



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

**ERUPCIÓN DEL VOLCÁN LLAIMA DE 1957:  
COMPOSICIÓN DEL MAGMA PRE-ERUPTIVO A TRAVÉS DE  
INCLUSIONES VÍTREAS**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO**

**GUILLERMO IGNACIO FERIS RIQUELME**

**PROFESORA GUÍA:  
CLAUDIA CANNATELLI**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
ANGELO CASTRUCCIO ÁLVAREZ  
DIEGO MORATA CÉSPEDES**

**SANTIAGO DE CHILE  
2018**

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE: Geólogo  
POR: Guillermo Ignacio Feris Riquelme  
FECHA: Diciembre 2018  
PROFESOR GUÍA: Claudia Cannatelli

## **ERUPCIÓN DEL VOLCAN LLAIMA DE 1957: COMPOSICIÓN DEL MAGMA PRE-ERUPTIVO A TRAVÉS DE INCLUSIONES VÍTREAS**

El volcán Llaima corresponde a un estratovolcán de forma cónica, ubicado en la Región de la Araucanía, Chile; a 74 km al este de Temuco. Tiene una altura máxima de 3125 m.s.n.m., cubriendo un área basal de 490 km<sup>2</sup> con un volumen estimado en 377 km<sup>3</sup>.

El objetivo principal de esta memoria es determinar la composición del magma pre-eruptivo en volcán Llaima el año 1957 mediante el estudio de las inclusiones vítreas. De esta forma es posible plantear un modelo petrogenético que involucre los procesos ígneos ocurridos en el sistema volcano-magmático del Llaima.

Este estudio se centra en el análisis de dos cortes transparentes, NV10 y NV11, hechos a partir de los depósitos dejados por las coladas de lava de 1957. Para lograr los objetivos planteados, se realizó una detallada descripción petrográfica de las fases minerales presentes, texturas involucradas e inclusiones vítreas. Luego, en las inclusiones y cristales de los distintos minerales se realizaron técnicas analíticas en microsonda electrónica, para obtener el contenido de elementos mayoritarios y minoritarios, y ablación láser para el contenido de elementos traza.

La mineralogía predominante corresponde a olivinos (Fo<sub>70-80</sub>); plagioclasa (An<sub>55-90</sub>), piroxenos: enstatita, augita y pigeonita, y, óxidos de Fe-Ti/Cr.

Se concluye que la composición del magma pre-eruptivo es andesita-basáltica - andesítica, siguiendo una serie calcoalcalina, con un promedio de SiO<sub>2</sub> de 55,75 wt%. Este magma, a su vez, tendría origen en la fusión parcial del manto y habría evolucionado en una cámara magmática, aproximadamente a 4 km bajo la superficie.

El modelo de evolución magmática propuesto considera que la evolución y diferenciación del magma, registrado en las inclusiones vítreas en olivino, está dado por un proceso de cristalización fraccionada, donde en primer lugar cristalizan las fases de olivino y plagioclasa, y posteriormente enstatita. El ascenso magmático previo a la erupción, y el flujo de lava durante la erupción misma, genera las texturas de sieve en la plagioclasa y la cristalización del borde de labradorita. En esta última etapa se da la cristalización de óxidos de Fe-Ti, microlitos de plagioclasa, augita y pigeonita. El ascenso magmático estaría facilitado por estructuras como diques, asociados a la presencia de la Zona de Falla de Liqueñe-Ofqui.

# AGRADECIMIENTOS

Esta memoria de título se realizó gracias al financiamiento y apoyo del Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA: Proyecto FONDAPE-CONICYT N° 15090013), junto con los proyectos FONDEQUIP EQM140009 (M. Reich), FONDEQUIP EQM120098 (F. Barra), y fondo de Inserción en la Academia de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile (C. Cannatelli).

En primer lugar, agradezco a mi profesora guía, Dra. Claudia Cannatelli, por haberme aceptado como alumno memorista, por la disposición que siempre tuvo en enseñar y solucionar cada inconveniente que se presentó, por sus palabras de apoyo cada vez que las necesité. Gracias por tanto profe. A los miembros de la comisión, Dr. Diego Morata y Dr. Angelo Castruccio, dos grandes valores del departamento, por haber aceptado ser parte de ella.

A los integrantes del laboratorio LAMARX de la Universidad de Córdoba: Prof. Jorge Vilchez, Dr. Fernando Colombo y Dra. Alina Guerreschi. Al Dr. Mathieu Leisen y Rurik Romero por su ayuda con la ablación láser en el Departamento de Geología, Universidad de Chile.

A Marcela y Marcelo, mis padres, que siempre han hecho lo imposible por mí. Gracias por apoyarme en cada uno de mis delirios y por estar ahí siempre y a pesar de todo. A mis hermanas, Pepa y Jesús, por darme compañía y nuevas motivaciones en la vida. A mis abuelos, por su cariño y ayuda desde que tengo memoria. De manera muy especial, quiero dar las gracias a mi tata Lucho, que siempre será mucho más que un abuelo para mí, gracias por tu confianza, consejo y sabiduría. A mi tía Claudia, por apoyarme como lo has hecho siempre, y a toda mi familia... Sin ustedes nada sería igual. Los quiero.

A mis compañeros en inclusiones vítreas, Lore, Dani, Mari y Franco (Mención honrosa a estos dos últimos por su ayuda en Córdoba). Gracias por su buena disposición, por enseñarme y aconsejarme. ¡Éxito en lo que viene!

A mis amigos y compañeros de plan común: Roberto, Gerónimo y Wladimir, gracias por estar presentes en los momentos más difíciles de la carrera, sin ustedes el plan común habría sido aún más tortuoso y aburrido, a pesar de vernos menos, siempre los recuerdo con cariño. A los de Chillán, Diego, Néstor y Karim, también por siempre estar ahí.

A mis amigos de Geo, Fonseca, Dani, Marco, Poeta, Jercko, Robbiano, Eial, Gabriel, Rodri, Juanito y Fonsi. Gracias cabros por el apoyo mutuo que siempre se dio, por la buena onda, los carretes, y mejor termino ahí jaja. Y a todos en Geo con quienes tuve el privilegio de compartir y aprender. En fin, gracias a todos los que me han acompañado en la vida. No alcanza el papel para nombrar a cada uno. Gracias de corazón.

# TABLA DE CONTENIDO

Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1. Presentación .....	1
1.2. Objetivos .....	2
1.2.1. Objetivo General .....	2
1.2.2. Objetivos específicos .....	2
1.3. Inclusiones vítreas.....	3
1.4. Hipótesis de trabajo.....	3
1.5. Ubicación y accesos.....	4
Capítulo 2. Antecedentes .....	5
2.1. Síntesis bibliográfica .....	5
2.2. Erupción volcán Llaima de 1957.....	7
2.3. Marco Geológico .....	8
2.3.1. Contexto geodinámico .....	8
2.3.2. Marco geológico local .....	10
Capítulo 3. Metodología .....	16
3.1. Trabajo en laboratorio .....	17
3.1.1. Petrografía .....	17
3.1.2. Microscopio de barrido electrónico (SEM) .....	18
3.1.3. Análisis en microsonda electrónica (EMPA) .....	18
3.1.4. Espectrometría de masas .....	19
3.2. Trabajo de gabinete .....	20
3.2.1. Reducción de datos .....	20
3.2.2. Tratamiento de datos .....	20
3.2.3. Geotermobarometría .....	21
Capítulo 4. Resultados .....	22
4.1. Petrografía: .....	22
4.1.1. Cortes transparentes NV10 y NV11 .....	22
4.1.2. Descripción de las familias de inclusiones .....	24
4.1.3. Petrografía en SEM.....	25
4.2. Química mineral .....	27

