la zonación oscilatoria de un cristal (Borde C).

Los resultados en la unidad Cono Tipo arrojan una presión entre 5 y  $8 \pm 1,8$  kbar (Figura 46 d), ubicados en dos grupos, uno de 5 a 6 kbar y otro con presiones mayores que posee

análisis de borde externo (Borde A) pero también de centro que se espera estén más cerca de un equilibrio con el fundido inicial.

El rango de temperatura en Casablanca 1 es de 1112 a 1116  $\pm 23$  °C (Figura 46 a) y en Casablanca 2 se obtiene un valor de 1126 a 1133  $\pm 23$  °C (Figura 46 b), cifras que considerando el margen de error podrían ser equivalentes. En Casablanca 3 es de 1095 a 1139  $\pm 23$  °C (Figura 46 c), en un rango amplio que incluye las temperaturas de las otras unidades. Cono Tipo alcanza valores sustancialmente más altos en comparación a todas las otras unidades con 1179 a 1182  $\pm 23$  °C (Figura 46 d).

Existen sectores que sistemáticamente arrojan condiciones de presión poco realistas. En particular el Borde A, correspondiente a la zona más externa de los cristales (en todas las unidades). Esto puede explicarse debido a una incongruencia entre los datos de fundido y de cristal; dado que el fundido está estimado en base a la composición de roca total, es representativa en estadios iniciales de equilibrio, pero no en etapas finales cuando los fenocristales ya están previamente conformados. Asimismo el contenido de agua (en el fundido) va a aumentar a medida que se forman los fenocristales, así como también podría disminuir por otros efectos, como una descompresión. De esta manera, no se puede saber con exactitud la presión de equilibrio de esta zona, pero es claro que está sometida a una variación brusca en sus condiciones, ya sean estas físicas o químicas. El borde C es otro sector que arroja presiones altas en Casablanca 3 (Figura 46 c). Corresponde a una zonación oscilatoria muy contrastante en menos de 100 micrones (Figura 44, PL05 b) resultado probablemente de variaciones locales u otros procesos, pero un aumento de presión desde 5 hasta más de 15 kbar es una situación improbable en la corteza terrestre.



**Figura 46:** Presiones y temperaturas calculadas con el geotermobarómetro basado en el equilibrio plagioclasa-fundido (Putirka, 2005) para las unidades Casablanca 1 (a, N=20), Casablanca 2 (b, N=73), Casablanca 3 (c, N=37) y Cono Tipo (d, N=22). Errores estándar (SEE) de 23 °C y 1,8 kbar para todas las medidas. El recuadro punteado muestra la(s) zona(s) con mayor densidad de puntos en cada unidad. Los círculos representan análisis de borde y los cuadrados de centro de los cristales, las letras (A, B, C, D y E) se basan en la clasificación de la sección *Resultados, Análisis de zonación de plagioclasa* (Imágenes 40 a 43) y representan sectores con diferencias morfológicas y composicionales.

## 5 | Discusión

### Similitudes y diferencias en el CVA

#### Texturas

Los diferentes centros eruptivos estudiados del complejo volcánico poseen abundantes similitudes en las texturas de sus rocas. Se analizan las unidades Casablanca 1, Casablanca 2, Casablanca 3 y Cono Tipo que poseen idénticas texturas.

La textura cumulofírica se origina a partir de fenocristales que se agrupan disminuyendo el área en contacto con el fundido y generando un ahorro de energía para el conjunto; además supone una nucleación heterogénea de los cristales.

Existen numerosas texturas de desequilibrio presente en la mayoría de los cristales de todas las unidades. La textura de reabsorción revela un estado de desequilibrio del cristal de olivino con el fundido provocada por un cambio en las condiciones del sistema, como una disminución en la presión, una mezcla de magma o algún otro cambio composicional, que es preservada por una posterior solidificación que interrumpe este desequilibrio. La textura zonada deja en evidencia un desequilibrio entre las condiciones del fundido y de este mineral; es de tipo oscilatoria en todos los casos estudiados. Asociada a las zonaciones de los fenocristales de plagioclasa, se encuentra la textura *sieve*, que se asocia a rocas calcoalcalinas, como es el presente caso. La causa del desequilibrio en la formación de esta textura es causa de debate, una posibilidad es que la cristalización de plagioclasa en profundidad es seguida por una reabsorción parcial provocada por una disminución de presión en un magma deficiente en agua (en esta etapa, el fundido en contacto con el núcleo del cristal puede formar, en orden: plagioclasa, inclusiones de otros minerales o inclusiones fluidas) y culminada con la cristalización de plagioclasa más sódica en condiciones de menor presión en el exterior del cristal (Vance, 1965); otra opción considera la mezcla de magmas como el mecanismo más común, capaz de explicar un desequilibrio y un posterior cambio composicional en los cristales de plagioclasa (Eichelberger, 1975) o una combinación de recarga con efectos convectivos en cámaras magmáticas someras (Singer *et al.*, 1995). En esta textura, un mineral perteneciente a una inclusión en el núcleo supone una cristalización posterior, en este caso se pueden encontrar óxidos de Fe o plagioclasa de la misma composición que el borde del cristal; el tamaño del núcleo representa el tamaño mínimo de los cristales formados inicialmente.

En la masa fundamental domina la textura intergranular en piroxeno entre plagioclasa, con microlitos de plagioclasa subhedrales y orientados aleatoriamente, rodeados por

piroxeno anhedral de tamaño similar o menor, que no necesariamente implica una génesis anterior de la plagioclasa. La textura intergranular representa una evolución de la textura subofítica, también presente en algunas unidades, y puede suponer un cambio menor en el porcentaje de vidrio; sin perjuicio de que ambas texturas se asocian contenido limitado de vidrio.

### **Geoquímica**

En general la geoquímica de las unidades Casablanca 1, Casablanca 2, Casablanca 3, Cono Tipo y Cráter Rayhuén muestran tendencias similares a través de los diagramas, lo que podría significar una evolución bajo las mismas condiciones o una fuente común. Sin embargo, hay una serie de particularidades que podrían contradecir lo anterior y deben ser estudiadas.

En cuanto a los elementos mayores, se debe considerar que el rango composicional de las rocas estudiadas está acotado a basaltos y andesitas basálticas (desde 3 hasta 7% en peso MgO o 50-57% SiO<sub>2</sub>) y no se espera que existan grandes diferencias entre las muestras. La textura porfírica presente en todas las unidades abre la posibilidad de un mecanismo de cristalización fraccionada operando a nivel del complejo; para comprobarlo se realiza un modelo de cristalización fraccionada. El modelo supone la existencia de un magma parental para una serie de rocas desde el cual evoluciona debido a la cristalización de un cierto porcentaje de algunos minerales de una composición determinada hasta una composición final. Idealmente se utiliza un magma primario basado en la composición de Iherzolita (#Mg = 66-75, Cr > 1000 ppm, Ni > 400 ppm), pero al no existir muestras que cumplan este criterio, se determina como el magma con mayor % MgO en peso, donde coinciden muestras de Casablanca 2, Casablanca 3 y Cono Tipo (ANT-9, ANT-2 y ANT-5 respectivamente, con 6,6% MgO en peso); se selecciona ANT-5 de Cono Tipo por su menor contenido de SiO<sub>2</sub> y por la existencia de una muestra en la misma unidad con el contenido menor de MgO (ANT-11, 3,8% MgO en peso). De esta manera, la composición de los cristales fraccionados (olivino y plagioclasa) se toma en base a análisis de Cono Tipo: olivino "ANT-5, 2" y plagioclasa "PL25 R5" que son análisis en cristales con composiciones promedio de MgO y SiO<sub>2</sub> respectivamente (Tabla 3).

**Tabla 3: Resultados del modelo de cristalización fraccionada para las unidades estudiadas en el CVA.**

	%	MgO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO*	MnO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Magma primario <sup>a</sup>	77,0	6,55	51,49	18,85	8,52	0,15	10,09	2,83	0,50	0,85	0,17
Plagioclasa <sup>b</sup>	15,4	0,07	45,93	34,50	0,55	0,00	17,32	1,45	0,02	0,15	0,00
Olivino <sup>c</sup>	7,7	39,20	39,28	0,00	21,17	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Magma fraccionado <sup>d</sup>		3,80	55,78	17,14	9,12	0,17	8,00	3,72	0,93	1,10	0,24
Magma calculado		3,80	54,71	17,12	8,96	0,17	9,49	3,61	0,70	1,20	0,24
Diferencia		0,00	-1,07	-0,01	-0,15	0,00	1,48	-0,11	-0,23	0,10	0,00

**a** corresponde a la muestra ANT-5, seleccionada por %MgO en peso más alto. Perteneciente a la unidad Cono Tipo.

**b** PL25 R5, análisis de plagioclasa de la unidad Cono Tipo con valores intermedios de SiO<sub>2</sub>.

**c** ANT-5, 2; análisis de olivino de la unidad Cono Tipo con valores intermedios de MgO.

**d** ANT-11, muestra con %MgO en peso menor perteneciente a la unidad Cono Tipo.

\*Fe total calculado como FeO.

Los resultados muestran que para producir un magma 3,8 % en peso MgO, ~55 % en peso SiO<sub>2</sub> es necesario un 23% en peso de cristalización fraccionada de un basalto (~15% plagioclasa y ~8 % olivino) (Tabla 3). En términos generales, el modelo sigue la tendencia de los datos para todos los elementos y unidades (Figura 33), con la excepción de la unidad Cráter Rayhuén, que escapa de la tendencia con valores altos de K y Ti, pero más crítico es en el caso del contenido bajo de Fe y P, mostrando composiciones imposibles de alcanzar con el fraccionamiento modelado. La existencia de un magma parental con un contenido de MgO mayor en solo 1% en peso al magma supuesto, permitiría alcanzar dichos valores de Fe sin otras modificaciones adicionales, no así el contenido de P que parece responder a otro mecanismo diferenciador.

El diagrama REE muestra un leve enriquecimiento de LREE con respecto a HREE similar para todas las unidades, salvo Cráter Rayhuén donde este enriquecimiento es un poco mayor; además se observa un comportamiento plano de las HREE en todas las unidades (Figura 34). Este fraccionamiento puede atribuirse a la presencia de olivino, ortopiroxeno o clinopiroxeno en la fuente, por el incremento de un orden de magnitud desde La a Lu en estos minerales, junto con la presencia de espinela en la fuente, ya que la fusión parcial de una peridotita de espinela puede producir un líquido con un leve enriquecimiento de LREE con respecto a HREE y un patrón de HREE plano (Dostal, *et al.*, 1977; Manetti, *et al.*, 1979). Es posible modelar la variación del patrón de REE para distintos grados de fusión de una peridotita de espinela y obtener un patrón de tierras raras normalizado a condrito para compararlo con los de CVA (Tabla 4).

**Tabla 4: Datos usados en el cálculo del diagrama de REE de fusión parcial.**

Manto primitivo	Coeficientes de partición (Kd) en basaltos <sup>a</sup>							Media ponder. de Kd	Fusión parcial en equilibrio <sup>b</sup>		
	Conc. <sup>c</sup> (ppm)	Condrito <sup>d</sup> (ppm)	Normalización	OI	Opx	Cpx	Esp	OI 55%, Opx 15%, Cpx 25%, Spi 5%	5%	9%	15%
La	0,687	0,237	2,90	0,007	0,02	0,056	0,010	0,021	41,24	26,49	17,24
Sm	0,444	0,153	2,90	0,007	0,05	0,445	0,006	0,123	17,40	14,38	11,40
Eu	0,168	0,058	2,90	0,007	0,05	0,474	0,006	0,130	16,68	13,90	11,11
Yb	0,493	0,170	2,90	0,049	0,34	0,542	0,008	0,214	11,46	10,19	8,74
Lu	0,074	0,025	2,91	0,045	0,42	0,506	0,021	0,215	11,45	10,19	8,75

**a** Coeficiente de partición mineral/fundido para basaltos y andesitas basálticas para REE en olivino, ortopiroxeno y clinopiroxeno (Fujimaki *et al.*, 1984) y en espinela (Nagasawa *et al.*, 1980).

$$\frac{c^L}{c_0} = \frac{1}{D_0 + F(1 - P)}$$

**b**

donde  $C^L$  es la concentración de un elemento traza en el líquido,  $C_0$  es la concentración en el sólido sin fundir,  $D_0$  es el coeficiente de distribución del sólido original,  $F$  es la fracción de fundido producido en la fusión parcial y  $P$  es el coeficiente de distribución de los minerales (en este caso de fusión en equilibrio,  $P=D_0$ ) (Shaw, 1970).

**c** Concentraciones de REE en el manto primitivo (Sun y McDonough, 1989).

**d** Concentraciones Condrito (Sun y McDonough, 1989).

La Figura 47 muestra que un 5% de fusión parcial de una peridotita de espinela puede producir un fundido con abundancias de REE similares a las de las unidades Casablanca 1 y Cono Tipo, un 9% de fusión se aproxima a lo observado para Casablanca 2 y Casablanca 3. Una explicación posible para el comportamiento diferente de Cráter Rayhuén es un mayor grado de fusión (~15%) con un proceso de enriquecimiento en LREE posterior, como contaminación cortical.

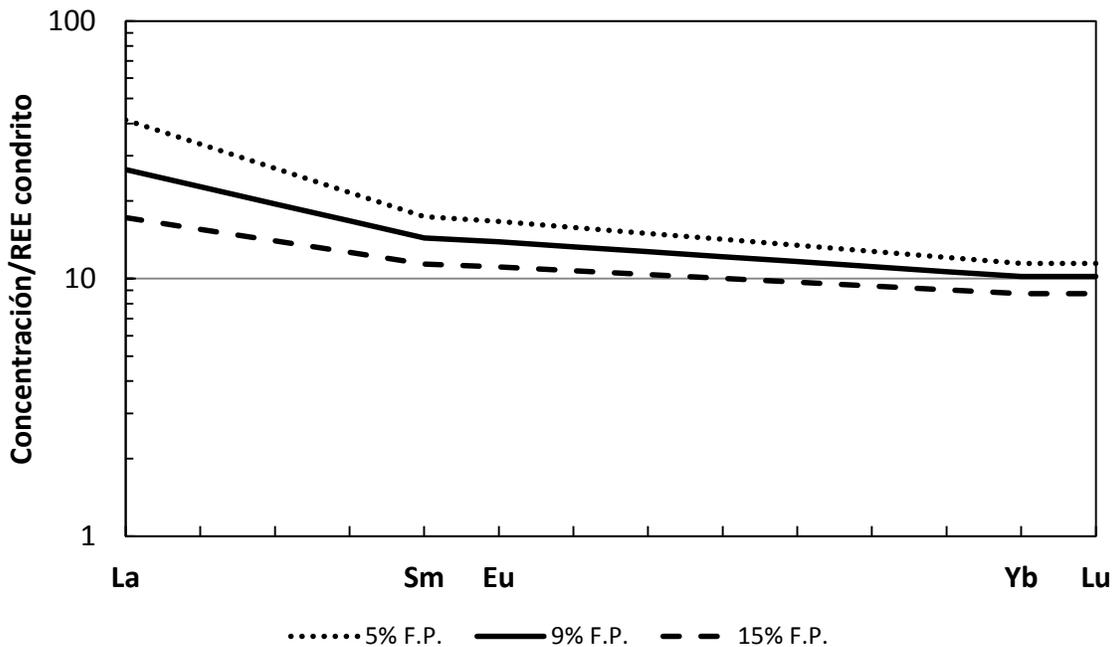
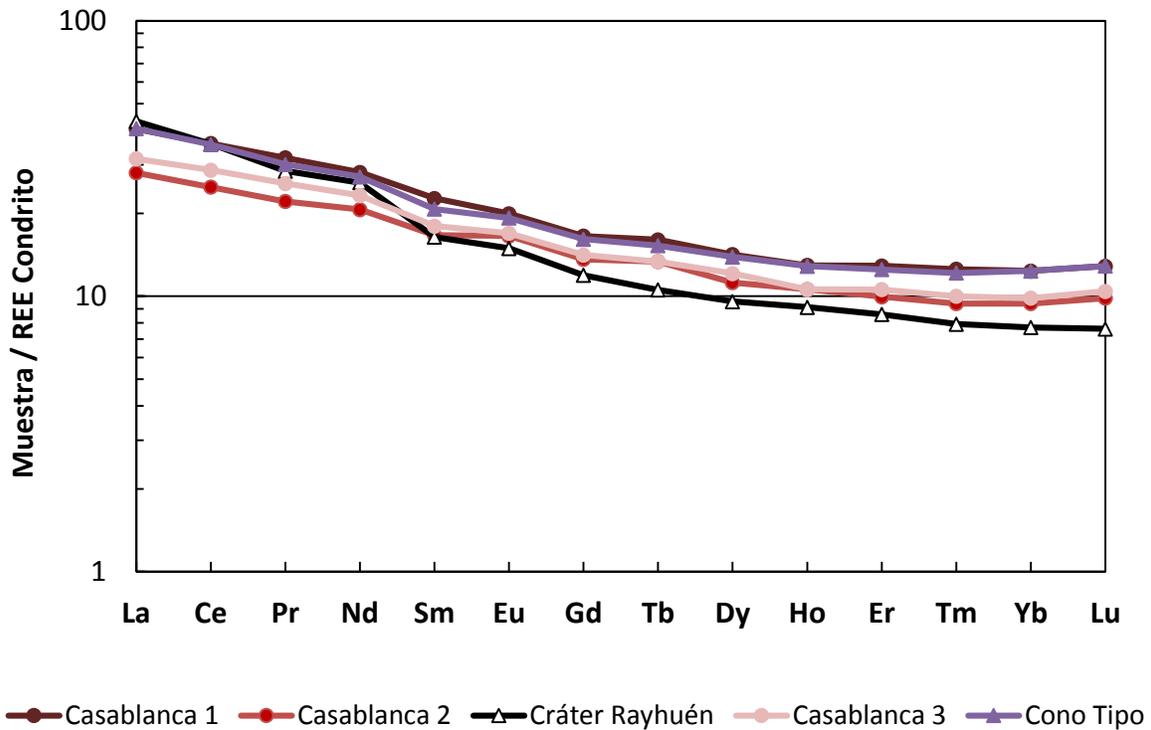


Figura 47: Arriba, patrón de REE en CVA (copia de Figura 34). Abajo, patrón de REE normalizado a condrito calculado para fusión parcial en equilibrio de un manto primitivo con una mineralogía 55% olivino, 25% clinopiroxeno, 15% ortopiroxeno y 5% espinela. Curvas de 5, 9 y 15% de fusión parcial. Los cálculos incluyen las REE graficadas usando la ecuación 15 de Shaw (1970). Para detalles, ver Tabla 4.

En base al diagrama de elementos incompatibles (Figura 35), las anomalías negativas de Nb y Ta son comunes en basaltos de zonas de subducción y se asocian con la presencia en el manto de una fase estable bajo las condiciones PT generadas por este

contexto geodinámico (Briqueu, *et al.*, 1984). Anomalías positivas de Pb también son comunes en zonas de subducción, así como también pueden serlo de Sr (Pearce *et al.*, 1984; McCulloch y Gamble, 1991). La anomalía negativa de P es exclusiva de Cono Tipo y también se comprueba al revisar diagrama bivariable MgO (Figura 33); puede ocurrir por procesos que incluyen: (1) retención de una fase que contiene fósforo en la fuente del magma, (2) metasomatismo de un fluido en un manto empobrecido en incompatibles, (3) fraccionamiento de una fase que contenga fósforo desde el magma y (4) contaminación por corteza continental (McCuaig *et al.*, 1994). Si se asume que todas las unidades tienen un origen mantélico común por todas las similitudes geoquímicas expuestas, los procesos (1) y (2) parecen poco probables; por otra parte las unidades Casablanca 1, Casablanca 2, Casablanca 3 y Cono Tipo no poseen fases que contengan fósforo y no están particularmente enriquecidas en este elemento, luego un fraccionamiento (3) no explicaría el bajo contenido de fósforo en Cráter Rayhuén, dejando como mecanismo más probable de empobrecimiento la contaminación cortical. Una asimilación de corteza continental se asocia con aumento del contenido de SiO<sub>2</sub> y elementos incompatibles, anomalías negativas de Nb y Ti, fraccionamiento de HREE (McCuaig *et al.*, 1994); características presentes en Cráter Rayhuén. El pico negativo de Zr, a diferencia de P, es extensivo a todas las unidades, pudiendo ser la causa más probable un fraccionamiento moderado de circón.

La proporción entre elementos altamente incompatibles de coeficiente de partición similar durante la fusión mantélica como Cs-Rb-Ba (Figura 36), es constante para todas las unidades analizadas, indicando una fuente homogénea. La pendiente refleja la proporción entre los elementos en la fuente (McDonough, 1989) por lo que cualquier variación en ella evidencia que la fuente posee heterogeneidades (Bougault *et al.*, 1980). Por su parte, la proporción entre razones de elementos altamente incompatibles de coeficiente de reparto similar, como Ce, K, Th, Tb y Nb (Figura 37) muestra una pendiente común para todas las unidades, sugiriendo una fuente mantélica única para todas las rocas (Rollinson, 1993). Procesos como cristalización fraccionada o fusión parcial no hacen variar esta proporción en caso de tener una fuente mantélica común.

### **Análisis zonaciones en plagioclasa**

Como se indicó, la textura en tamiz se encuentra en prácticamente la totalidad de los fenocristales de plagioclasa mayores a 1 mm en todas las unidades y supone una etapa de reabsorción que puede ocasionarse, entre otras circunstancias, por una descompresión de un magma pobre en agua durante su ascenso (Vance, 1965; Nelson y Montana, 1992) o bien por una mezcla con un magma que represente un desequilibrio (Tsuchiyama, 1985). Si se considera que estos mecanismos ocasionan un cambio en el contenido de anortita de la plagioclasa (excepto en situaciones muy particulares, como la mezcla con un fundido de composición idéntica, improbable para un magma con cierto nivel de fraccionamiento y diferenciación), a través del estudio de elementos menores en plagioclasa puede establecerse el origen de esta textura, desde que estos componentes (en particular, Fe y Mg) responden a cambios químicos de una manera distinta que a

cambios físicos (presión, temperatura, contenido de agua) (Ginibre *et al.*, 2002; Hammouda *et al.*, 1996).

Para la unidad Casablanca 1, el análisis composicional ( Figura 42) muestra un contenido de anortita relativamente constante (Centro E, Centro D, Borde C) con una leve disminución hacia el borde (Borde B) y un descenso brusco en el borde externo (Borde A) así como también en algunas zonas internas. Estas zonas internas corresponden a parches, es decir plagioclasa que ocupa espacios reabsorbidos y tiene composición idéntica al borde externo ( Figura 42 PL21 b, ver *Resultados, Análisis de textura, Casablanca 1*). Los elementos menores se comportan de la misma manera que el contenido de anortita en el tramo principal, es decir disminuyen levemente de centro a borde, lo que puede explicarse simplemente por el fraccionamiento de un magma basáltico (óxidos de hierro, plagioclasa, olivino). La textura *sieve* junto con el aumento en el contenido de Fe (y leve de Mg), está acompañada por un descenso abrupto del contenido de anortita en el borde, contrario a lo esperado de una recarga de magma máfico, sugiriendo que la recarga está asociada a una disminución en la presión de agua, en una cantidad suficiente como para provocar la cristalización de plagioclasa más sódica pese a la composición más máfica del fundido (Wörner, 2007). La pérdida de volátiles puede generarse por una descompresión, lo que significaría que la recarga y el ascenso del magma residente ocurren con poca diferencia de tiempo.

En la unidad Casablanca 2 (Figura 43) la plagioclasa muestra un contenido de anortita constante en el centro (Centro E) y una caída moderada en la zona con textura *sieve* (Centro D). En el borde hay una aparente pérdida en la continuidad de la tendencia con zonas de valores altos y oscilantes de anortita (Borde C y Borde B) hasta una baja brusca en el borde externo (Borde A). Por su parte, Fe y Mg oscilan en valores moderados desde el centro del cristal hasta el sector de textura en tamiz, donde tiende a aumentar, más al borde retoma discontinuamente valores moderados que aumentan bruscamente en el borde externo. Esto podría corresponder a dos episodios de reabsorción. El primero, más cerca del centro podría corresponder a una recarga de un magma máfico sin un cambio significativo en el contenido de agua; el segundo, en el borde del cristal correspondería a una recarga de magma acompañada por una descompresión, ya que presenta las mismas características expuestas para el borde en Casablanca 1, vale decir el aumento en la concentración de Fe y Mg asociado con una pérdida de volátiles que permite la cristalización de plagioclasa más sódica.

La variación de la composición de plagioclasa para los fenocristales de Casablanca 3 (Figura 44) consiste en un contenido alto de anortita oscilante en el centro que disminuye progresivamente desde el centro y un borde de composición constante. Al igual que en la plagioclasa de otras unidades, puede haber parches de plagioclasa más albitica en el centro. Los elementos menores varían junto con el contenido de anortita con una tendencia a aumentar levemente hacia el borde en las zonas centrales del cristal (Centro E, Centro D), y por otra parte se mantiene relativamente invariante en el borde, en el

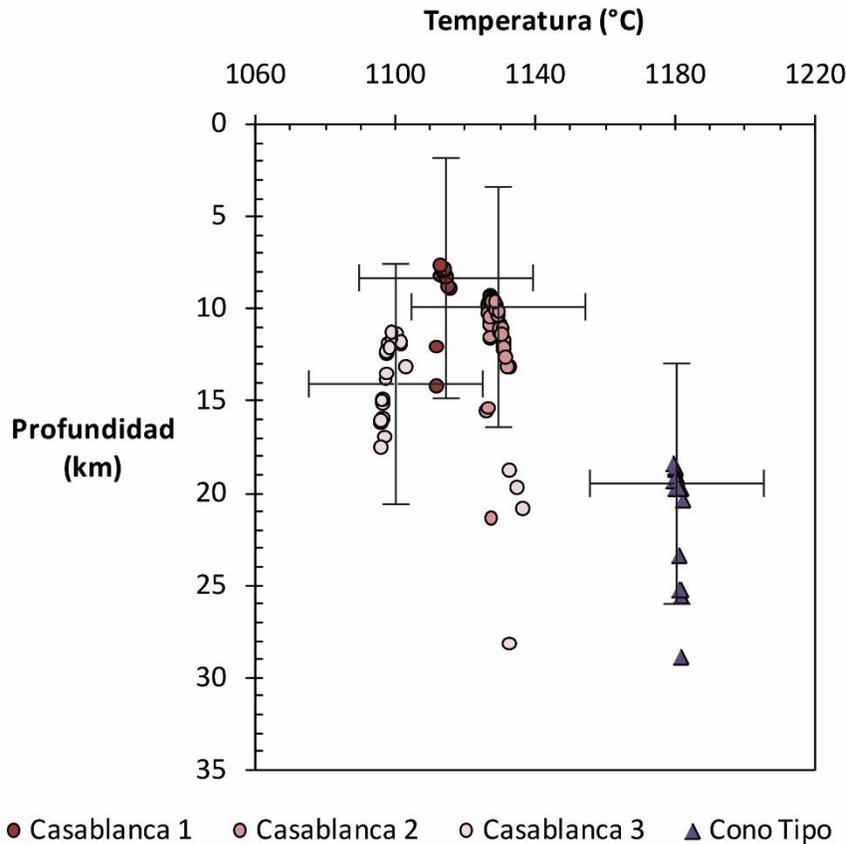
borde del cristal (Borde B). La correlación negativa entre An y Fe en el centro se puede explicar, al igual que en las otras unidades, con una recarga de magma máfico seguida de una descompresión y, después, una segunda etapa de cristalización en condiciones estables, reflejados en los contenidos de Fe y An.