4.2.1. Olivino.....	27
4.2.2. Plagioclasa.....	27
4.2.3. Piroxeno.....	28
4.2.4. Óxidos de Hierro .....	28
4.3. Geoquímica de inclusiones vítreas.....	29
4.3.1. Diagrama TAS .....	29
4.3.2. Diagrama K <sub>2</sub> O.....	31
4.3.3. Diagramas Harker y Fenner .....	32
4.3.4. Diagramas de multi elementos (spider) .....	41
4.4. Texturas y asociaciones minerales.....	44
4.4.1. Olivino.....	44
4.4.2. Plagioclasa.....	45
4.5. Perfiles composicionales .....	46
4.5.1. Olivino.....	46
4.5.2. Plagioclasa.....	48
4.6. Volátiles .....	51
4.7. Gerotermobarometría.....	53
4.7.1. Termómetro de olivino y vidrio .....	53
Capítulo 5. Discusión.....	55
5.1. Tratamiento de datos .....	55
5.2. Petrología:.....	56
5.2.1. Texturas y perfiles composicionales en olivino y plagioclasa .....	56
5.3. Análisis e interpretación de datos geoquímicos EN INCLUSIONES VÍTREAS .....	58
5.4. Volátiles .....	61
5.5. Mecanismo de ascenso.....	61
5.6. Modelo petrogenético.....	62
Capítulo 6. Conclusiones.....	65
Capítulo 7. Bibliografía .....	67
Capítulo 8. Anexos .....	71
8.1. Anexo A: Identificación y descripción de inclusiones vítreas en cortes transparentes nv10 Y nv11 .....	71
8.1.1. Corte transparente NV10: Olivinos.....	71
8.1.2. Corte transparente NV11: Olivinos.....	87

8.2. Anexo B: Ubicación de puntos medidos en EMPA .....	98
8.2.1. Olivino e inclusiones en corte transparente NV10 .....	98
8.2.2. Plagioclasas en corte transparente NV10 .....	107
8.2.3. Piroxeno en corte transparente NV10 .....	111
8.2.4. Titanomagnetita en corte transparente NV10 .....	113
8.2.5. Olivino e inclusiones en corte transparente nv11 .....	114
8.2.6. Piroxeno en corte transparente NV11 .....	119
8.2.7. Cromitas en corte transparente NV11 .....	120
8.3. Anexo C: Datos de Elementos Mayores, menores y trazas. ....	121
8.3.1. Mineral: Olivinos en corte transparente NV10 .....	121
8.3.2. Mineral: Plagioclasa en corte transparente NV10.....	139
8.3.3. Mineral: Piroxeno en corte transparente NV10.....	141
8.3.4. Mineral: Cromita y titanomagnetita en corte transparente NV10.....	141
8.3.5. Mineral: Vidrio de la matriz en corte transparente NV10 .....	142
8.3.6. Mineral: Olivino en corte transparente NV11 .....	143
8.3.7. Mineral: Piroxeno en corte transparente NV11 .....	154
8.3.8. Mineral: Cromita en corte transparente NV11 .....	154
8.4. Anexo D: Fórmulas estructurales .....	155
8.4.1. Corte NV10 .....	155
8.4.2. Corte NV11 .....	158
8.5. Anexo E: Recálculo de la composición de inclusiones vítreas con el uso de Petrolog. .....	160
8.5.1. Inclusiones vítreas hospedadas en olivino: Cortes NV10 y NV11.....	160
8.6. Anexo F: Composición roca total.....	163
8.7. Anexo G: Errores asociados a los instrumentos de medición. ....	164
8.7.1. Microsonda electrónica .....	164
8.7.2. Espectrómetro de masas de ablación láser.....	165

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Parámetros utilizados por la Microsonda Electrónica para el análisis de las muestras .....	18
Tabla 3.2: Parámetros usados para el análisis de muestras mediante LA-ICP-MS. ....	19
Tabla 3.3: Isótopos medidos a partir de elementos químicos cuantificados .....	19
Tabla 3.4: Isótopos escogidos considerados como resultados finales.....	20
Tabla 4.1: Resumen de resultados para termómetros de Putirka et al. (2007) y Beattie (1993).....	53
Tabla 4.2: Termómetro de olivino y vidrio según Putirka et al. (2007) y Beattie (1993). .....	54
Tabla 5.1: Datos "outlayer" de inclusiones en diagramas bivariantes.....	55
Tabla 8.1: Elementos mayores y menores del cristal de olivino NV10-oliA, medidos en EMPA, con las respectivas inclusiones vítreas del cristal. "-" indica elemento no medido. La unidad de medida es % wt. de óxidos. ....	121
Tabla 8.2: Elementos mayores y menores del cristal de olivino NV10-oliB y NV10-oliC, medidos en EMPA, con las respectivas inclusiones vítreas del cristal. "-" indica elemento no medido. La unidad de medida es % wt. de óxidos. ....	122
Tabla 8.3: Elementos mayores y menores del cristal de olivino NV10-oliD y NV10-oliF, medidos en EMPA, con las respectivas inclusiones vítreas del cristal. "-" indica elemento no medido. La unidad de medida es % wt. de óxidos .....	123
Tabla 8.4: Elementos mayores y menores del cristal de olivino NV10-oliI, medidos en EMPA, con las respectivas inclusiones vítreas del cristal. "-" indica elemento no medido. La unidad de medida es % wt. de óxidos .....	124
Tabla 8.5: Elementos mayores y menores del cristal de olivino NV10-oliK, medidos en EMPA, con las respectivas inclusiones vítreas del cristal. "-" indica elemento no medido. La unidad de medida es % wt. de óxidos .....	125
Tabla 8.6: Elementos mayores y menores del cristal de olivino NV10-oliL, medidos en EMPA, con las respectivas inclusiones vítreas del cristal. "-" indica elemento no medido. La unidad de medida es % wt. de óxidos .....	126
Tabla 8.7: Elementos mayores y menores del cristal de olivino NV10-oliO, medidos en EMPA, con las respectivas inclusiones vítreas del cristal. "-" indica elemento no medido. La unidad de medida es % wt. de óxidos .....	127
Tabla 8.8: Elementos mayores y menores del cristal de olivino NV10-oliP, medidos en EMPA, con las respectivas inclusiones vítreas del cristal. "-" indica elemento no medido. La unidad de medida es % wt. de óxidos .....	128
Tabla 8.9: Elementos mayores y menores del cristal de olivino NV10-oliG, medidos en EMPA, con las respectivas inclusiones vítreas del cristal. "-" indica elemento no medido. La unidad de medida es % wt. de óxidos .....	129
Tabla 8.10: Elementos mayores y menores del cristal de olivino NV10-oliR y NV10-oliU, medidos en EMPA, con las respectivas inclusiones vítreas del cristal. "-" indica elemento no medido. La unidad de medida es % wt. de óxidos .....	130

Tabla 8.11: Elementos mayores y menores del cristal de olivino NV10-oliS, medidos en EMPA, con las respectivas inclusiones vítreas del cristal. "-" indica elemento no medido. La unidad de medida es % wt. de óxidos .....	131
Tabla 8.12: Elementos mayores y menores del cristal de olivino NV10-oliR y NV10-oliU, medidos en EMPA, con las respectivas inclusiones vítreas del cristal. "-" indica elemento no medido. La unidad de medida es % wt. de óxidos .....	132
Tabla 8.13: Elementos trazas del cristal de olivino NV10-oliA, medidos en LA-ICP-MS, junto a sus respectivas inclusiones. "-" indica elemento bajo el límite de detección. Unidad medida en ppm.....	133
Tabla 8.14: Elementos trazas del cristal de olivino NV10-oliB, medidos en LA-ICP-MS, junto a sus respectivas inclusiones. Además, se adjunta información de cristal de plagioclasa NV10-plB. "-" indica elemento bajo el límite de detección. Unidad medida en ppm. ....	134
Tabla 8.15: Elementos trazas del cristal de olivino NV10-oliC y oliD, medidos en LA-ICP-MS, junto a sus respectivas inclusiones. Además, se adjunta información de cristal de plagioclasa NV10-plB. "-" indica elemento bajo el límite de detección. Unidad medida en ppm. ....	135
Tabla 8.16: Elementos trazas del cristal de olivino NV10-oliF y NV10-oliG, medidos en LA-ICP-MS, junto a sus respectivas inclusiones. Además, se adjunta información de cristal de plagioclasa NV10-plB. "-" indica elemento bajo el límite de detección. Unidad medida en ppm. ....	136
Tabla 8.17: Elementos trazas del cristal de olivino NV10-oliI, NV10-oliK y NV10-oliL, medidos en LA-ICP-MS, junto a sus respectivas inclusiones. Además, se adjunta información de cristal de plagioclasa NV10-plB. "-" indica elemento bajo el límite de detección. Unidad medida en ppm.....	137
Tabla 8.18: Elementos trazas del cristal de olivino NV10-oliO y NV10-oliP, medidos en LA-ICP-MS, junto a sus respectivas inclusiones. Además, se adjunta información de cristal de plagioclasa NV10-plB. "-" indica elemento bajo el límite de detección. Unidad medida en ppm. ....	138
Tabla 8.19: Elementos mayores y menores de los cristales de plagioclasa NV10-plgB/C/D y E, medidos en EMPA. "-" indica elemento no medido. La unidad de medida es % wt. de óxidos. ....	139
Tabla 8.20: Elementos mayores y menores de los cristales de plagioclasa NV10-plgH/F/Q1/Q2/Q3/Q4/Q5 y los microlitos MIC1 y MIC2, medidos en EMPA. "-" indica elemento no medido. La unidad de medida es % wt. de óxidos. ....	140
Tabla 8.21: Composición piroxeno en corte transparente NV10. La unidad de medida es % wt. de óxidos. ....	141
Tabla 8.22: Composición cromita y titanomagnetita en corte transparente NV10. La unidad de medida es % wt. de óxidos. ....	141
Tabla 8.23: Composición vidrio de la matriz en corte transparente NV10. La unidad de medida es % wt. de óxidos. ....	142
Tabla 8.24: Elementos mayores y menores del cristal de olivino NV11-oliA, medidos en EMPA, con las respectivas inclusiones vítreas del cristal. "-" indica elemento no medido. La unidad de medida es % wt. de óxidos .....	143
Tabla 8.25: Elementos mayores y menores del cristal de olivino NV11-oliB, medidos en EMPA, con las respectivas inclusiones vítreas del cristal. "-" indica elemento no medido. La unidad de medida es % wt. de óxidos .....	144