La plagioclasa en la unidad Cono Tipo (Figura 45) se caracteriza por un contenido de anortita que disminuye suavemente desde el centro (Centro E) hasta la zona de textura sieve (Centro D), luego aumenta (Borde B) para volver a decaer abruptamente en el borde externo (Borde A). Fe y Mg muestran una tendencia a aumentar de centro a borde, una disminución abrupta y discontinua y luego una segunda tendencia al alza, mucho más abrupta en pocos micrones. Este comportamiento es idéntico al estudiado para la unidad Casablanca 2, tanto para anortita como para los elementos trazas. Luego se espera que esté afectada por dos procesos similares a los descritos para esa unidad.

### **Ascenso a través de la corteza**

A partir de las profundidades estimadas, se realiza un diagrama de profundidad y temperatura de las unidades Casablanca 1, Casablanca 2, Casablanca 3 y Cono Tipo. La profundidad se obtiene a través del balance de fuerzas para fluidos estáticos en el campo gravitatorio que relaciona presión con profundidad:  $P = pgh$ , donde P es la presión, p es la densidad, g es la aceleración de gravedad y h es la altura de la columna hidrostática, que en este caso corresponde a la profundidad. Se usa un valor de gravedad de  $9,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . La densidad se basa en el cálculo de Hackney *et al.* (2006) que modela entre otras la región de Osorno ( $40,9^{\circ}\text{S}$ ) y estima un valor promedio de  $2,865 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  en los primeros 20 km correspondientes a corteza superior y media. La presión, la temperatura y el error de los datos se toman del geotermobarómetro usado en este trabajo, el error es de  $\pm 23 \text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $\pm 6,4 \text{ km}$  (Figura 48).

A grandes rasgos, los resultados arrojan que las plagioclasas de las unidades Casablanca 1, Casablanca 2 y Casablanca 3 cristalizan en condiciones similares de temperatura y profundidad ( $1080\text{-}1150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 2 a  $\sim 15 \text{ km}$ ) sugiriendo la existencia un reservorio bajo esas condiciones que ha permitido el fraccionamiento de la plagioclasa y la construcción de un estratocono. A una temperatura y profundidad considerablemente mayor, las plagioclasas de la unidad Cono Tipo cristalizan en condiciones de  $1160\text{-}1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$  y entre 15 y 25 km.



Casablanca 1 N=17		Casablanca 2 N=65		Casablanca 3 N=26		Cono Tipo N=19	
Profundidad	Temperatura	Profundidad	Temperatura	Profundidad	Temperatura	Profundidad	Temperatura
Mediana:	Mediana:	Mediana:	Mediana:	Mediana:	Mediana:	Mediana:	Mediana:
8,2 km	1114,3 °C	10,0 km	1128,1 °C	14,4 km	1098,1 °C	19,7 km	1180,7 °C
Promedio:	Promedio:	Promedio:	Promedio:	Promedio:	Promedio:	Promedio:	Promedio:
8,8 km	1114,2 °C	10,8 km	1128,7 °C	15,0 km	1103,8 °C	20,9 km	1180,7 °C
Desv. Est.:	Desv. Est.:	Desv. Est.:	Desv. Est.:	Desv. Est.:	Desv. Est.:	Desv. Est.:	Desv. Est.:
1,7 km	1,0 °C	1,9 km	1,6 °C	3,8 km	13,5 °C	3,1 km	0,8 °C

**Figura 48:** Diagrama de profundidad y temperatura de las unidades Casablanca 1, Casablanca 2, Casablanca 3 y Cono Tipo. El error es de  $\pm 23$  °C y  $\pm 6,4$  km, representados en la cruceta que se ubica en la mediana de cada unidad. Las principales variables estadísticas (número de datos, mediana, promedio y desviación estándar) de las mediciones de profundidad y temperatura para cada unidad se encuentran en los recuadros inferiores. Detalles de la estimación en el texto.

### Origen común de los centros eruptivos

Se ha asumido que las rocas de Casablanca 1, Casablanca 2, Casablanca 3, Cono Tipo y Cráter Rayhuén poseen un origen común, dadas sus composiciones principales (basaltos a andesitas basálticas, calcoalcalinos) y ubicaciones espaciales, su erupción pudo estar controlada por las mismas estructuras de escala regional (SFLO, dispuesta ~N-S). Los análisis petrográficos no arrojan mayores diferencias en la composición y distribución de cristales, y las texturas son comunes a todos los centros. Sin embargo, al modelar una cristalización fraccionada, Cráter Rayhuén muestra diferencias atribuibles a cierto grado de contaminación cortical que no está presente en las demás unidades, así como también al comparar patrones de REE, existen diferencias atribuibles a diferentes

grados de fusión parcial (a partir de una peridotita de espinela) y/o contaminación con rocas de la corteza. Por otra parte, la geotermobarometría arroja valores distintos de temperatura y presión para la plagioclasa de Cono Tipo, suponiendo una fuente y evolución separada de las demás. Las unidades correspondientes a las emisiones del Volcán Casablanca ocurren en épocas diferentes (Casablanca 1: 250 ka, Casablanca 2: <250 ka, Casablanca 3: 2,9 ka) bajo contextos distintos (pre, intra y post glaciación respectivamente) pero su sistema magmático no parece ser influenciado, más aún, aparentemente compartirían un reservorio dadas sus características geoquímicas prácticamente idénticas y profundidades de cristalización de plagioclasa similares.

Por lo tanto, no es posible asegurar la existencia de un reservorio en la corteza común para todos los centros eruptivos, pero dadas las similitudes expuestas y los patrones lineales en los diagramas de elementos incompatibles, la fuente mantélica probablemente sea común.

## Modelo evolutivo

La actividad de los centros eruptivos se inicia en el Pleistoceno Medio hace aproximadamente 250 ka con la emisión de lavas y productos volcánicos de la unidad Casablanca 1 de composición 51-52 % SiO<sub>2</sub> (Figura 49). Este estratovolcán sufre posteriormente erosión glacial intensa. Junto con otros centros de emisión conforma una alineación noreste-suroeste y está ubicado por sobre la traza inferida del SFLO.

Después, en el Pleistoceno Superior, se produce la efusión de lavas de la unidad Casablanca 2 que se extienden más allá del flanco del volcán y están conformadas por basaltos y andesitas basálticas de composición 51-52 % SiO<sub>2</sub>. Este edificio posee rasgos de erosión glacial y sobreyace a la unidad Casablanca 1.

Posteriormente a las glaciaciones que afectaron la morfología de los edificios volcánicos del CVA emerge una serie de centros efusivos recientes. Uno de ellos es el Cráter Rayhuén (2,9 ka) que está ubicado al oeste del volcán Casablanca y comprende hasta 1,5 km de diámetro. Se compone de bombas, lapilli y líticos, dominado por basaltos y andesitas basálticas de composición 50-57 % SiO<sub>2</sub>.

Casablanca 3 es el último conjunto de lavas emitidas desde el cráter principal del Volcán Casablanca. Su composición es de 51-53 % SiO<sub>2</sub>. Se estima una edad menor a 2,9 ka.

Finalmente, de edad aproximada 2,1 ka, emerge un conjunto de conos piroclásticos con lavas asociadas, a 2 km hacia el suroeste del cráter del Volcán Casablanca. Corresponden a la unidad Cono Tipo y su composición comprende el rango 51-63 % SiO<sub>2</sub>.

El volcanismo de la zona podría relacionarse con el SFLO; los centros eruptivos definen un patrón sigmoideal que sugiere una relación genética entre las estructuras del basamento y el ascenso de magmas (Lara y Moreno, 2012).

Las lavas eruptadas en este período se caracterizan por presentar firmas calcoalcalinas, composiciones principalmente basálticas a andesítico basálticas, evidencias texturales de desequilibrio químico, leve enriquecimiento de LREE con respecto a HREE y patrones de HREE planos.

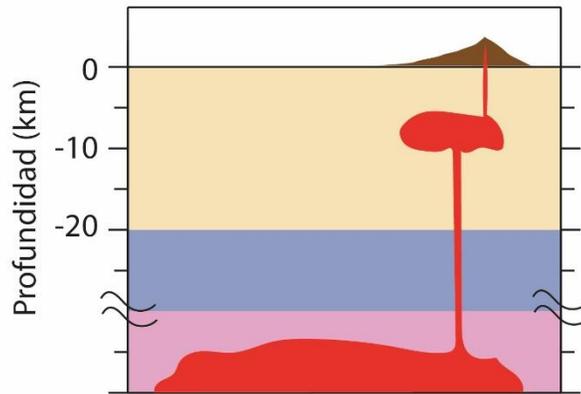
### 350-150 ka Casablanca 1

#### Características

Temperatura	1080-1150 °C
Presión	0,5-4 kbar
H <sub>2</sub> O	~3 % en peso
Profundidad	2-15 km

#### Procesos

FP	5% peridot sp
CF	23% plg, ol
Mezcla	recarga máfica y descompresión



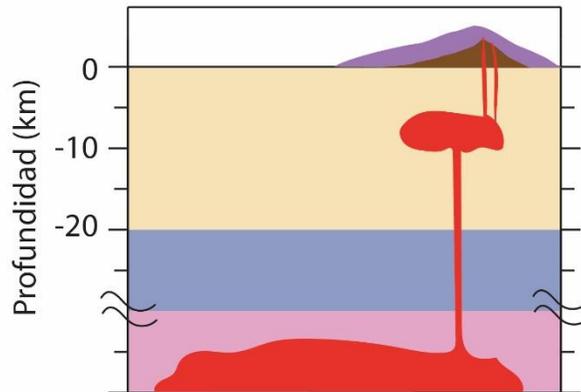
### 130-12 ka Casablanca 2

#### Características

Temperatura	1080-1150 °C
Presión	0,5-4 kbar
H <sub>2</sub> O	~3 % en peso
Profundidad	2-15 km

#### Procesos

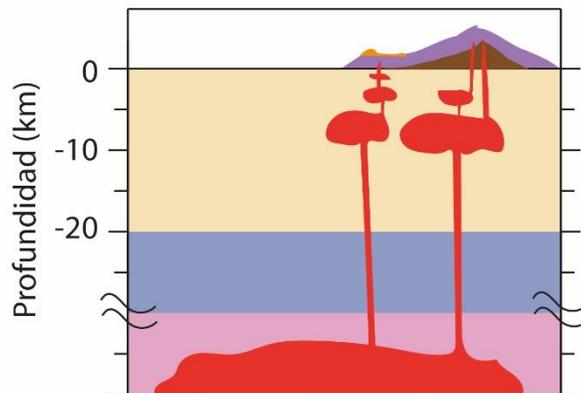
FP	9% peridot sp
CF	23% plg, ol
Mezcla	2 recargas, descom- presión final



### 2,9 ka Cráter Rayhuén

#### Procesos

FP	15% peridot sp
CF	? % ol, plg
Contaminación cortical	



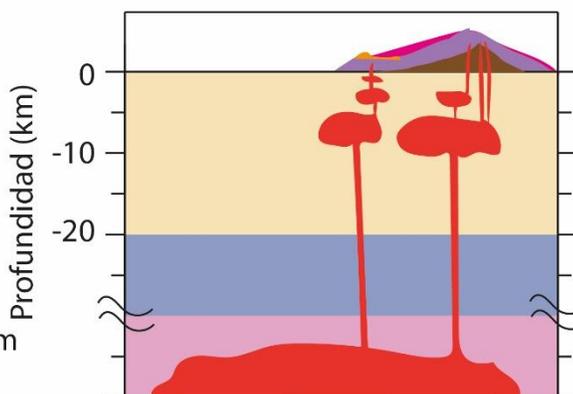
<2,9 ka Casablanca 3

Características

Temperatura	1080-1150 °C
Presión	0,5-4 kbar
H2O	~3 % en peso
Profundidad	2-15 km

Procesos

FP	9% peridot sp
CF	23% plg, ol
Mezcla	recarga máfica, descom presión, cristalización



2,1 ka Cono Tipo

Características

Temperatura	1160-1200 °C
Presión	4-7 kbar
H2O	~2 % en peso
Profundidad	15-25 km

Procesos

FP	9% peridot sp
CF	23% plg, ol
Mezcla	2 recargas, descom presión final

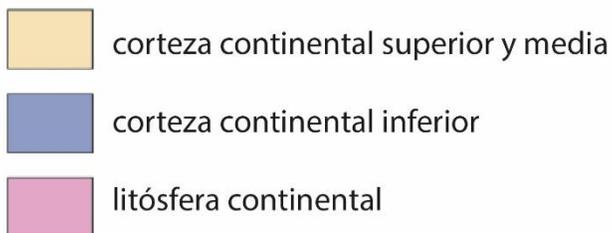
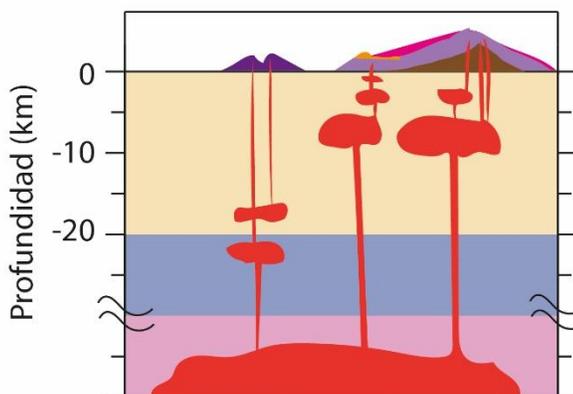


Figura 49: Modelo evolutivo de los centros eruptivos Volcán Casablanca, Cráter Rayhuén y Cono Tipo, con los procesos y características principales de temperatura, presión, contenido de agua y profundidad estimadas.

## 6 Conclusiones

Los productos volcánicos estudiados de las unidades Casablanca 1, Casablanca 2, Cráter Rayhuén, Casablanca 3 y Cono Tipo varían desde basaltos hasta andesitas basálticas, de composición 50-57% SiO<sub>2</sub> en peso. La mayoría de las rocas es de afinidad calcoalcalina, o en el límite calcoalcalino-tholeiítico.

En los basaltos y andesitas basálticas, las texturas predominantes son porfírica e intergranular. En general son rocas pobres en fenocristales, aunque el espectro contempla de 10% a 40% de la roca. Los fenocristales principales son olivino y plagioclasa.

En los basaltos y andesitas basálticas, se presentan texturas de reabsorción, en tamiz y zonaciones oscilatorias. El origen del desequilibrio más probable consiste en recargas de magma máfico asociadas a episodios de descompresión (en las unidades Casablanca 1, Casablanca 2, Casablanca 3 y Cono Tipo) inferido a partir de las variaciones de Fe, Mg y An en plagioclasa.

La fuente mantélica sería única para todas las rocas y no hay evidencias de mezcla o contaminación en su origen, basándose en las características geoquímicas similares de todas las rocas. En base a los patrones de LREE y HREE, la fusión de una peridotita de espinela es la fuente más probable.

La cristalización fraccionada es un mecanismo diferenciador que puede explicar las variaciones desde basaltos a andesitas basálticas en las unidades Casablanca 1, Casablanca 2, Casablanca 3 y Cono Tipo. Las rocas de la unidad Cráter Rayhuén no pueden generarse a partir de este modelo únicamente y requiere mecanismos adicionales como contaminación cortical y/o distintas tasas de fusión para ser explicadas.

A grandes rasgos, los resultados arrojan que las plagioclasas de las unidades Casablanca 1, Casablanca 2 y Casablanca 3 cristalizan en condiciones similares de temperatura y profundidad (1080-1150 °C, 2 a ~15 km) sugiriendo la existencia un reservorio de condiciones estables que ha permitido la construcción de un estratocono así como el fraccionamiento de la plagioclasa. A una temperatura y profundidad considerablemente mayor, las plagioclasas de la unidad Cono Tipo cristalizan en condiciones de 1160-1200 °C y entre 15 y 25 km. y estaría ubicado en el límite de corteza inferior, teniendo una evolución independiente.

## **Bibliografía**

AGUILERA, F., HONORES, C., LEMUS, M., NEIRA, H., PÉREZ, Y., ROJAS, J. (2014). Evaluación del recurso geotérmico de la Región de Los Lagos. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-14-57, 253 p., 2 mapas escala 1:500.000. Santiago.

BERTANI, R. (2012). Geothermal power generation in the world 2005–2010 update report. *Geothermics*, 41, 1-29.

BINDEMAN, I. N., DAVIS, A. M., & DRAKE, M. J. (1998). Ion microprobe study of plagioclase-basalt partition experiments at natural concentration levels of trace elements. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(7), 1175-1193.

BOUGAULT, H., JORON, J. L., & TREUIL, M. (1980). The primordial chondritic nature and large-scale heterogeneities in the mantle: evidence from high and low partition coefficient elements in oceanic basalts. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 297(1431), 203-213.

BRIQUEU, L., BOUGAULT, H., & JORON, J. L. (1984). Quantification of Nb, Ta, Ti and V anomalies in magmas associated with subduction zones: petrogenetic implications. *Earth and Planetary Science Letters*, 68(2), 297-308.

CEMBRANO, J., HERVÉ, F., & LAVENU, A. (1996). The Liquiñe Ofqui fault zone: a long-lived intra-arc fault system in southern Chile. *Tectonophysics*, 259(1), 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*, 471(1), 96-113.

CEMBRANO, J., SCHERMER, E., LAVENU, A., SANHUEZA, A., (2000). Contrasting nature of deformation along an intra-arc shear zone, the LOFZ fault zone, southern Chilean Andes. *Tectonophysics*, (319), 129-149.

DEMETS, C., GORDON, R. G., ARGUS, D. F., & STEIN, S. (1994). Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophysical research letters*, 21(20), 2191-2194.

DOSTAL, J., ZENTILLI, M., CAELLES, J. C., & CLARK, A. H. (1977). Geochemistry and origin of volcanic rocks of the Andes (26–28 S). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 63(2), 113-128.

EICHELBERGER, J. C. (1975). Origin of andesite and dacite: evidence of mixing at Glass Mountain in California and at other circum-Pacific volcanoes. *Geological Society of America Bulletin*, 86(10), 1381-1391.

ESCRIBANO, A (2010). Geoquímica y distribución del tamaño de cristales de plagioclasa de los depósitos piroclásticos del Cráter Rayhuén, Complejo Volcánico Antillanca, Región

de Los Lagos. *Memoria para optar al título de Geólogo; Universidad de Concepción*. (115).

FUJIMAKI, H., TATSUMOTO, M., & AOKI, K. I. (1984). Partition coefficients of Hf, Zr, and REE between phenocrysts and groundmasses. *Lunar and Planetary Science Conference Proceedings* 14, 662.

GINIBRE, C., & WÖRNER, G. (2007). Variable parent magmas and recharge regimes of the Parinacota magma system (N. Chile) revealed by Fe, Mg and Sr zoning in plagioclase. *Lithos*, 98(1), 118-140.

GINIBRE, C., WÖRNER, G., & KRONZ, A. (2002). Minor-and trace-element zoning in plagioclase: implications for magma chamber processes at Parinacota volcano, northern Chile. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(3), 300-315.

HACKNEY, R.I., ECHTLER, H.P., FRANZ, G., GÖTZE, H.-J., LUCASSEN, F., MARCHENKO, D., MELNICK, D., MEYER, U., SCHMIDT, S., TAŠÁROVÁ, Z., TASSARA, A. AND WIENECKE, S. (2006). The Segmented Overriding Plate and Coupling at the South-Central Chilean Margin (36-42° S). *The Andes* (355-374). Springer Berlin Heidelberg.

HAMMOUDA, T., PICHAVANT, M., & CHAUSSIDON, M. (1996). Isotopic equilibration during partial melting: an experimental test of the behaviour of Sr. *Earth and Planetary Science Letters*, 144(1), 109-121.

HERRON, E.M. (1981). Chile margin near latitude 38°S: evidence for a genetic relationship between continental and marine geologic features or a case of curious coincidences? *Geological Society of America*. 154, 755–760.

HERVÉ, F. (1994). The southern Andes between 39 and 44 S latitude: the geological signature of a transpressive tectonic regime related to a magmatic arc. *Tectonics of the Southern Central Andes* Springer Berlin Heidelberg. (243-248).

HICKEY, R. L., FREY, F. A., GERLACH, D. C., & LOPEZ-ESCOBAR, L. (1986). Multiple sources for basaltic arc rocks from the southern volcanic zone of the Andes (34–41 S): trace element and isotopic evidence for contributions from subducted oceanic crust, mantle, and continental crust. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 91(B6), 5963-5983.

IRVINE, T., & BARAGAR, W. (1971). A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian journal of earth sciences*, 8(5), 523-548.

JORDÁN, T. E., ISACKS, B. L., ALLMENDINGER, R. W., BREWER, J. A., RAMOS, V. A., & ANDO, C. J. (1983). Andean tectonics related to geometry of subducted Nazca plate. *Geological Society of America Bulletin*, 94(3), 341-361.

- KLEY, J.; MONALDI, C. R.; SALFITY, J. A. (1999). Along-strike segmentation of the Andean foreland: causes and consequences. *Tectonophysics*, 301(1), 75-94.
- LAHSEN, A. (1988). Chilean geothermal resources and their possible utilization. *Geothermics*, 17(2), 401-410.
- LAHSEN, A., MUÑOZ, N., & PARADA, M. A. (2010). Geothermal development in Chile. In *Proceedings World Geothermal Congress* (25).
- LARA, L., RODRÍGUEZ, C., MORENO, H., PÉREZ DE ARCE, C. (2001). Geocronología K-Ar y geoquímica del volcanismo plioceno superior-pleistoceno de los Andes del sur (39-42°S). *Revista Geológica de Chile*, 28(1).
- LARA, L. E., MORENO H. (2012). Geología del Complejo Volcánico Antillanca, Región de los Lagos. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geológica Básica XXX: xx p., 1 mapa escala 1:50.000.
- LE MAITRE, R. W., BATEMAN, P., DUDEK, A., KELLER, J., LAMEYRE, J., LE BAS, M. J., SABINE, P. A., SCHMID R., SORENSEN, H., STRECKEISEN, A., WOOLLEY, A. R. AND ZANETTIN, B. (1989). A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms, Recommendations of the International Union of Geological Sciences, Subcomission on the Systematics of Igneous Rocks. *A classification of ingeous rocks and glossary of terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematics of ingeous rocks*.
- LONGHI, JOHN, DAVID WALKER, AND JAMES F. HAYS. (1976). Fe and Mg in plagioclase. *Lunar and Planetary Science Conference Proceedings*, 7.
- LÓPEZ-ESCOBAR, L., CEMBRANO, J., & MORENO, H. (1995). Geochemistry and tectonics of the Chilean Southern Andes basaltic Quaternary volcanism (37-46 S). *Andean Geology*, 22(2), 219-234.
- LÓPEZ-ESCOBAR, L., & MORENO, H. (1994). Geochemical characteristics of the Southern Andes basaltic volcanism associated with the Liquiñe–Ofqui fault zone between 39 and 46 S. *Congreso Geológico Chileno* 7, 1388-1393).
- LUND, JOHN W.; FREESTON, DEREK H.; BOYD, TONYA L. (2005). Direct application of geothermal energy: 2005 worldwide review. *Geothermics*, 34(6), 691-727.
- MANETTI, P., PECCERILLO, A., & POLI, G. (1979). REE distribution in Upper Cretaceous calc-alkaline and shoshonitic volcanic rocks from Eastern Srednogorie (Bulgaria). *Chemical Geology*, 26(1), 51-63.
- MCCUAIG, T. C., KERRICH, R., & XIE, Q. (1994). Phosphorus and high field strength element anomalies in Archean high-magnesian magmas as possible indicators of source mineralogy and depth. *Earth and planetary science letters*, 124(1), 221-239.

- MCCULLOCH, M. T., & GAMBLE, J. A. (1991). Geochemical and geodynamical constraints on subduction zone magmatism. *Earth and Planetary Science Letters*, 102(3), 358-374.
- MOLLO, S., PUTIRKA, K., IEZZI, G., DEL GAUDIO, P., & SCARLATO, P. (2011). Plagioclase–melt (dis) equilibrium due to cooling dynamics: implications for thermometry, barometry and hygrometry. *Lithos*, 125(1), 221-235.
- MUÑOZ, J.; STERN, C.R. (1988). The Quaternary volcanic belt of the southern continental margin of South America: transverse structural and petrochemical variations across the segment between 38°S and 39°S. *Journal of South American Earth Sciences*, 1, 147-161.
- NAGASAWA, H., SCHREIBER, H.D. AND MORRIS, R.V. (1980). Experimental mineral/liquid partition coefficients of the rare Earth elements, Sc and Sr for perovskite, spinel and melilite. *Earth and Planetary Science Letters* 46: 431-437.
- NELSON, S.T. AND MONTANA, A. (1992). Sieve-textured plagioclase in volcanic rocks produced by rapid decompression. *American mineralogist*, 77, 1242-1249.
- PARDO-CASAS, F., & MOLNAR, P. (1987). Relative motion of the Nazca (Farallon) and South American plates since Late Cretaceous time. *Tectonics*, 6(3), 233-248.
- PEARCE, J. A. (1983). Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. *Hawkesworth C.J. and Norry M.J. (eds.), Continental basalts and mantle xenoliths*. Shiva, Nantwich, 230-249.
- PEARCE, J. A., HARRIS, N. B., & TINDLE, A. G. (1984). Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of petrology*, 25(4), 956-983.
- PECCERILLO, A., & TAYLOR, S. R. (1976). Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contributions to mineralogy and petrology*, 58(1), 63-81.
- PUTIRKA, K. D. (2005). Igneous thermometers and barometers based on plagioclase+liquid equilibria: tests of some existing models and new calibrations. *American Mineralogist*, 90(2-3), 336-346.
- RICKWOOD, P. C. (1989). Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements. *Lithos*, 22(4), 247-263.
- ROLLINSON, H.R. (1993). Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. Pearson Prentice Hall, Geochemistry Series, Edinburgh Gate, Harlow, England.