Tabla 8.26: Elementos mayores y menores del cristal de olivino NV11-oliC, medidos en EMPA, con las respectivas inclusiones vítreas del cristal. "-" indica elemento no medido. La unidad de medida es % wt. de óxidos .....	145
Tabla 8.27: Elementos mayores y menores del cristal de olivino NV11-oliD, medidos en EMPA, con las respectivas inclusiones vítreas del cristal. "-" indica elemento no medido. La unidad de medida es % wt. de óxidos .....	146
Tabla 8.28: Elementos mayores y menores del cristal de olivino NV11-oliE, medidos en EMPA, con las respectivas inclusiones vítreas del cristal. "-" indica elemento no medido. La unidad de medida es % wt. de óxidos .....	147
Tabla 8.29: Elementos mayores y menores del cristal de olivino NV11-oliH y NV11-oliI, medidos en EMPA, con las respectivas inclusiones vítreas del cristal. "-" indica elemento no medido. La unidad de medida es % wt. de óxidos .....	148
Tabla 8.30: Elementos mayores y menores del cristal de olivino NV11-oliJ y NV11-oliK, medidos en EMPA, con las respectivas inclusiones vítreas del cristal. "-" indica elemento no medido. La unidad de medida es % wt. de óxidos .....	149
Tabla 8.31: Elementos mayores y menores del cristal de olivino NV11-oliL, medidos en EMPA, con las respectivas inclusiones vítreas del cristal. "-" indica elemento no medido. La unidad de medida es % wt. de óxidos .....	150
Tabla 8.32: Elementos mayores y menores de los cristales de olivino NV11-oliU y NV11-oliY, medidos en EMPA, con las respectivas inclusiones vítreas del cristal. "-" indica elemento no medido. La unidad de medida es % wt. de óxidos .....	150
Tabla 8.33: Elementos trazas del cristal de olivino NV11-oliA y NV11-oliB, medidos en LA-ICP-MS, junto a sus respectivas inclusiones. "-" indica elemento bajo el límite de detección. Unidad medida en ppm. ....	151
Tabla 8.34 Elementos trazas del cristal de olivino NV11-oliD, NV11-oliE y NV11-oliG, medidos en LA-ICP-MS, junto a sus respectivas inclusiones. "-" indica elemento bajo el límite de detección. Unidad medida en ppm. ....	152
Tabla 8.35: Elementos trazas del cristal de olivino NV11-oliI y NV11-oliL, medidos en LA-ICP-MS, junto a sus respectivas inclusiones. "-" indica elemento bajo el límite de detección. Unidad medida en ppm. ....	153
Tabla 8.36: Elementos mayores y menores de los cristales de piroxeno NV11-pxA y olivino NV11-Oli-pxA, medidos en EMPA. "-" indica elemento no medido. La unidad de medida es % wt. de óxidos .....	154
Tabla 8.37: Elementos mayores y menores de del cristal de piroxeno NV11-pxP, medidos en EMPA. "-" indica elemento no medido. La unidad de medida es % wt. de óxidos .....	154
Tabla 8.38: Elementos mayores y menores de del cristal de cromita NV11-oxU1 y NV11-oxU2, medidos en EMPA. "-" indica elemento no medido. La unidad de medida es % wt. de óxidos.....	154
Tabla 8.39: Fórmula estructural para cristales de olivino analizados. Para la normalización se han considerado 4 oxígenos. ....	155
Tabla 8.40: Fórmula estructural para cristales de plagioclasa analizados. Para la normalización se han considerado 8 oxígenos. ....	156
Tabla 8.41: Fórmula estructural para cristales de piroxeno analizados. Para la normalización se han considerado 6 oxígenos. ....	157
Tabla 8.42: Fórmula estructural para cristales de cromita y titanomagnetita analizados. Para la normalización se han considerado 4 oxígenos. ....	158

Tabla 8.43: Fórmula estructural para cristales de olivino analizados. Para la normalización se han considerado 4 oxígenos. ....	158
Tabla 8.44: Recálculo de la composición de inclusiones vítreas con Petrolog. La unidad de medida es % wt. de óxidos. ....	160
Tabla 8.45: Porcentaje de variación de las inclusiones recalculadas respecto a sus concentraciones medidos en EMPA.....	161
Tabla 8.46: Datos de la composición de la roca total utilizados. Fuente: GEOROC ..	163
Tabla 8.47: Error asociado al análisis de elementos mediante microsonda electrónica (EMPA), estimado a partir del error entregado por cada punto medido en las inclusiones vítreas. ....	164
Tabla 8.48: Error asociado al análisis de elementos mediante LA-ICP-MS, estimado a partir del error reportado por Jochum et al. (2011) para el estándar Nist SRM 610 .....	165

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Esquema de la configuración tectónica en los Andes del Sur. LOFZ: Sigla en inglés, de Zona de Falla de Liquiñe-Ofqui; SVZ: Zona Volcánica Sur. Las zonas ensombrecidas representan áreas con altitudes mayores a 2000 m.s.n.m. Las bolas representan mecanismos focales de los terremotos asociados a la Zona Volcánica Sur. Imagen hecha por Rosenau et al. (2006).....	9
Figura 2.2. Mapa geológico del Volcán Llaima (Naranjo y Moreno, 2005) y modificado por Bouvet et al. (2011). Los flujos de lava históricos están indicados con la etiqueta del respectivo año y los prehistóricos se encuentran indiferenciados y marcados con líneas oblicuas. F3: Fisural 3 (~1850).....	15
Figura 3.1: Ubicación de las muestras obtenidas para los cortes NV10 y NV11. Imagen tomada en Google Earth. ....	16
Figura 4.1: Fotomicrografía de las familias de inclusiones vítreas, F1 y F2, en el cristal de olivino NV10-oli1. A) Cristal NV10-oliA; B) Zoom en F1, parte inferior del cristal; C) Zoom en F2, parte media izquierda del cristal; D) Zoom F1, parte superior de cristal. Todas las descripciones de las MIAS y cristales huésped se encuentran en el Anexo A.....	25
Figura 4.2: Fotomicrografía del cristal de olivino NV10-oliL y las inclusiones vítreas hospedadas en él. A la izquierda, se tiene la imagen en microscopio óptico, a luz transmitida y nícoles paralelos. A la derecha, su imagen en SEM, con electrones retrodispersados.....	26
Figura 4.3: Cristal corresponde a una plagioclasa, NV10-plgE. A la izquierda, fotomicrografía en microscopio óptico, con luz transmitida a nícoles paralelos. A la derecha, el mismo cristal visto con electrones retrodispersados en SEM. En esta última imagen, se aprecia la zonación concéntrica de la plagioclasa analizada.....	26
Figura 4.4: Diagrama de clasificación de feldspatos generado en IgPet. ....	27
Figura 4.5: Diagrama de clasificación de piroxenos generado en IgPet. Los rombos púrpuras corresponden a microlitos de piroxeno en la matriz de la muestra, escogidos aleatoriamente. Los círculos rojos, corresponden a puntos del único fenocristal de piroxeno encontrado en ambos cortes. El triángulo rellanado en verde corresponde a un borde de reacción en un microlito de olivino.....	28
Figura 4.6: Diagrama de clasificación de rocas volcánicas TAS, propuesto por Le Bas et al. (1986). Se clasifican las inclusiones vítreas hospedadas en olivino de los cortes transparentes NV10 y NV11, el vidrio de la matriz medido en NV10 y la roca total. La unidad de medida es %wt. Diagrama generado en Petrograph (Petrelli, 2005).....	30
Figura 4.7: Diagrama K2O propuesto por Peccerillo y Taylor (1976). Diagrama generado en Petrograph.....	31
Figura 4.8: Diagramas Harker para los óxidos mayoritarios Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> y Feo total, en inclusiones vítreas y vidrio de la masa fundamental. Generado en Petrograph (Petrelli, 2005). Las líneas de tendencias son solo referenciales.....	34
Figura 4.9: Diagramas Harker para los óxidos mayoritarios CaO y MgO, en inclusiones vítreas y vidrio de la masa fundamental. Generado en Petrograph (Petrelli, 2005). Las líneas de tendencia son solo referenciales. ....	35