- SANCHEZ-ALFARO, P., SIELFELD, G., VAN CAMPEN, B., DOBSON, P., FUENTES, V., REED, A., PALMA-BEHNKE, R., MORATA, D. (2015). Geothermal barriers, policies and economics in Chile—Lessons for the Andes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 1390-1401.
- SANYAL, S. K.; HENNEBERGER, R. C.; KLEIN, C. W.; DECKER, R. W. (2002). A methodology for Assessment of geothermal Energy Reserves Associated with Volcanic Systems. *Geothermal Resources Council Transactions*, 26, 22-25.
- SAUNDERS, A. D., NORRY, M. J., & TARNEY, J. (1988). Origin of MORB and chemically-depleted mantle reservoirs: trace element constraints. *Journal of Petrology*, (1), 415-445.
- SHAW, DENIS M. (1970). Trace element fractionation during anatexis. *Geochimica et Cosmochimica*, 34(2), 237-243.
- SINGER, B. S., DUNGAN, M. A., & LAYNE, G. D. (1995). Textures and Sr, Ba, Mg, Fe, K, and Ti compositional profiles in volcanic plagioclase: clues to the dynamics of calc-alkaline magma chambers. *American Mineralogist*, 80(7-8), 776-798.
- SINGER, B. S., JICHA, B. R., HARPER, M. A., NARANJO, J. A., LARA, L. E., & MORENO-ROA, H. (2008). Eruptive history, geochronology, and magmatic evolution of the Puyehue-Cordón Caulle volcanic complex, Chile. *Geological Society of America Bulletin*, 120(5-6), 599-618.
- SISSON, T. W., & GROVE, T. L. (1993). Experimental investigations of the role of H<sub>2</sub>O in calc-alkaline differentiation and subduction zone magmatism. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 113(2), 143-166.
- SOMOZA, R. (1998). Updated azca (Farallon)—South America relative motions during the last 40 My: implications for mountain building in the central Andean region. *Journal of South American Earth Sciences*, 11(3), 211-215.
- STERN, C.R. (1989). Pliocene to present migration of the volcanic front, Andean Southern Volcanic Front. *Revista Geológica de Chile*, 16(2), 145-162.
- SUN, S. S. (1980). Lead isotopic study of young volcanic rocks from mid-ocean ridges, ocean islands and island arcs. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 297(1431), 409-445.
- SUN, S. S., & MCDONOUGH, W. F. (1989). Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1), 313-345.
- THOMPSON, R. N. (1982). Magmatism of the British Tertiary volcanic province. *Scottish Journal of Geology*, 18(1), 49-107.

TSUCHIYAMA, A. (1985). Dissolution kinetics of plagioclase in the melt of the system diopside-albite-anorthite, and origin of dusty plagioclase in andesites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 89(1), 1-16.

VANCE, J. A. (1965). Zoning in igneous plagioclase: patchy zoning. *The Journal of Geology*, 636-651.

WILKE, M., BEHRENS, H., 1999. The dependence of the partitioning of iron and europium between plagioclase and hydrous tonalitic melt on oxygen fugacity. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 137, 102-114.

WOOD, D. A., JORON, J. L., & TREUIL, M. (1979). A re-appraisal of the use of trace elements to classify and discriminate between magma series erupted in different tectonic settings. *Earth and Planetary Science Letters*, 45(2), 326-336.

ZIMMER, M.M., PLANK, T., HAURI, E.H., YOGODZINSKI, G.M., STELLING, P., LARSEN, J., SINGER, B., JICHA, B., MANDEVILLE, C. AND NYA, C.J. (2010). The Role of Water in Generating the Calc-alkaline Trend: New Volatile Data for Aleutian Magmas and a New Tholeiitic Index. *Journal of Petrology*, 51, 2511-2444.

## Anexos

### Anexo A Coordenadas

Tabla 5: Coordenadas de los sectores de toma de muestra para las distintas unidades y centros eruptivos.

Unidad	Muestra	Ubicación (WGS84, UTM)	
		E	N
Casablanca 1	ANT-10	736647	5482320
Casablanca 1	ANT-26	728520	5483875
Casablanca 1	ANT-27	725852	5486450
Casablanca 2	ANT-8	738803	5480660
Casablanca 2	ANT-9	738728	5480534
Casablanca 3	ANT-1	737937	5482372
Casablanca 3	ANT-2	738190	5482151
Casablanca 3	ANT-6	738023	5481208
Casablanca 3	ANT-7	738399	5480867
Cono Tipo	ANT-3	737966	5481275
Cono Tipo	ANT-4	737966	5481275
Cono Tipo	ANT-5	737966	5481275
Cono Tipo	ANT-11	737019	5480214
Cono Tipo	ANT-12	737067	5479946
Cono Tipo	ANT-13	737067	5479946
Cono Tipo	ANT-15	736786	5479540

## Anexo B Análisis de roca total

Tabla 6: Composición de roca total para todas las muestras recolectadas para este estudio. Elementos mayores expresados en porcentaje en peso, wt% y trazas en partes por millón, ppm. Datos sin normalizar, FeO\* corresponde a Fe total expresado como FeO. Los valores de LOI negativo presentes en algunas muestras nunca son mayores a 0,4% en peso y se atribuyen a errores en la manipulación de la muestra en su tratamiento.

	Casablanca 1			Casablanca 2		Casablanca 3		
	ANT-10	ANT-26	ANT-27	ANT-8	ANT-9	ANT-1	ANT-2	ANT-6
SiO <sub>2</sub>	55,20	53,50	52,68	51,71	51,30	50,72	51,44	50,83
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17,86	18,12	18,67	18,43	18,21	18,20	18,29	18,19
FeO*	7,52	8,04	7,82	8,57	8,42	8,49	8,46	8,29
MnO	0,14	0,15	0,14	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
MgO	3,87	3,88	4,01	6,58	6,53	6,18	6,55	6,35
CaO	7,82	9,64	9,99	9,95	9,89	9,73	9,97	9,83
Na <sub>2</sub> O	3,64	3,28	3,14	2,85	2,82	2,83	2,81	2,78
K <sub>2</sub> O	1,03	0,69	0,61	0,48	0,49	0,51	0,47	0,49
TiO <sub>2</sub>	1,01	1,01	0,96	0,86	0,83	0,85	0,85	0,83
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,28	0,22	0,21	0,16	0,17	0,18	0,16	0,18
LOI	0,74	0,00	0,38	-0,12	-0,23	-0,09	-0,01	-0,03
Total	99,12	98,53	98,61	99,62	98,58	97,75	99,14	97,89
Sc	25	29	30	30	29	29	29	29
Be	1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
V	225	243	239	227	224	228	226	225
Ba	326	218	202	154	153	160	154	153
Sr	446	420	442	448	444	432	444	437
Y	22	19	18	15	15	15	16	16
Zr	102	73	66	54	54	57	55	55
Cr	50	60	70	110	110	100	100	110
Co	24	24	24	38	38	36	38	37
Ni	30	< 20	20	70	70	70	70	70
Cu	50	100	60	80	80	70	80	80
Zn	70	70	60	80	70	60	70	70
Ga	19	19	18	18	17	17	18	17
Ge	1	1	1	1	1	1	1	1
As	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
Rb	23	14	12	10	10	11	10	10
Nb	3	2	2	2	1	2	2	1
Mo	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
Ag	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
In	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2
Sn	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Sb	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
Cs	1,4	0,5	< 0.5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
La	12,1	8,8	7,9	7	6,3	6,2	6,7	6,3

	Casablanca 1			Casablanca 2		Casablanca 3		
	ANT-10	ANT-26	ANT-27	ANT-8	ANT-9	ANT-1	ANT-2	ANT-6
Ce	27,4	20,3	18,1	15,5	15	14,9	15,2	15,2
Pr	3,67	2,78	2,62	2,14	2,06	2,16	2,11	2,15
Nd	16,1	12,3	11,1	9,6	9,7	9,8	9,9	9,8
Sm	4	3,3	3,1	2,6	2,5	2,6	2,6	2,6
Eu	1,27	1,12	1,08	0,95	0,97	0,95	0,92	0,94
Gd	3,9	3,3	3	2,9	2,7	2,8	2,8	2,8
Tb	0,7	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Dy	4	3,5	3,3	2,9	2,8	3	2,9	3,1
Ho	0,8	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Er	2,3	2,1	2	1,6	1,7	1,8	1,7	1,7
Tm	0,35	0,31	0,3	0,24	0,24	0,25	0,26	0,24
Yb	2,2	2,1	2	1,6	1,6	1,5	1,7	1,7
Lu	0,35	0,32	0,31	0,25	0,25	0,24	0,26	0,28
Hf	2,8	2,1	2,1	1,6	1,6	1,7	1,6	1,6
Ta	0,3	0,1	0,2	0,3	< 0.1	0,1	0,4	0,2
W	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Tl	0,1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Pb	9	7	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
Bi	< 0.4	< 0.4	< 0.4	< 0.4	< 0.4	< 0.4	< 0.4	< 0.4
Th	4	2	1,7	1,1	1,1	1,2	1,1	1,1
U	1,1	0,6	0,5	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3

Segundo grupo:

	Cas. 3	Cono Tipo						
	ANT-7	ANT-3	ANT-4	ANT-5	ANT-11	ANT-12	ANT-13	ANT-15
SiO <sub>2</sub>	51,83	50,64	50,53	50,91	55,33	54,29	55,00	52,20
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,91	17,88	17,93	18,64	17,00	17,10	17,75	17,05
FeO*	7,88	8,37	8,49	8,42	9,04	9,33	9,07	9,20
MnO	0,15	0,15	0,15	0,15	0,17	0,17	0,17	0,17
MgO	4,59	5,81	5,66	6,48	3,77	4,01	3,86	5,11
CaO	10,33	9,11	8,77	9,98	7,94	8,12	8,00	9,30
Na <sub>2</sub> O	2,95	2,84	2,86	2,80	3,69	3,63	3,70	3,14
K <sub>2</sub> O	0,54	0,66	0,63	0,49	0,92	0,86	0,91	0,62
TiO <sub>2</sub>	0,88	0,85	0,83	0,84	1,09	1,09	1,13	1,02
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,17	0,14	0,19	0,17	0,24	0,24	0,25	0,20
LOI	0,37	1,18	2,18	-0,31	-0,16	-0,09	-0,39	0,01
Total	99,59	97,63	98,21	98,57	99,03	98,75	99,45	98,01
Sc	30	28	27	29	31	32	31	35
Be	< 1	1	< 1	< 1	1	1	1	< 1
V	237	212	207	224	290	284	287	269
Ba	167	195	184	153	266	253	266	194
Sr	467	411	401	453	441	444	449	429
Y	16	18	17	15	21	18	19	18
Zr	72	81	72	54	91	87	87	67
Cr	90	90	100	100	20	30	20	90
Co	28	46	46	38	27	29	26	31
Ni	30	60	60	70	< 20	< 20	< 20	20
Cu	80	100	110	80	90	80	90	90
Zn	80	70	70	70	90	80	80	80
Ga	19	17	17	18	20	19	19	18
Ge	1	1	1	1	1	1	1	2
As	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
Rb	11	14	14	10	20	20	21	13
Nb	1	2	3	1	2	2	2	2
Mo	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
Ag	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
In	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2
Sn	< 1	8	8	< 1	< 1	2	< 1	< 1
Sb	0,8	0,9	< 0.5	< 0.5	0,8	< 0.5	< 0.5	< 0.5
Cs	0,6	0,8	0,8	0,6	1,2	1,1	1,2	0,7
La	10,7	8	7,6	6,7	15,1	10,4	11	8,6
Ce	25	19,4	18,7	15,4	29,3	24,3	25,4	19,9

	Cas. 3	Cono Tipo						
	ANT-7	ANT-3	ANT-4	ANT-5	ANT-11	ANT-12	ANT-13	ANT-15
Pr	3,34	2,54	2,57	2,12	3,42	3,23	3,35	2,8
Nd	13,9	11,1	11,5	10,2	14,8	14,2	14,8	12,2
Sm	3,2	3	2,9	2,4	3,7	3,4	3,6	3,2
Eu	1,12	0,99	0,97	0,96	1,24	1,25	1,2	1,2
Gd	3,2	2,9	3,1	2,9	3,8	3,7	3,6	3,2
Tb	0,5	0,5	0,5	0,5	0,7	0,6	0,6	0,6
Dy	3,3	3,3	3,3	3	4,1	3,7	3,8	3,5
Ho	0,6	0,7	0,7	0,6	0,8	0,8	0,8	0,7
Er	1,8	1,9	1,9	1,8	2,3	2,2	2,3	2,1
Tm	0,27	0,3	0,29	0,25	0,34	0,33	0,34	0,32
Yb	1,8	2	2	1,7	2,2	2,2	2,3	2,3
Lu	0,28	0,3	0,3	0,26	0,36	0,37	0,35	0,35
Hf	2,1	2	2,1	1,6	2,6	2,4	2,4	1,9
Ta	0,1	0,1	0,8	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3
W	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Tl	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0,1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Pb	6	6	7	< 5	10	7	8	< 5
Bi	< 0.4	< 0.4	< 0.4	< 0.4	< 0.4	< 0.4	< 0.4	< 0.4
Th	3,6	1,7	1,6	1,1	2,7	2,5	2,6	1,7
U	0,4	0,5	0,5	0,3	0,8	0,7	0,8	0,5

Muestras obtenidas de Lara y Moreno, 2012:

	Cráter Rayhuén						
	LL27040 6-1	LL1402 08-1	LL14020 8-2B	LL140208 -3B	LL140208 -3C	LL140208 -4A	LL140208 -4B
SiO <sub>2</sub>	49,88	52,59	51,23	52,89	55,98	54,65	55,84
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17,63	19,80	16,39	17,50	17,58	17,17	16,76
FeO*	9,52	6,68	10,11	7,40	5,62	6,57	6,31
MnO	0,13	0,11	0,12	0,12	0,12	0,11	0,11
MgO	5,84	4,11	5,04	5,88	4,15	5,15	4,65
CaO	10,82	10,78	10,21	10,06	9,93	9,58	8,83
Na <sub>2</sub> O	2,64	2,96	3,35	3,29	3,59	3,41	3,60
K <sub>2</sub> O	0,68	0,55	0,76	0,72	0,90	0,89	1,19
TiO <sub>2</sub>	1,28	0,65	0,94	0,89	0,65	0,84	0,81
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,09	0,11	0,12	0,14	0,14	0,16	0,20
LOI	0,38	0,32	0,30	0,09	0,32	0,33	0,61
Total	98,89	98,66	98,57	98,97	98,98	98,85	98,90
Sc	37	19	32	30	28	30	26
Be							

	Cráter Rayhuén						
	LL27040 6-1	LL1402 08-1	LL14020 8-2B	LL140208 -3B	LL140208 -3C	LL140208 -4A	LL140208 -4B
V	369	175	326	329	226	279	248
Ba	185						
Sr	609						
Y	19,4	11,3	12,6	12,7	14	14,2	15,4
Zr	64	52	47	53	58	63	74
Cr	65	81	44	72	99	72	63
Co	20	17	24	22	14	18	16
Ni	13	51	29	38	22	31	21
Cu	86	69	137	128	39	63	60
Zn	72	58	77	72	73	65	65
Ga							
Ge							
As							
Rb	17	12	15	13	20	19	29
Nb							
Mo							
Ag							
In							
Sn							
Sb							
Cs		0,66	0,97	1,45	0,95	1,03	1,57
La	9,7	9,13	10,1	9,77	8,5	11	13,43
Ce	21,05	19	20,92	21,31	18,13	23,78	28,77
Pr	2,74	2,34	2,57	2,60	2,25	2,95	3,48
Nd	13,9	10,20	11,13	11,39	9,74	13,09	15,08
Sm	3,33	2,03	2,27	2,34	2,11	2,63	2,87
Eu	1,06	0,75	0,82	0,83	0,76	0,89	0,94
Gd	3,43	1,93	2,21	2,25	2,17	2,47	2,70
Tb	0,53	0,32	0,36	0,37	0,37	0,40	0,43
Dy	3,24	1,95	2,19	2,25	2,29	2,43	2,67
Ho	0,69	0,41	0,46	0,49	0,49	0,52	0,56
Er	1,84	1,12	1,26	1,32	1,39	1,44	1,59
Tm	0,25	0,17	0,18	0,19	0,20	0,20	0,22
Yb	1,58	1,09	1,19	1,20	1,32	1,33	1,47
Lu	0,22	0,17	0,17	0,18	0,20	0,20	0,22
Hf		1,35	1,41	1,37	1,54	1,63	2
Ta							
W							
Tl							

	Cráter Rayhuén						
	LL27040 6-1	LL1402 08-1	LL14020 8-2B	LL140208 -3B	LL140208 -3C	LL140208 -4A	LL140208 -4B
Pb	<4	<4	<4	<4	5	4	4
Bi							
Th		1,42	3,61	3,02	2,77	3,37	5,33
U		0,41	0,99	0,81	0,76	0,89	1,39

**Tabla 7: Control de calidad y método de análisis de óxidos mayores en roca total para las unidades Casablanca 1, Casablanca 2, Casablanca 3 y Cono Tipo. Para los óxidos (elementos mayores) los parámetros están expresados en porcentaje del peso (en todos los casos el método de análisis es fusión ICP, FUS-ICP).**

Óxido	Límite de detección	DNC-		GBW		W-2a		SY-4		BIR-1a	
		1 Meas	DNC-1 Cert	07113 Meas	07113 Cert	Meas	Cert	Meas	Cert	Meas	Cert
SiO <sub>2</sub>	0,01	47,65	47,15	71,58	72,8	52,72	52,4	49,91	49,9	48,33	47,96
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01	18,48	18,34	12,82	13	15,51	15,4	20,13	20,69	15,98	15,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (T)	0,01	9,82	9,97	3,19	3,21	10,83	10,7	6,07	6,21	11,36	11,3
MnO	0,001	0,15	0,15	0,14	0,14	0,17	0,16	0,11	0,11	0,17	0,18
MgO	0,01	10,03	10,13	0,17	0,16	6,21	6,37	0,51	0,54	9,79	9,7
CaO	0,01	11,27	11,49	0,62	0,59	10,87	10,9	7,97	8,05	13,35	13,3
Na <sub>2</sub> O	0,01	1,97	1,89	2,5	2,57	2,22	2,14	6,91	7,1	1,87	1,82
K <sub>2</sub> O	0,01	0,23	0,23	5,46	5,43	0,62	0,63	1,66	1,66	0,02	0,03
TiO <sub>2</sub>	0,001	0,47	0,48	0,28	0,3	1,08	1,06	0,28	0,287	0,99	0,96
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,01	0,11	0,07	0,06	0,05	0,16	0,13	0,16	0,131	0,04	0,02

**Tabla 8: Control de calidad y método de análisis en elementos trazas en roca total para las unidades Casablanca 1, Casablanca 2, Casablanca 3 y Cono Tipo. Para los elementos trazas los parámetros están expresados en partes por millón (para Sc, Be, V, Ba, Sr, Y, Zr el método de análisis es FUS-ICP; para los restantes, FUS-MS).**

Ele- men- to	Lími- te de detec- ción	DNC -1 Mea s	DNC -1 Cert	GB W		W- 2a Mea s	W- 2a Cert	SY-4 Mea s	SY-4 Cert	BIR- 1a Mea s	BIR- 1a Cert	LKS D-3 Mea s	LKS D-3 Cert	CTA -AC- 1 Mea s	ORE AS 101b Cert	JR-1 Mea s	JR-1 Cert
				0711 3 Mea s	0711 3 Cert												
Sc	1	31	31	5	5	35	36	< 1	1,1	44	44						
Be	1			4	4	< 1	1,3	3	2,6	< 1	0,58						
V	5	150	148	6	5	259	262	10	8	321	310						
Ba	3	108	118	502	506	173	182	348	340	8	6						
Sr	2	146	144	42	43	195	190	1198	1191	111	110						
Y	2	16	18	50	43	19	24	126	119	14	16						
Zr	4	36	38	387	403	89	94	538	517	16	18						
Cr	20	290	270			100	92			400	370	80	87				

Elemento	Límite de detección	DNC -1 Meas	DNC -1 Cert	GB W 0711 Meas	GB W 0711 Cert	W-2a Meas	W-2a Cert	SY-4 Meas	SY-4 Cert	BIR-1a Meas	BIR-1a Cert	LKS D-3 Meas	LKS D-3 Cert	CTA -AC-1 Meas	ORE AS 101b Cert	JR-1 Meas	JR-1 Cert
Co	1	61	57			45	43			54	52	32	30		47		
Ni	20					70	70			190	170				9	< 20	1,67
Cu	10	100	100			110	110			120	125			60	416	< 10	2,68
Zn	30	70	70			80	80			70	70						
Ga	1	15	15			18	17			16	16					17	16,1
Ge	1					2	1										
As	5															16	16,3
Rb	2					20	21					80	78			266	257
Nb	1															15	15,2
Mo	2					< 2	0,6					< 2	2		20,9	3	3,25
Ag	0,5					< 0,5	0,04									< 0,5	0,03
In	0,2						6									< 0,2	1
Sn	1															3	0,02
Sb	0,5					0,8	0,79										2,86
Cs	0,5															20,9	20,8
La	0,1									0,6	0,63	48,9	52	> 2000	789	19,7	19,7
Ce	0,1					24,8	23			1,9	1,9	91,7	90	> 3000	1331	46,8	47,2
Pr	0,05															127	5,9
Nd	0,1	5,4	5,2			13,4	13			2,5	2,5	44,1	44		378	23,2	23,3
Sm	0,1					3,4	3,3			1	1,1	7,8	8	174	48	5,9	6,03
Eu	0,05	0,59	0,59							0,52	0,55	1,5	1,5	48	7,77		
Gd	0,1									2	2				136		
Tb	0,1					0,6	0,63							15	5,37	0,9	1,01
Dy	0,1											4,9	4,9		32,1		
Ho	0,1					0,8	0,76								6,34		
Er	0,1					2,3	2,5								18,7		
Tm	0,05														2,66	0,68	0,67
Yb	0,1	2	2			2,1	2,1			1,7	1,7	2,9	2,7	11,2	17,6	4,5	4,55
Lu	0,04					0,33	0,33			0,28	0,3	0,44	0,4		2,58	0,73	0,71
Hf	0,2									0,6	0,6	4,6	4,8			4,4	4,51
Ta	0,1					0,5	0,5					0,6	0,7			1,8	1,86
W	1					1	0,3										
Tl	0,1					< 0,1	0,2									1,5	1,56
Pb	5					8	9,3									19	19,3
Bi	0,4					< 0,4	0,03									0,5	0,56
Th	0,1					2,3	2,4					11,2	11,4		37,1	27,6	26,7

	Lími- te de detec- ción	DNC -1 Mea s	DNC -1 Cert	GB W 0711 Mea s	GB W 0711 3 Cert	W- 2a Mea s	W- 2a Cert	SY-4 Mea s	SY-4 Cert	BIR- 1a Mea s	BIR- 1a Cert	LKS D-3 Mea s	LKS D-3 Cert	CTA -AC- 1 Mea s	ORE AS 101b Cert	JR-1 Mea s	JR-1 Cert
U	0,1					0,5	0,53					4,9	4,6	4,4	396	9,3	8,88

## Anexo C Análisis de olivino

Tabla 9: Análisis composicional de olivino mediante microanálisis de dispersión de energía, EDX (semicuantitativo). Los resultados están expresados en porcentaje en peso por óxido y normalizados al 100%. Las columnas T y M hacen referencia a las posiciones estructurales tetraedro y octaedro en base a una fórmula estructural para el olivino en 4O. FeO\* corresponde a Fe total expresado como FeO.

			SiO <sub>2</sub>	FeO*	MgO	MnO		T(Si)	M
Casablanca 1	ANT-26	1	39,23	21,77	38,54	0,46	Cationes 4O	1,0	2,0
		2	38,53	26,26	34,67	0,54		1,0	2,0
		3	39,37	21,44	38,73	0,46		1,0	2,0
		4	39,40	20,92	39,37	0,31		1,0	2,0
Casablanca 2	ANT-8	1	42,16	13,90	43,94			1,0	1,9
		2	42,47	13,48	44,05			1,0	1,9
		3	42,23	13,35	44,42			1,0	1,9
		4	42,81	12,67	44,52			1,1	1,9
		5	42,46	12,85	44,69			1,0	1,9
		6	42,22	12,48	45,30			1,0	1,9
		7	42,80	12,57	44,63			1,1	1,9
		8	42,31	12,51	45,17			1,0	1,9
		9	42,53	12,31	45,15			1,0	1,9
		10	41,82	13,29	44,89			1,0	1,9
		11	42,18	12,76	45,06			1,0	1,9
		12	42,68	13,48	43,85			1,1	1,9
		13	42,08	14,30	43,62			1,0	1,9
		14	42,10	14,00	43,90			1,0	1,9
		15	42,69	14,90	42,41			1,1	1,9
		16	41,62	16,97	41,42			1,0	1,9
		17	42,06	16,36	41,58			1,1	1,9
		18	41,21	17,19	41,60			1,0	1,9
		19	41,42	17,83	40,76			1,0	1,9
		20	40,95	17,88	41,17			1,0	1,9
		21	41,15	17,32	41,53			1,0	1,9
		22	41,01	17,31	41,68			1,0	1,9
		23	41,42	17,03	41,55			1,0	1,9
		24	40,12	18,08	41,81			1,0	2,0
		25	39,89	17,69	42,07	0,35		1,0	2,0
		26	40,09	17,79	41,66	0,46		1,0	2,0
		27	40,63	18,17	40,84	0,36		1,0	1,9
		28	40,35	18,42	41,23			1,0	2,0
Casablanca 3	ANT-7	1	42,06	14,22	43,72			1,0	1,9
		2	42,20	13,78	44,02			1,0	1,9
		3	41,75	14,08	44,17			1,0	1,9
		4	42,02	16,97	41,01			1,1	1,9

			SiO <sub>2</sub>	FeO*	MgO	MnO		T(Si)	M
		5	42,02	13,57	44,41			1,0	1,9
		6	41,48	14,03	44,49			1,0	1,9
		7	41,70	13,79	44,51			1,0	1,9
		8	41,69	13,64	44,67			1,0	1,9
		9	42,02	13,16	44,82			1,0	1,9
		10	42,09	13,34	44,57			1,0	1,9
		11	41,10	23,20	35,70			1,1	1,9
		12	40,49	23,21	36,30			1,0	1,9
		13	41,54	22,88	35,58			1,1	1,9
		14	40,22	22,79	36,99			1,0	1,9
		15	41,52	18,39	40,09			1,0	1,9
		16	42,50	12,83	44,66			1,0	1,9
		17	41,77	14,06	44,17			1,0	1,9
		18	41,60	14,36	44,04			1,0	1,9
		19	41,74	13,35	44,92			1,0	1,9
		20	41,98	13,53	44,49			1,0	1,9
		21	42,50	13,39	44,11			1,0	1,9
		22	41,74	14,14	44,11			1,0	1,9
		23	41,67	14,06	44,27			1,0	1,9
		24	41,73	22,06	36,22			1,1	1,9
		25	42,27	13,87	43,87			1,0	1,9
		26	41,93	21,72	36,35			1,1	1,9
		27	40,92	29,17	29,91			1,1	1,8
		28	42,52	13,43	44,05			1,1	1,9
		29	42,08	13,42	44,50			1,0	1,9
		30	41,98	14,55	43,48			1,0	1,9
		31	42,22	21,61	36,18			1,1	1,8
		32	42,51	15,21	42,29			1,1	1,9
		33	41,96	17,22	40,81			1,1	1,9
		34	42,03	20,67	37,30			1,1	1,9
		35	42,03	14,20	43,77			1,0	1,9
		36	42,11	14,08	43,81			1,0	1,9
		37	42,14	17,32	40,54			1,1	1,9
Cono Tipo	ANT-5	1	39,28	21,17	39,20	0,35		1,0	2,0
		2	39,65	19,54	40,80	0,00		1,0	2,0
		3	39,37	21,22	39,06	0,35		1,0	2,0

## Anexo D Análisis de plagioclasa

Tabla 10: Análisis de plagioclasa con microsonda electrónica (EMPA). Los resultados están expresados en porcentaje en peso por óxido (Mass%). Las columnas T y M hacen referencia a las posiciones estructurales tetraedro y octaedro en base a una fórmula estructural para el feldespato en 8O. Fe se asume en posición T, aunque eventualmente podría existir en la posición octaédrica (Longhi, *et al.*, 1976). FeO\* corresponde a Fe total expresado como FeO.