Figura 4.10: Diagramas Harker para los óxidos mayoritarios $K_2O$ y $Na_2O$ , en inclusiones vítreas y vidrio de la masa fundamental. Generado en Petrograph (Petrelli, 2005). Las líneas de tendencia son solo referenciales. ....	36
Figura 4.11: Diagramas de Fenner para los óxidos mayoritarios $FeO$ total y $Al_2O_3$ , en inclusiones vítreas y vidrio de la masa fundamental. Generado en Petrograph (Petrelli, 2005). Las líneas de tendencia son solo referenciales. ....	38
Figura 4.12: Diagramas de Fenner para los óxidos mayoritarios $CaO$ y $SiO_2$ , en inclusiones vítreas y vidrio de la masa fundamental. Generado en Petrograph (Petrelli, 2005). Las líneas de tendencia son solo referenciales. ....	39
Figura 4.13: Diagramas de Fenner para los óxidos mayoritarios $MnO$ y $P_2O_5$ , en inclusiones vítreas y vidrio de la masa fundamental. Generado en Petrograph (Petrelli, 2005). Las líneas de tendencia son solo referenciales. ....	40
Figura 4.14: Diagrama Spider de multi elementos para inclusiones vítreas hospedadas en plagioclasa respecto al manto primitivo de Sun y McDonough (1989) .....	42
Figura 4.15: Diagrama Spider de multi elementos para inclusiones vítreas hospedadas en olivino respecto a la composición de la roca total de Reubi et al. (2011) .....	43
Figura 4.16:Glómero de olivinos y plagioclasas. Fotomicrografía tomada en SEM. ....	44
Figura 4.17: Cristal NV10-plgF. Plagioclasa con intensa reabsorción en su núcleo, evidenciando texturas de sieve en su núcleo, rodeado por un borde de distinta composición que no está reabsorbido. ....	45
Figura 4.18: Perfil composicional realizado en cristal de olivino NVII-Oli U en términos del porcentaje de forsterita, medidos según la línea roja .....	46
Figura 4.19: Perfil composicional realizado en cristal de olivino NVII- Oli U en términos del porcentaje de forsterita, medidos según la línea roja .....	47
Figura 4.20: Perfil composicional realizado en cristal de olivino NV10- Oli G en términos del porcentaje de forsterita, medido según la líneas roja .....	47
Figura 4.21: Perfiles realizados en EPMA en cristales de plagioclasas del corte NV10. La línea roja indica la dirección sobre la cual se realizaron las mediciones, desde el núcleo (n) hasta el borde (b).La línea divisoria azul marca las zonaciones presentes. ....	48
Figura 4.22: Perfil composicional en términos del porcentaje de Anortita (%An) del cristal NV10-plgC, medidos según las líneas rojas de la figura 5.1 .....	49
Figura 4.23: Perfil composicional en términos del porcentaje de Anortita (%An) del cristal NV10-plgD, medidos según las líneas rojas de la figura 5.1 .....	49
Figura 4.24: Perfil composicional en términos del porcentaje de Anortita (%An) del cristal NV10-plgE, medidos según las líneas rojas de la figura 5.1 .....	50
Figura 4.25: Perfil composicional en términos del porcentaje de Anortita (%An) del cristal NV10-plgF, medidos según las líneas rojas de la figura 5.1 .....	50
Figura 4.26: Perfil composicional en términos del porcentaje de Anortita (%An) del cristal NV10-plgH, medidos según las líneas rojas de la figura 5.1 .....	50
Figura 4.27: Contenido de volátiles en inclusiones vítreas hospedadas en olivino versus contenido de $MgO$ . ....	51
Figura 4.28: Contenido de volátiles en inclusiones vítreas hospedadas en olivino versus contenido de $SiO_2$ .....	52
Figura 5.1: Diagrama Spider de multielementos para la roca total (Reubi et al. 2011) normalizado al manto primitivo (Sun y McDonough, 1989) .....	60
Figura 5.2: Esquema del modelo petrogenético. (A) da cuenta del ascenso de magmas producto de la fusión parcial del manto y que se estacionan en una cámara magmática bajo el	

volcán Llaima a 4 km de profundidad. (B) representa el interior de la cámara y los procesos que ocurren dentro de ella: Cristalización fraccionada de olivino, plagioclasa y cromita, seguido de enstatita. (C) representa el ascenso magmático previo a la erupción, donde se la plagioclasa se desequilibra y se refunde (sieves), se crea el borde de labradorita en ellas y cristalizan microlitos de plagioclasa, olivino, augita, pigeonita y titanomagnetita. .... 64

Figura 8.1: Cristal NV10-oliA visto a nícoles paralelos .....	71
Figura 8.2: Cristal NV10-oliB visto a nícoles paralelos .....	72
Figura 8.3: Cristal NV10-oliC visto a nícoles paralelos. ....	73
Figura 8.4: Cristal NV10-oliD, visto a nícoles paralelos .....	74
Figura 8.5: Cristal NV10-oliF, visto a nícoles paralelos. ....	75
Figura 8.6: Cristal NV10-oliG, visto a nicoles paralelos. ....	76
Figura 8.7: Cristal NV10-oliH, visto a nicoles paralelos. ....	77
Figura 8.8: Cristal NV10-oliI, visto a nicoles paralelos.....	78
Figura 8.9: Cristal NV10-oliK, visto a nicoles paralelos. ....	79
Figura 8.10: Cristal NV10-oliL, visto a nicoles paralelos.....	80
Figura 8.11: Cristal NV10-oliO, visto a nicoles paralelos. ....	81
Figura 8.12: Cristal NV10-oliP. Imagen tomada en SEM.....	82
Figura 8.13: Cristales NV10-oliQ1 y NV10-oliQ2, vistos en SEM. ....	83
Figura 8.14: Cristal NV10-oliR, visto a nicoles paralelos. ....	84
Figura 8.15: Cristal NV10-oliS, visto a nicoles paralelos. ....	85
Figura 8.16: Cristal NV10-oliU, visto a nícoles paralelos. ....	86
Figura 8.17: Cristal NV11-oliA-CX1, visto a nicoles paralelos. ....	87
Figura 8.18: Cristal NV11-oliA-CX2, visto en SEM.....	88
Figura 8.19: Cristal NV11-oliB, visto a nicoles paralelos. ....	89
Figura 8.20: Cristal NV11-oliC, visto a nicoles paralelos. ....	90
Figura 8.21: Cristal NV11-oliD, visto a nicoles paralelos. ....	91
Figura 8.22: Cristal nv11-oliE, visto a nicoles paralelos.....	92
Figura 8.23: Cristal NV10-oliH, visto a nicoles paralelos. ....	93
Figura 8.24: Cristal NV11-olil, visto a nicoles paralelos.....	94
Figura 8.25: Cristal NV11-oliJ, visto a nicoles paralelos. ....	95
Figura 8.26: Cristal NV11-oliK, visto en SEM. ....	96
Figura 8.27: Cristal NV11-oliL, visto en SEM. ....	97
Figura 8.28: Fotomicrografía de oliA en EMPA. A) Puntos medidos en cristal. B) Zoom indicado por cuadrado de las inclusiones medidas. ....	98
Figura 8.29: Fotomicrografía de oliB en EMPA. A) Puntos medidos en cristal. B) Zoom indicado por rectángulo de las inclusiones medidas. ....	98
Figura 8.30: Fotomicrografía de oliC en EMPA. A la izquierda, untos medidos en cristal; a la derecha, la inclusión medida. ....	99
Figura 8.31: Fotomicrografía de oliD en EMPA. A) Zoom en inclusión D-49. B) Zoom en inclusión D-43.....	100
Figura 8.32: A la izquierda, fotomicrografía del cristal NV10-oliF en EMPA. A la derecha, zoom en inclusiones medidas indicado por rectángulo. ....	101
Figura 8.33: A la izquierda, fotomicrografía del cristal NV10-olil en EMPA. A la derecha, zoom en inclusiones medidas indicado por rectángulo. ....	101
Figura 8.34: Fotomicrografía del cristal NV10-oliK. La fecha indica la posición de la inclusión K-52 en el cristal.....	102

Figura 8.35: A la izquierda, fotomicrografía del cristal NV10-oliL en EMPA. A la derecha, zoom en inclusiones medidas indicado por rectángulo .....	102
Figura 8.36: Fotomicrografía de oliO en EMPA. A) y B) representan los zooms en las inclusiones indicados en los rectángulos sobre el cristal. ....	103
Figura 8.37: A la izquierda, fotomicrografía del cristal NV10-oliP en EMPA. A la derecha, zoom en inclusiones medidas indicado por el círculo. ....	104
Figura 8.38: Fotomicrografía de oliR en EMPA. ....	104
Figura 8.39: A la izquierda, fotomicrografía del cristal NV10-oliS en EMPA. A la derecha, ubicación inclusiones medidas. ....	105
Figura 8.40: Fotomicrografía de oliU en EMPA. ....	105
Figura 8.41: Fotomicrografías de los cristales NV10-oliQ1/Q2. Las inclusiones medidas están indicadas en cada cristal. ....	106
Figura 8.42: Fotomicrografía de plgB en EMPA. ....	107
Figura 8.43: Fotomicrografía de plgC en EMPA .....	107
Figura 8.44: Fotomicrografía cristal NV10-plgD en EMPA.....	108
Figura 8.45: Fotomicrografía cristal NV10-plgE en EMPA .....	108
Figura 8.46: Fotomicrografía cristal NV10-plgF .....	109
Figura 8.47: Fotomicrografía cristal NV10-plgH .....	109
Figura 8.48: Fotomicrografía glómero Q en EMPA. En la imagen se encuentra la ubicación de cada punto medido. ....	110
Figura 8.49: Fotomicrografía microlitos de plagioclasa NV10-plgMIC1 y MIC2 .....	110
Figura 8.50: Fotomicrografía pxA (3) en EMPA.....	111
Figura 8.51: Fotomicrografía pxB (4) y pxC (5) en EMPA .....	111
Figura 8.52: Fotomicrografía pxD (6) en EMPA.....	112
Figura 8.53: Figura 8.54: Fotomicrografía en EMPA óxidos de hierro en matriz.....	113
Figura 8.55: Fotomicrografía del glómero A. En ella se indican los puntos medidos en olivino para CX1 y CX2. A y B): Zoom en los rectángulos donde se encuentran las inclusiones analizadas .....	114
Figura 8.56: Fotomicrografía cristal NV11-oliB en EMPA. A la izquierda, ubicación de los puntos medidos en cristal; a la derecha, puntos en inclusiones.....	115
Figura 8.57: Fotomicrografía cristal NV11-oliC en EMPA. A la izquierda, ubicación de los puntos medidos en cristal; a la derecha, puntos en inclusiones según zoom en rectángulo. ....	115
Figura 8.58: Fotomicrografía cristal NV11-oliD en EMPA. A la izquierda, ubicación de los puntos medidos en cristal; a la derecha, puntos en inclusiones. ....	116
Figura 8.59: Fotomicrografía cristal NV11-oliH en EMPA. A la izquierda, ubicación de los puntos medidos en cristal; a la derecha, puntos en inclusiones. ....	116
Figura 8.60: Fotomicrografía cristal NV11-olil en EMPA. A la izquierda, ubicación de los puntos medidos en cristal; a la derecha, puntos en inclusiones según el rectángulo marcado. ....	117
Figura 8.61: Fotomicrografía cristal NV11-oliJ en EMPA. A la izquierda, ubicación de los puntos medidos en cristal; a la derecha, puntos en inclusiones.....	117
Figura 8.62: Fotomicrografía cristal NV11-oliK en EMPA. A la izquierda, ubicación de los puntos medidos en cristal; a la derecha, puntos en inclusiones.....	118
Figura 8.63: Fotomicrografía cristal NV11-oliK en EMPA. A la izquierda, ubicación de los puntos medidos en cristal; a la derecha, puntos en inclusiones.....	118

Figura 8.64: Fotomicrografía de microlito de olivino (olipxA) con borde de reacción de piroxeno (pxA) en EMPA. En la imagen corresponde pxA corresponde a “T-Px2” y olipxA a “T-Px1”. Nota: El olivino fue medido donde corresponde. .... 119

Figura 8.65: Fotomicrografía cristal NV11-pxP en EMPA. .... 119

Figura 8.66: Fotomicrografía en EMPA de los óxidos NV11-oxU1 y oxU2. .... 120

# CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. PRESENTACIÓN

La geodinámica del margen chileno, desde el Jurásico Inferior, corresponde a un margen tectónico activo de convergencia de placas (Charrier et al., 2007), donde la placa de Nazca subducta bajo la placa Sudamericana y es responsable, junto al gran control estructural, de la geología, morfología y, en consecuencia, de las principales unidades morfoestructurales del país. Entre estas últimas destacan la Cordillera de la Costa y de Los Andes, como resultado de los arcos volcánicos generados en el pasado para la primera, y en la actualidad para la segunda.

La Cordillera de los Andes presenta cuatro segmentos de volcanismo activo, la Zona Volcánica Norte (ZVN, 6°N- 8°S), Zona Volcánica Central (ZVC, 16°-28°S), Zona Volcánica Sur (ZVS, 33°-46°S) y Zona Volcánica Austral (ZVA, 49-56°S). La Zona Volcánica Sur, ubicada entre Santiago y Coyhaique, corresponde al sector con mayor actividad eruptiva andina y posee dos de los cuatro volcanes más activos de Sudamérica: El Llaima y Villarrica.

El volcán Llaima corresponde a un estratovolcán de forma cónica, ubicado en la Región de la Araucanía, Chile. Está localizado específicamente en la Cordillera de los Andes, cercano a la frontera con Argentina y sus coordenadas geográficas son 38°41'51''S 71°43'50''O. Es uno de los volcanes más activos de Chile con más de 50 erupciones desde el año 1640 d.C. (Bouvet de Maisonneuve et al. 2011). Tiene una altura máxima de 3125 m.s.n.m., un área basal de 490 km.<sup>2</sup> y un volumen aproximado de 400 km<sup>3</sup>. Pertenece a la Zona Volcánica Sur (ZVS) y es uno de los volcanes más activos de los Andes.

Estructuralmente, es un complejo volcánico de escudo y mixto compuesto (Naranjo y Moreno, 2005). La estructura de escudo volcánico comprende la base desde aproximadamente los 1000 m.s.n.m., por el norte, este y oeste, y los 450 m.s.n.m. por el sur, hasta la cota de los 2250 m. Sobre esta altura se eleva un estrato volcán mixto compuesto de dos cimas principales, alineadas en dirección NNE. Además, posee unos 40 conos de escoria que se distribuyen sobre sus laderas. Se presenta activo desde el Pleistoceno superior.

Los depósitos eruptivos del volcán corresponden principalmente a lavas y en menor proporción a piroclastos de composición andesítica basáltica y andesítica- dacítica. Las rocas son porfídicas con fenocristales de plagioclasa, olivino y en menor medida piroxenos (Naranjo y Moreno, 2005).

El Llaima ha mostrado una variedad de comportamientos eruptivos a lo largo de su historia. Debido a su estructura y morfología la actividad eruptiva puede ser dividida en tres etapas (Bouvet de Maisonneuve et al. 2011). La primera y más antigua es principalmente efusiva, donde la construcción del edificio volcánico en la etapa pre holocénica fue

principalmente por flujos de lava basáltica- andesítica a dacítica, seguido de una segunda etapa, entre 13000 y 9500 años atrás, donde la actividad volcánica se hace más explosiva, depositándose grandes extensiones de ignimbrita máfica. La tercera etapa corresponde a una actividad menos explosiva con la presencia de numerosos flujos de lavas, de composición basáltica a andesítica-basáltica, asociados a erupciones de tipo estromboliano.