Casablanca 1	SiO2	Al2O3	FeO*	MgO	CaO	Na2O	K2O	Total		T	A
ANT-26									Cationes 8O		
PL21 R1	52,54	29,82	0,95	0,05	12,58	4,12	0,20	100,25		4,02	0,99
PL21 R2	46,92	33,83	0,58	0,05	17,15	1,76	0,04	100,33		4,01	1,00
PL21 R3	46,19	34,50	0,62	0,09	17,39	1,50	0,03	100,32		4,02	0,99
PL21 R4	46,25	34,33	0,65	0,06	17,63	1,40	0,06	100,38		4,01	1,00
PL21 R5	56,63	27,05	0,92	0,05	9,24	5,82	0,46	100,17		4,02	0,98
PL22 R1	56,80	27,37	0,92	0,08	9,40	5,80	0,38	100,75		4,02	0,98
PL22 R2	51,75	30,91	0,91	0,07	13,50	3,72	0,15	100,99		4,02	0,99
PL22 R3	47,45	33,44	0,72	0,06	16,71	1,81	0,04	100,22		4,02	0,98
PL22 R4	47,87	32,98	0,68	0,05	15,91	2,39	0,09	99,96		4,01	1,00
PL22 R5	46,69	33,81	0,56	0,04	17,20	1,66	0,03	99,98		4,01	1,00
PL22 R6	46,69	34,37	0,56	0,06	16,92	1,77	0,02	100,39		4,02	0,99
PL22 R7	46,21	34,68	0,62	0,03	17,42	1,34	0,01	100,31		4,02	0,98
PL22 R8	47,84	33,63	0,58	0,08	16,74	1,92	0,04	100,83		4,01	0,99
PL22 R9	46,49	34,19	0,68	0,07	17,09	1,63	0,06	100,19		4,02	0,99
PL22 R10	47,22	33,82	0,63	0,03	16,84	1,74	0,07	100,34		4,02	0,99
PL22 R11	46,80	34,41	0,72	0,06	17,13	1,60	0,05	100,77		4,02	0,98
PL23 R1	56,81	27,11	1,21	0,08	9,50	5,72	0,51	100,92		4,02	0,98
PL23 R2	46,93	34,03	0,73	0,02	16,79	1,84	0,06	100,39		4,02	0,99
PL23 R3	47,96	33,27	0,58	0,11	16,69	1,94	0,06	100,61		4,01	0,99
PL23 R4	47,87	33,31	0,71	0,12	16,41	2,14	0,03	100,58		4,02	0,99
Casablanca 2											
ANT-8									Cationes 8O		
PI 14 R1	53,13	30,25	0,78	0,24	13,15	3,78	0,12	101,45		4,02	0,97
PI 14 R2	52,58	29,79	0,73	0,22	13,08	3,88	0,13	100,41		4,01	0,98
PI 14 R3	47,45	33,71	0,82	0,14	16,74	2,00	0,05	100,91		4,02	1,00
PI 14 R4	45,32	35,23	0,64	0,09	18,39	1,00	0,01	100,67		4,02	0,99
PI 11 R1	45,93	34,53	0,62	0,09	17,53	1,38	0,04	100,12		4,02	0,99
PI 11 R2	47,01	34,21	0,61	0,12	17,39	1,68	0,03	101,05		4,01	1,00
PI 11 R3	47,29	34,65	0,65	0,12	17,10	1,79	0,05	101,65		4,02	0,99
PI 11 R4	47,79	33,86	0,63	0,13	17,08	1,86	0,07	101,42		4,01	1,00
PI 11 R5	47,93	33,60	0,54	0,10	16,48	1,93	0,04	100,64		4,02	0,98

PI 11 R6	46,49	34,48	0,70	0,14	17,75	1,39	0,06	101,00	4,02	1,00
PI 11 R7	46,62	35,07	0,63	0,11	18,34	1,15	0,05	101,97	4,01	0,99
PI 11 R8	48,69	33,19	0,67	0,15	16,52	2,27	0,06	101,54	4,01	1,00
PI 11 R9	48,50	32,62	1,16	0,34	15,94	2,32	0,10	100,97	4,03	0,99
PI 11 R10	47,90	33,34	0,72	0,16	16,72	2,01	0,07	100,93	4,01	1,00
PI 11 R11	49,88	32,46	0,67	0,15	15,41	2,67	0,10	101,34	4,02	0,99
PI 11 R13	55,17	27,92	1,35	0,19	11,06	5,03	0,24	100,96	4,02	0,98
PI 11 R14	52,95	29,74	0,88	0,21	12,38	4,03	0,13	100,31	4,03	0,96
PI 11 R21	52,77	29,67	0,87	0,19	12,94	4,07	0,16	100,66	4,01	0,99
PI 11 R22	50,87	31,55	0,76	0,18	14,54	3,13	0,12	101,15	4,02	0,98
PI 11 R24	50,13	32,14	0,63	0,19	14,74	2,85	0,09	100,77	4,03	0,97
PI 11 R25	49,36	30,75	0,70	0,20	14,26	2,81	0,08	98,17	4,02	0,97
PI 11 R26	50,75	31,30	0,73	0,19	14,42	3,06	0,10	100,55	4,02	0,98
PI 12 R1	51,79	30,16	0,76	0,21	12,95	3,96	0,11	99,94	4,02	0,99
PI 12 R2	52,68	29,33	0,73	0,22	12,45	4,19	0,13	99,72	4,02	0,98
PI 12 R3	47,74	33,58	0,55	0,14	16,46	2,10	0,05	100,63	4,02	0,99
PI 12 R4	43,83	34,52	0,50	0,10	17,43	1,02	0,02	97,40	4,03	0,98
PI 12 R5	45,96	34,58	0,86	0,11	17,93	1,21	0,09	100,74	4,02	0,99
PI 12 R6	45,01	35,31	0,69	0,08	18,16	0,96	0,04	100,25	4,03	0,98
PI 12 R7	49,83	32,20	0,65	0,17	15,24	2,76	0,08	100,94	4,02	0,99
PI 12 R8	45,58	35,91	0,69	0,10	18,46	0,95	0,04	101,74	4,03	0,98
PI 12 R10	46,93	34,65	0,60	0,11	17,45	1,72	0,05	101,49	4,02	1,00
PI 12 R9	46,89	34,38	0,57	0,12	17,57	1,51	0,04	101,08	4,01	0,99
PI 13 R2	52,02	30,40	0,77	0,21	13,21	3,57	0,11	100,28	4,03	0,96
PI 13 R3	52,93	30,22	0,69	0,20	13,10	3,96	0,11	101,21	4,02	0,98
PI 13 R5	45,65	35,29	0,62	0,10	17,99	1,21	0,00	100,85	4,02	0,99
PI 13 R7	47,09	34,52	0,57	0,12	17,42	1,67	0,06	101,45	4,02	1,00
PI 13 R8	46,65	34,52	0,62	0,12	17,35	1,60	0,02	100,87	4,02	0,99
PI 13 R9	45,19	35,42	0,54	0,09	18,30	0,93	0,03	100,50	4,02	0,99
PI 13 R10	47,19	34,60	0,50	0,11	16,95	1,73	0,10	101,16	4,02	0,98
PI 13 R11	45,95	35,09	0,57	0,08	17,79	1,26	0,02	100,76	4,02	0,98
PI 13 R12	45,24	35,41	0,54	0,11	18,46	1,10	0,03	100,88	4,01	1,01
PI 13 R13	46,31	34,80	0,53	0,12	17,86	1,33	0,07	101,00	4,01	1,00
PI 13 R14	47,38	34,54	0,61	0,12	17,06	1,65	0,08	101,44	4,03	0,98
PI 13 R15	45,93	35,46	0,51	0,10	17,84	1,20	0,03	101,05	4,03	0,98
ANT-9										
PL15 R1	47,86	33,69	0,68	0,13	16,67	1,98	0,02	101,02	4,02	0,99
PL15 R2	47,54	33,63	0,86	0,13	16,78	1,97	0,10	101,00	4,02	1,00
PL15 R3	47,94	33,41	0,81	0,16	16,41	2,14	0,02	100,89	4,02	0,99
PL15 R4	49,42	32,19	0,66	0,20	15,79	2,56	0,05	100,87	4,01	1,00
PL15 R5	47,54	33,53	0,71	0,15	16,73	1,83	0,07	100,55	4,02	0,99
PL15 R6	48,21	33,20	0,53	0,12	16,31	2,14	0,07	100,56	4,01	0,99
PL15 R7	49,17	32,60	0,69	0,18	15,78	2,51	0,07	101,00	4,02	0,99

PL15 R8	47,76	33,73	0,70	0,16	16,48	2,01	0,06	100,89		4,02	0,98
PL15 R9	47,74	33,53	0,60	0,12	16,64	2,05	0,05	100,73		4,01	1,00
PL15 R10	48,15	33,47	0,65	0,12	16,64	1,93	0,07	101,03		4,02	0,98
PL15 R11	47,14	33,65	0,70	0,15	16,47	1,85	0,05	100,01		4,03	0,98
PL15 R12	48,82	33,02	0,54	0,16	15,65	2,56	0,06	100,81		4,02	0,99
PL15 R13	48,21	32,69	0,63	0,20	16,12	2,50	0,06	100,41		4,01	1,02
PL16 R1	53,60	29,50	0,99	0,15	12,30	4,29	0,19	101,03		4,02	0,98
PL16 R2	47,43	34,14	0,62	0,15	16,61	1,83	0,05	100,83		4,03	0,98
PL16 R3	49,10	33,31	0,77	0,19	16,29	2,35	0,06	102,06		4,02	0,99
PL16 R4	47,19	33,74	0,71	0,14	16,94	2,07	0,02	100,81		4,01	1,01
PL16 R5	48,48	32,77	0,77	0,19	15,65	2,35	0,07	100,27		4,03	0,98
PL16 R6	48,02	33,34	0,66	0,13	16,49	2,06	0,03	100,72		4,02	0,99
PL16 R7	47,53	33,72	0,68	0,10	16,83	1,93	0,05	100,83		4,02	1,00
PL16 R8	48,18	33,25	0,67	0,17	16,31	2,15	0,05	100,77		4,02	0,99
PL16 R9	49,47	32,54	0,66	0,16	15,52	2,66	0,06	101,07		4,02	0,99
PL16 R10	47,59	33,74	0,75	0,15	16,67	1,96	0,06	100,92		4,02	0,99
PL17 R1	54,17	28,22	1,37	0,22	11,57	4,58	0,22	100,36		4,03	0,98
PL17 R2	48,80	32,85	0,73	0,16	15,78	2,26	0,08	100,66		4,02	0,97
PL17 R3	49,48	32,25	0,72	0,18	15,19	2,76	0,08	100,65		4,02	0,99
PL17 R4	48,11	33,52	0,66	0,15	16,30	2,18	0,04	100,95		4,02	0,99
PL17 R5	50,00	32,00	0,70	0,18	15,07	2,97	0,08	100,99		4,01	1,00
PL17 R6	45,25	35,29	0,53	0,07	18,28	1,08	0,03	100,52		4,02	1,00

Casablanca 3	SiO2	Al2O3	FeO *	MgO	CaO	Na2O	K2O	Total		T	A
ANT-1									Cationes 8O		
PI 01 R1	51,59	30,65	0,68	0,21	13,19	3,54	0,12	99,99		4,03	0,96
PI 01 R2	52,27	30,31	0,71	0,21	12,73	3,82	0,20	100,24		4,03	0,97
PI 01 R4	52,35	30,56	0,69	0,22	13,40	3,92	0,13	101,29		4,02	1,00
PI 01 R5	50,74	31,21	0,64	0,20	14,17	3,29	0,10	100,36		4,02	0,99
PI 01 R6	51,48	30,93	0,69	0,18	13,78	3,61	0,13	100,79		4,02	0,99
PI 01 R7	50,66	31,36	0,66	0,16	14,24	3,10	0,13	100,31		4,02	0,97
PI 01 R8	50,26	31,77	0,67	0,17	14,74	2,83	0,09	100,53		4,02	0,97
PI 01 R9	46,82	34,34	0,60	0,11	17,12	1,56	0,00	100,54		4,02	0,98
PI 01 R10	46,33	34,82	0,60	0,10	17,74	1,41	0,03	101,03		4,02	0,99
PI 01 R11	46,10	35,09	0,63	0,06	17,96	1,11	0,04	100,99		4,02	0,98
PI 01 R12	46,09	35,03	0,58	0,13	17,60	1,44	0,04	100,91		4,02	0,99
PI 01 R14	51,79	30,83	0,68	0,26	13,57	3,66	0,07	100,85		4,02	0,98
PI 04 R1	49,19	32,65	0,70	0,08	15,66	2,69	0,11	101,07		4,01	1,00
PI 04 R3	48,79	32,65	0,75	0,13	15,72	2,57	0,09	100,69		4,02	1,00
PI 04 R4	48,56	32,75	0,81	0,14	16,03	2,45	0,09	100,83		4,01	1,00
PI 04 R6	48,18	32,63	0,70	0,14	16,00	2,35	0,06	100,06		4,01	1,00
PI 04 R7	49,60	32,14	0,65	0,17	15,12	2,88	0,08	100,63		4,02	1,00