Esta memoria de título busca reconstruir los procesos ígneos durante la evolución magmática del Volcán Llaima mediante el estudio de inclusiones vítreas, determinando la composición del magma parental y de los eventos posteriores en su erupción del 1957. Para lograr esto, se analizan dos cortes transparentes (NV10 y NV11), correspondientes a rocas de depósitos de la erupción antes mencionada.

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. OBJETIVO GENERAL**

Determinar la composición química del magma eruptado en volcán Llaima el año 1957, a través del estudio de las inclusiones vítreas presentes en los minerales de las rocas formadas.

### **1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar petrográficamente la temporalidad de atrapamiento de las familias de inclusiones vítreas en las fases minerales presentes.
- Determinar la concentración de elementos mayoritarios y trazas para las inclusiones vítreas.
- Determinar las condiciones de presión y temperatura durante la formación de los cristales y el atrapamiento de las inclusiones.
- Elaborar un modelo de evolución magmático a partir de los datos obtenidos y la bibliografía disponible.

### **1.3. INCLUSIONES VÍTREAS**

Las inclusiones vítreas son un instrumento muy útil cuando se quiere determinar la composición química y condiciones de presión y temperatura del magma parental. Éstas corresponden a pequeñas cantidades o gotas del fundido silicatado que quedan atrapados en intersticios del cristal durante su proceso de crecimiento y se caracterizan por la presencia de volátiles, vidrio y cristales en su interior. Para efectos de este trabajo se considera que las inclusiones contienen en su interior la composición del magma a partir del cual se formaron (Cannatelli et al. 2016), ya que una vez atrapadas en los cristales éstas se comportan como un sistema cerrado. Por lo tanto, un estudio metódico de las inclusiones vítreas presentes en las fases minerales de la roca permitiría conocer de manera precisa la composición del magma a medida que cristaliza, además de las condiciones P-T de la misma. Todos estos factores en conjunto permiten establecer un modelo de evolución magmática que permita comprender de mejor forma los procesos pre-eruptivos del volcán Llaima.

### **1.4. HIPÓTESIS DE TRABAJO**

Históricamente las erupciones del volcán Llaima se han caracterizado por ser relativamente efusivas, con grandes coladas de lavas que emergen desde su interior, tal cual lo fue la de 1957. Un detallado estudio petrográfico de las rocas permite conocer la mineralogía, texturas involucradas y da una primera aproximación sobre las inclusiones vítreas. Precisamente, la composición del magma parental queda registrado en estas últimas. Su estudio mediante técnicas analíticas de alta complejidad permite conocer la composición del magma parental en términos de su contenido en elementos mayoritarios, minoritarios, trazas y volátiles. Esta información es relevante para determinar y comprender de mejor manera los procesos ígneos ocurridos durante la evolución del magma durante su ascenso e interacción con la corteza.

## 1.5. UBICACIÓN Y ACCESOS

El volcán Llaima está ubicado en la Región de la Araucanía, Provincia de Cautín ( $38^{\circ}41,5'S-71^{\circ}44'W$ ), dentro del Parque Nacional Conguillío-Los Paraguas, comunas de Curacautín, Melipeuco, Cunco y Vilcún.

Para acceder a los diferentes sectores del volcán se puede realizar un viaje a través de tres rutas desde la Ruta 5 Sur. A los sectores noroeste y norte del volcán se accede por el camino que une Victoria con Curacautín (Ruta 181) en un tramo de 56 km, o mediante el camino desde Lautaro (Ruta S-11-R) en un tramo de 57 km.

El acceso al sector occidental se alcanza por el camino que une la localidad de Cajón con Cherquenco (Ruta S-31), en un tramo de 45 km

Al sector sur se accede por un camino pavimentado (95 km) y otro ripiado (12 km) desde Temuco hasta Melipeuco (Ruta S-51).

A la zona oriental se accede mediante el camino que une las localidades de Melipeuco y Curacautín (Ruta R-925-S)

## CAPITULO 2. ANTECEDENTES

### 2.1. SÍNTESIS BIBLIOGRÁFICA

El primer estudio detallado del volcán Llaima se debe a Naranjo y Moreno (1991) y consiste en una caracterización temporal, de explosividad y química de las etapas eruptivas del volcán, junto a un detallado estudio de los principales depósitos dejados por ellas. Este estudio concluye que el volcán posee una gran cámara magmática.

Un par de décadas después, los mismos autores publicaron un estudio del Volcán Llaima (Naranjo y Moreno, 2005) que incluye su estratigrafía post glacial, mapa geológico con escala 1:50000, características petrográficas y geoquímicas de sus productos, e historia evolutiva.

Ruth y coautores (2008) estudian los procesos que ocurren en un sistema volcánico-magmático previo a erupciones estrombolianas, debido al largo y continuo periodo de desgasificación previo a estos eventos más explosivos. Con el fin de entender dichos procesos, los autores enfocan su estudio en los productos volcánicos de la erupción del 2008 del volcán Llaima.

En 2008, Putirka publica un trabajo de gran utilidad para estimar las condiciones de presión y temperatura en procesos volcánicos e ígneos en general, mediante la revisión de geotermómetros y geobarómetros.

Bouvet de Maisonneuve et al. (2011) publican un estudio petrológico sobre las lavas eruptadas por el Llaima durante el crecimiento del edificio volcánico en el Holoceno Tardío, concluyendo que sus composición química, mineralogía y cristalinidad son similar. Además, los autores determinan las condiciones termodinámicas de cristalización y evolución de los distintos magmas en las erupciones del Holoceno, proponiendo un modelo de almacenamiento de los magmas en cámaras magmáticas y diques, y mecanismo de erupción basado en la continua desgasificación y recarga de magmas menos evolucionados.

Reubi et al. (2011) muestran como el desequilibrio en las series de Uranio de lavas derivadas del manto eruptadas por el volcán Llaima son considerablemente disminuidas por la asimilación de las rocas plutónicas que forman el basamento subvolcánico del volcán Llaima.

En un estudio del 2012, Bouvet de Maisonneuve y coautores comparan erupciones del volcán Llaima en el Holoceno tardío en términos de texturas, contenido de fenocristales y zonaciones minerales para determinar los procesos responsables del estilo eruptivo. Los autores sugieren que las erupciones recientes tienen como origen una misma cámara magmática, debido a las similitudes composicionales y en mineralogía de los materiales volcánicos eruptados. Este estudio se enfoca también en las zonaciones de las plagioclasas y

sus texturas, relacionando la composición de éstas y sus evidentes desequilibrios a la recarga en la cámara de un magma más caliente y máfico. En consecuencia, los autores proponen que las erupciones volcánicas estrombolianas, precedidas de constantes periodos calmos de desgasificación, se deben a la recarga magmática anteriormente mencionada, que disminuiría la viscosidad y aumentaría el contenido de volátiles presentes en el fundido.

Para tener una mejor comprensión de las inclusiones vítreas presentes en las fases minerales, Cannatelli et al. (2016) publican una revisión detallada de los métodos de estudio y análisis, en particular enfocándose en el concepto de inclusiones vítreas como indicador geoquímico de la composición del magma parental y de las condiciones P-T de este.

## 2.2. ERUPCIÓN VOLCÁN LLAIMA DE 1957

A partir de la memoria de grado de la Geógrafa de la Universidad de Chile Pía Navarrete Pimiento, se tiene una recopilación de los hechos ocurridos que anteceden a la actividad eruptiva del Llaima en 1957, y de la erupción misma:

*“La actividad se presentó del 14 de enero hasta noviembre de 1957. Estuvo acompañada de actividad precursora, tanto ruidos subterráneos como sismos volcánicos. Esta erupción presentó fisuras laterales hacia el N, E y SE en la pendiente del volcán, con fuentes de lava a altas tasas y generación de lahares con flujos de lava basáltica voluminosa (Delgado et al., 2015). Igualmente, se puede describir en tres etapas:*

*En la etapa 1, que comprende entre el 14 de enero al 19 de febrero, se produjeron ruidos subterráneos perceptibles hasta Victoria. También se percibieron sismos volcánicos. Se caracterizó por erupciones menores con débil emisión de ceniza.*

*En la etapa 2, se intensificó la actividad eruptiva entre el 19 y 20 de febrero, registrando salida de lava. El día 21 de febrero se formó un lahar que bajó por el lado de Trifultruful, destruyendo un puente provisorio. Esto provocó que los ríos Trifultruful y Allipén cambiaran de curso generando inundaciones. Adicionalmente se cortaron los puentes entre Cunco - Collahuén, y Peuco - Villa García.*

*En la etapa 3, el 22 de febrero a las tres de la mañana se reanudó la actividad. En el cráter principal se formó un nuevo cráter al interior de éste, el cual formó una columna eruptiva, la cual depositó una capa de cenizas hasta Temuco. Hubo emisión de vapor de agua y una colada de lava en el flanco norte, que avanzó a una velocidad de ~6 km/hr. El día 23 se produjeron lahares que afectaron a Peuco. Finalmente, el día 24 de febrero cesó la actividad eruptiva, manifestando fumarolas en cráteres y fisuras. La caída de ceniza dejó una capa de 2 cm al pie del volcán. Sin embargo, producto de la lava, se produjeron incendios forestales que perduraron hasta fines de abril de 1957 en la zona de Captrén (DIARIO AUSTRAL DE TEMUCO, 1957; HANTKE, 1959; CASERTANO, 1963, en MORENO, s/f).”*

## 2.3. MARCO GEOLÓGICO

### 2.3.1. CONTEXTO GEODINÁMICO

El volcanismo presente en los distintos volcanes de la Cordillera de los Andes es el resultado de la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana. Este contexto geodinámico está inmerso dentro del ciclo tectónico Andino (Jurásico Inferior- Presente), definido por Charrier et al. (2007). En este ciclo se reactiva la subducción del margen chileno y como consecuencia se ha generado un arco magmático Andino que ha continuado de manera casi ininterrumpida hasta el presente.

El volcán Llaima está ubicado casi encima del trazado de la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui, y forma parte de los volcanes de la Zona Volcánica Sur (ZVS, 33°- 46°S), existiendo una relación directa entre la actividad magmática de éste y la presencia de esta estructura.

La Zona de Falla Liquiñe-Ofqui (ZFLO), es un sistema estructural antiguo que está presente como un rasgo morfotectónico entre los 38° y 46° S. Ha sido considerada a gran escala como una mega falla dextral, debido a su posición paralela a la fosa, el arreglo geométrico de las estructuras de segundo orden y la abundancia de indicadores cinemáticos de desplazamiento horizontal.

La ZFLO controla parcialmente la ocurrencia, distribución y la geometría de los principales estratovolcanes de los Andes del sur. Aunque presentaría una baja tasa de desplazamiento, la ZFLO es una estructura activa con efectos sobre el volcanismo. En su segmento medio, donde está ubicado el volcán Llaima, el cizalle dextral distribuido a lo ancho del arco volcánico se manifiesta como apertura de megagrietas de tensión, sin transporte lateral significativo, acompañado de alzamiento local de superficies. Así, el volcanismo ocurre en diferentes contextos tales como estructuras antiguas del basamento, grietas de tensión y, finalmente, sobre las fallas maestras que concentran el ajuste vertical de bloques (Lara et al., 2006).

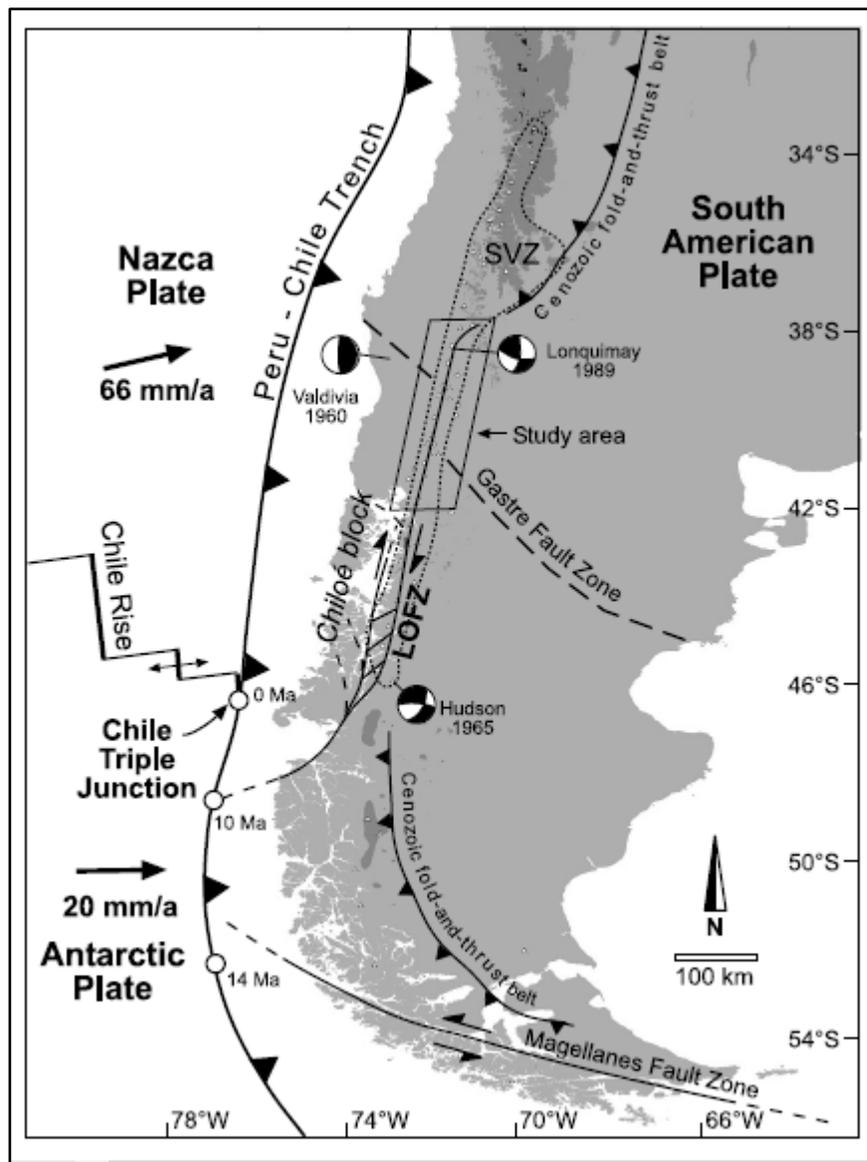


Figura 2.1: Esquema de la configuración tectónica en los Andes del Sur. LOFZ: Sigla en inglés, de Zona de Falla de Liquiñe-Ofqui; SVZ: Zona Volcánica Sur. Las zonas ensombrecidas representan áreas con altitudes mayores a 2000 m.s.n.m. Las bolas representan mecanismos focales de los terremotos asociados a la Zona Volcánica Sur. Imagen hecha por Rosenau et al. (2006)

## 2.3.2. MARCO GEOLÓGICO LOCAL

La carta geológica de Chile, en su apartado “Geología del Volcán Llaima” (Naranjo y Moreno, 2005), cubre un área de 1800 km<sup>2</sup>, y comprende el edificio volcánico principal, centros eruptivos adventicios y los productos emitidos de un radio de 30 km desde la cima. Al ser el Llaima un centro volcánico restringido, el presente marco geológico comprende las principales unidades que forman el volcán y las unidades geográficamente cercanas e importantes para el mismo.

### 2.3.2.1 BASAMENTO DEL VOLCÁN:

El basamento sobre el cual se ha edificado el Volcán Llaima está formado por tres unidades: 1) Grupo Plutónico Melipeuco (Mm) del Mioceno, 2) Formación Malleco (PPlim) del Plioceno-Pleistoceno Inferior y 3) Complejo Volcánico Sierra Nevada (Plmsn) del Pleistoceno Medio a Superior. Se reconoce además la existencia de una rama del Sistema de Fallas Liquiñe-Ofqui.

#### GRUPO PLUTÓNICO MELIPEUCO (Mm)

Corresponde a rocas graníticas en el entorno del pueblo de Melipeuco, las cuales subyacen en discordancia erosiva a la Formación Malleco. Los afloramientos se distribuyen discontinuos al norte, oeste y este del volcán, siendo éstos últimos los más extensos. Las litologías reconocidas corresponden a monzogranitos, granodioritas de grano grueso, y en menor cantidad, dioritas cuarcíferas de hornblenda. La edad de este grupo es del Mioceno medio (Suarez y Emparán, 1997).