PI 04 R8	49,33	32,62	0,81	0,11	15,17	2,72	0,09	100,85		4,03	0,98
PI 05 R2	52,44	30,25	0,87	0,14	13,44	3,86	0,14	101,14		4,01	0,99
PI 05 R3	51,91	30,28	0,84	0,13	13,24	3,72	0,15	100,27		4,02	0,98
PI 05 R4	52,51	30,26	0,74	0,16	13,16	3,84	0,13	100,79		4,02	0,98
PI 05 R5	52,65	30,50	0,82	0,16	12,84	4,18	0,15	101,30		4,02	0,99
PI 05 R7	60,17	23,77	1,36	0,13	6,77	6,84	0,82	99,85		4,02	0,97
PI 05 R8	58,63	25,86	1,05	0,07	8,31	6,16	0,55	100,62		4,02	0,96
PI 05 R9	60,74	24,15	1,71	0,12	6,61	6,75	0,79	100,86		4,04	0,94
PI 05 R10	62,28	20,88	1,84	0,14	5,38	6,21	1,26	97,99		4,03	0,88
PI 05 R11	56,48	27,22	1,42	0,13	10,43	5,13	0,39	101,19		4,02	0,97
ANT-7											
PI 07 R1	57,02	26,16	1,67	0,24	9,66	5,19	0,51	100,45		4,03	0,95
PI 07 R8	45,15	33,42	0,58	0,10	17,71	1,19	0,06	98,20		4,00	1,00
PI 07 R9	46,10	35,85	0,54	0,08	18,33	0,93	0,03	101,87		4,03	0,97
PI 07 R11	55,78	26,71	1,79	0,26	10,57	4,94	0,32	100,37		4,03	0,96
PI 09 R2	47,55	34,44	0,83	0,11	16,85	1,79	0,03	101,60		4,03	0,98
PI 09 R3	53,94	28,83	1,80	0,25	12,22	4,04	0,25	101,32		4,04	0,96
PI 09 R4	52,68	30,50	0,99	0,18	13,03	3,83	0,15	101,35		4,03	0,97
PI 09 R5	53,60	29,19	1,17	0,16	11,96	4,30	0,24	100,61		4,03	0,97
PI 09 R6	55,56	27,21	1,60	0,20	10,48	5,15	0,26	100,45		4,03	0,97
PI 09 R9	53,37	30,13	1,21	0,13	12,53	4,28	0,20	101,84		4,03	0,98

Cono Tipo	SiO2	Al2O3	FeO *	MgO	CaO	Na2O	K2O	Total		T	A
ANT-5									Cationes8 O		
PL25 R1	51,93	30,33	0,79	0,19	13,03	3,93	0,13	100,32		4,02	0,99
PL25 R2	46,68	34,47	0,64	0,11	17,21	1,73	0,00	100,84		4,02	1,00
PL25 R3	47,69	33,54	0,70	0,17	16,68	2,06	0,04	100,89		4,02	1,00
PL25 R4	45,70	35,29	0,60	0,11	18,42	0,98	0,04	101,15		4,02	0,99
PL25 R5	46,14	34,65	0,55	0,08	17,40	1,46	0,02	100,31		4,02	0,99
PL24 R1	52,31	30,10	0,75	0,19	13,07	3,95	0,11	100,49		4,02	0,99
PL24 R2	48,48	33,72	0,72	0,15	16,42	2,25	0,02	101,76		4,02	0,99
PL24 R3	51,70	30,34	0,58	0,25	13,89	3,69	0,07	100,53		4,01	1,00
PL24 R4	51,82	30,64	0,61	0,22	13,51	3,65	0,10	100,55		4,02	0,98
PL24 R5	50,71	31,07	0,56	0,18	14,09	3,18	0,08	99,86		4,02	0,97
PL24 R6	48,27	32,59	0,51	0,16	15,78	2,15	0,20	99,67		4,02	0,98
PL24 R7	46,60	34,75	0,43	0,12	18,03	1,37	0,02	101,31		4,01	1,00
PL24 R8	45,91	34,75	0,59	0,10	17,95	1,12	0,02	100,43		4,02	0,98
PL24 R9	46,77	34,44	0,61	0,13	17,31	1,55	0,04	100,83		4,02	0,99
PL26 R1	52,82	30,07	0,78	0,16	12,79	4,18	0,13	100,92		4,02	0,99
PL26 R2	48,85	33,05	0,57	0,14	16,18	2,32	0,06	101,16		4,01	0,99
PL26 R3	51,67	30,88	0,66	0,16	13,69	3,53	0,13	100,72		4,02	0,98

PL26 R4	53,23	29,50	0,63	0,20	12,38	4,14	0,11	100,18	4,02	0,97
PL26 R5	48,91	32,93	0,56	0,12	15,95	2,22	0,08	100,77	4,02	0,98
PL26 R6	46,15	35,39	0,58	0,11	18,08	1,16	0,04	101,51	4,02	0,98
PL26 R7	45,85	35,29	0,42	0,09	18,41	1,03	0,00	101,08	4,01	0,99
PL26 R8	45,27	35,09	0,49	0,09	18,78	0,94	0,00	100,66	4,00	1,01

## Anexo E Descripción macroscópica

### Casablanca 1

Las muestras de Casablanca 1, (ANT-10 y ANT-26), corresponden a lavas porfíricas inequigranulares, con cristales hipidiomórficos de grano medio hasta 4 mm; de estructura homogénea, isótropa, sin vesículas; matriz bordeando un 80% del total de la roca; cristales de plagioclasa de hasta 4 mm y de olivino de hasta 3 mm (proporción 80:20); además, algunas muestras poseen cristales de plagioclasas con zonaciones de tamaño macroscópico (Figura 50).

Casablanca 1 (Plca1n)



Figura 50: Muestras de mano de la unidad Casablanca 1.

### Casablanca 2

Las muestras de Casablanca 2, Pleistoceno Superior del Volcán Casablanca, Plsca2 (ANT-8 y ANT-9), corresponden a lavas porfíricas inequigranulares, con cristales hipidiomórficos de grano medio menor a 4mm; de estructura homogénea, isótropa, con vesículas muy abundantes de hasta 20mm; matriz bordeando un 90% del total de la roca; cristales de plagioclasa de hasta 3mm y de olivino de hasta 3 mm (proporción 80:20)

(Figura 51).

Casablanca 2 (Plca2)

---



**Figura 51: Muestras de mano de la unidad Casablanca 2.**

**Casablanca 3**

Las muestras de Casablanca 3, Holoceno del Volcán Casablanca, Hca3 (ANT-1 y ANT-7), corresponden a lavas porfíricas inequigranulares, con cristales alotromórficos de grano medio menor a 3mm; de estructura homogénea, isótropa, con vesículas moderadas a escasas de hasta 7mm o menor a 2mm; matriz bordeando un 80% del total de la roca; cristales de plagioclasa de menos de 3mm y de olivino menores a 3mm (proporción 90:10) (Figura 52).

Casablanca 3 (Hca3)

---



**Figura 52: Muestras de mano de la unidad Casablanca 3.**

**Cono Tipo**

Las muestras de Cono Tipo, cono Holoceno cercano al Volcán Casablanca, Hco(p) (ANT-3 y ANT-5), corresponden a lavas porfíricas inequigranulares pero de poca variación en el tamaño de grano, con cristales alotromórficos de grano fino menor a 2 mm; de

estructura homogénea, isótropa, con vesículas muy abundantes de hasta 15 mm; matriz sobre un 90% del total de la roca; cristales de plagioclasa de menos de 2 mm y de olivino menores a 1mm (proporción 90:10) (Figura 53).

Cono Tipo [Hco(p)]

---



**Figura 53: Muestras de mano de la unidad Cono Tipo.**

## **Anexo F Descripción con microscopio óptico**

### **Casablanca 1**

Las texturas principales en esta colada pleistocena, incluyen porfírica e intergranular, en ambos casos el mineral que define estas texturas es plagioclasa. No se observan orientaciones preferentes en los cristales. Todas las muestras presentan un 10-15% de vesículas. De la proporción de roca, los fenocristales comprenden alrededor de un 15% (85% de masa fundamental), definiéndose el límite entre ambas poblaciones en los 0,2 mm, dado por el contraste evidente en el tamaño de las plagioclasas y a la ausencia de ciertos minerales (opacos, piroxenos) por sobre este límite.

En todos los casos, los fenocristales corresponden a plagioclasa (85-90%) y olivino (10-15%), no encontrándose otros minerales, como piroxenos o anfíbolos. Ambos cristales se presentan subhedrales, con una integridad baja a media. El tamaño de los fenocristales de plagioclasa alcanza los 2,5 mm y el de olivino no supera 1 mm (Figura 6).

La masa fundamental se compone de plagioclasa (60-80%), piroxeno (15-40%), olivino (5%) y óxidos (1-2%). Todos estos cristales son anhedralos y su integridad, salvo los óxidos, es mala (Figura 14).

Escasa serpentina (alterando olivino) como mineral de alteración. No se reconoce presencia de vidrio.

### **Casablanca 2**

No se observan orientaciones preferentes en los cristales de esta unidad. Las muestras presentan un 20-30% de vesículas. De la proporción de roca, los fenocristales comprenden desde un 25 a un 40% (60-75% de masa fundamental), definiéndose el límite entre ambas poblaciones en los 0,2 mm, dado por el contraste evidente en el tamaño de las plagioclasas y a la ausencia de ciertos minerales (opacos, piroxenos) por sobre este límite.

En todos los casos, los fenocristales corresponden a plagioclasa (75-80%) y olivino (20-25%), no encontrándose otros minerales, como piroxenos o anfíbolos. Ambos cristales se presentan subhedrales, con una integridad baja a media. El tamaño de los fenocristales de plagioclasa alcanza los 3,5 mm y los de olivino los 2,5 mm (Figura 7).

La masa fundamental se compone de plagioclasa (80%), piroxeno (10-15%), olivino (5-10%) y óxidos (1-2%). La estructuralidad de los cristales varía de anhedral a subhedral y la integridad en general es mala (Figura 19).

El olivino se observa acompañado de serpentina en la mayoría de los cristales. No se reconoce presencia de vidrio.

### **Casablanca 3**

Las texturas principales en esta colada incluyen porfírica e intergranular, en ambos casos el mineral que define estas texturas es plagioclasa. No se observan orientaciones preferentes en los cristales. Todas las muestras presentan un 20% de vesículas. De la proporción de roca, los fenocristales comprenden alrededor de un 25% (75% de masa fundamental), definiéndose el límite entre ambas poblaciones en los 0,2 mm, dado por el contraste evidente en el tamaño de las plagioclasas y a la ausencia de ciertos minerales (opacos, piroxenos) por sobre este límite.

En todos los casos, los fenocristales corresponden a plagioclasa (85-95%) y olivino (5-15%), no encontrándose otros minerales, como piroxenos o anfíbolos. Los olivinos se presentan anhedrales y las plagioclasas subhedrales, con una integridad baja a media en ambos casos. El tamaño de los fenocristales de plagioclasa alcanza los 2,5 mm y el de olivino los 1,5 mm (Figura 8).

La masa fundamental se compone de plagioclasa (70-80%), piroxeno (12-20%), olivino (2-10%) y óxidos (1-5%). Los cristales de plagioclasa son subhedrales y el resto de minerales se muestra anhedral y en la mayoría de los casos su integridad es mala a moderada (Figura 25).

El olivino se observa acompañado de serpentina en la mayoría de los cristales. No se reconoce presencia de vidrio.

### **Cono Tipo**

Las texturas principales en esta colada incluyen porfírica e intergranular, en ambos casos el mineral que define estas texturas es plagioclasa. No se observan orientaciones preferentes en los cristales. Las muestras presentan entre un 60 y 80% de vesículas. De la proporción de roca, los fenocristales comprenden un 35% (65% de masa fundamental), definiéndose el límite entre ambas poblaciones en los 0,2 mm, dado por el contraste evidente en el tamaño de las plagioclasas y a la ausencia de ciertos minerales (opacos, piroxenos) por sobre este límite.

En todos los casos, los fenocristales corresponden a plagioclasa (70%) y olivino (30%), no encontrándose otros minerales, como piroxenos o anfíbolos. Los olivinos y las plagioclasas se encuentran subhedrales, con una integridad baja a media en ambos casos. El tamaño de los fenocristales de plagioclasa no supera los 2,5 mm y el de olivino los 3,5 mm (Figura 9).

La masa fundamental se compone de plagioclasa (50%), piroxeno (45-50%), olivino (2%) y óxidos (1-2%). No se reconoce presencia de vidrio. Los cristales de plagioclasa son subhedrales y el resto de minerales se muestra anhedral y en la mayoría de los casos su integridad es mala a moderada (Figura 30).

El olivino se observa acompañado de serpentina en la mayoría de los cristales. No se reconoce presencia de vidrio.