#### FORMACION MALLECO (PPlim)

Esta formación sobreyace con discordancia angular a las unidades estratificadas de la Formación Cura-Mallín, y de erosión al Grupo Melipeuco. Está parcialmente cubierta por el Conjunto de Volcanes de la Cordillera Principal.

Distribuida al oeste del Volcán Llaima, está formada por una sucesión alternante de lavas andesítico- basálticas a andesíticas, con niveles volcanoclásticos. La sucesión esta levemente inclinada hacia el oeste.

La edad estimada de esta formación es Plioceno-Pleistoceno Inferior (Suárez y Emparán, 1997).

## COMPLEJO VOLCÁNICO SIERRA NEVADA (Plmsn)

Estructura formada por un estratovolcán principal extinto y un cordón fisural de rumbo N65°E, ubicados al NNE del Llaima. Su base alcanza cerca de 30 km de diámetro y está en discordancia a rocas estratificadas y plutónicas del Mioceno. Su altura es de 2554 m.s.n.m.

Sus laderas glaciadas tienen alternancias de 3 a 5 metros de espesor de basaltos de olivino y andesitas, en forma de coladas de lava macizas y brechosas

La edad estimada del complejo es del Pleistoceno Medio a Superior (Suarez y Emparán, 1997).

## ZONA DE FALLA LIQUIÑE-OFQUI (ZFLO)

Al este del volcán y a lo largo del río Trifultruful está presente una de las ramas del ZFLO, donde la orientación del lineamiento es NNE (Hervé, 1976,1984; Hervé et al., 1979)

Este sistema de falla es el principal rasgo estructural del basamento. En terreno, la ZFLO está representada por zonas de cizalle dúctil y fallas frágiles de tendencia norte-sur (López et al., 1995 b)

La reactivación pleistocena de esta estructura pudo haber controlado el emplazamiento de edificios volcánicos neógenos tardíos como el volcán Llaima.

### 2.3.2.2 ESTRUCTURA Y ESTRATIGRAFÍA VOLCÁNICA

Considerando criterios morfoestructurales, estratigráficos, geoquímicos y litológicos, en el volcán Llaima se ha definido la existencia de las siguientes unidades:

#### LLAIMA ANCESTRAL (Lla1 y Lla2) Pleistoceno Medio – Superior

Estas unidades corresponden a secuencias formadas principalmente por lavas basálticas a andesíticas macizas, con intercalaciones brechosas e intrusiones de lacolitos. Son los restos de una estructura volcánica primitiva.

Los remanentes de esta unidad se distribuyen alrededor del volcán y sus capas muestran un manto radial. La Unidad Llaima Ancestral 1 (Lla1) corresponde al nivel más elevado y potente, cuyo espesor máximo alcanza 600 m. La unidad Llaima Ancestral 2 (Lla2) es el nivel topográficamente más bajo, y tiene un espesor de hasta 300 m. Ambas unidades estratificadas se distribuyen principalmente en el sector sur del volcán, y en el resto del área se reconocen escasos afloramientos de esta secuencia debido a la cubierta de productos volcánicos posteriores.

Las secuencias están en discordancia sobre granitoides en el sector Los Paraguas-Lago Quepe, por el oeste, y los cerros Pangucco y Negro, por el este. Hacia el noroeste la unidad Llaima Ancestral 1 se adosa y recubre rocas de la Formación Malleco.

Dataciones radiométricas indican edades para la unidad Llaima Ancestral 1 de entre  $68 \pm 12$  ka y  $60 \pm 100$  ka (Naranjo y Moreno, 2005), valores que son concordantes con la posición morfoestratigráfica de la unidad Llaima Ancestral 2, que se habría emplazado durante el Pleistoceno tardío.

#### VOLCÁN PEÑÓN (Plsp) Pleistoceno Superior

Estructura remanente de chimenea volcánica, que aflora al este del río Trifultruful a 3,5 km al sureste del lago Verde, al oriente del Llaima. Las rocas corresponden a basaltos levemente porfíricos de olivino y plagioclasa de 51,9 % de SiO<sub>2</sub>. Incluye depósitos escoriáceos de hasta 1,5 m de diámetro (Naranjo y Moreno, 2005).

#### IGNIMBRITA CURACAUTIN (Llic) Pleistoceno superior

Depósitos de flujo piroclástico, tipo escoria y ceniza que se encuentra sobre el fondo de los valles radialmente distribuidos alrededor del volcán Llaima. Sobreyacen o están lateralmente adosados a las unidades Llaima Ancestral 1 y 2, y subyacen las lavas de las unidades fisurales, del cono principal y de la Secuencia Trifultruful. Su espesor medio alcanza los 25 m en las facies proximales y disminuye hasta 0.5 m en las zonas más distantes.

La edad de esta unidad varía entre  $13460 \pm 400$  y  $12760 \pm 130$  (Naranjo y Moreno, 2005)

#### LLAIMA FISURAL 1 (Llf1) Holoceno

Unidad formada por conos piroclásticos de escorias, en parte erosionados, y coladas de lava tipo "aa", localmente cubiertos por depósitos morrénicos recientes en el sector Las Paraguas. Al oriente los depósitos descansan sobre la Ignimbrita Curacautín y al nororiente del volcán, sobre la secuencia Trifultruful. La unidad Llaima Fisural 2 sobreyace estas coladas.

Los conos se alinean y forman un arco que, hacia el norte se curva al oriente y hacia el suroeste del volcán presenta una orientación N45°E.

La litología de esta unidad corresponde a andesitas basálticas y andesitas (54 y 58,6 % de SiO<sub>2</sub>), son rocas de textura porfírica con fenocristales de plagioclasa + clinopiroxeno y olivino (20% vol. total).

No existen dataciones de esta unidad, pero su posición estratigráfica sugiere que se encuentra entre 3440 y 2940 años AP (Naranjo y Moreno, 2005)

### LLAIMA FISURAL 2 (Llf2) Holoceno

Unidad representada por conos piroclásticos adventicios bien conservados y coladas de lava “aa”, ubicados sobre el mismo lineamiento en arco que controla la disposición de los conos adventicios de la unidad Fisural 1.

Las lavas de esta unidad son categorizadas como andesitas basálticas y andesitas, de textura afanítica con escasos cristales de plagioclasa en una masa fundamental hialopilítica, con escaso clinopiroxeno y olivino.

Dataciones en los depósitos han revelado que las edades de estos están entre  $2940\pm 60$  A y  $770\pm 70$  (Naranjo y Moreno, 2005).

### LLAIMA FISURAL 3 (Llf3) Histórico

Corresponde a pequeños conos y cráteres alineados a lo largo de una fisura de 1 km de longitud, orientada en dirección ENE, entre lineamientos paralelos de la unidad Fisural 2. Se ubican sobre el flanco y pie ENE del volcán Llaima y se sobreponen sobre las unidades Llaima Fisura 1 y 2. Las coladas tienen un espesor de aproximadamente 5 m y una longitud de 6 km volcán abajo.

Las coladas corresponden a andesitas basálticas de textura porfírica, con fenocristales de plagioclasa, olivino y escaso clinopiroxeno (25 % del volumen total)

Dataciones en los depósitos arrojan una edad de  $320\pm 50$  AP (Naranjo y Moreno, 2005).

### LLAIMA CONO PRINCIPAL (Llcp) Holoceno-Histórico

Esta unidad comprende coladas de lava que conforman la estructura cónica del edificio del volcán y que han sido emitidas desde los cráteres de la cima. Los flujos se distribuyen preferentemente hacia el norte, este y sur del volcán. Las lavas son del tipo “aa” que alcanzan hasta 27 km desde el centro de emisión y tienen espesores de hasta 10 m en su frente.

Son rocas de basaltos a andesitas basálticas principalmente porfíricas, con fenocristales de olivino, clinopiroxeno y plagioclasa en diversas proporciones.

La edad máxima de la unidad Llaima Cono Principal se estima en aproximadamente 2940 AP (Naranjo y Moreno, 2005).

### SECUENCIA TRUFULTRUFUL (Llst) Holoceno-Histórico.

Sucesión estratificada que incluye depósitos piroclásticos de flujo, caída y oleada, producto de erupciones explosivas. Sobreyace a depósitos de la Ignimbrita Curacautín, rocas plutónicas del basamento y las unidades Llaima Ancestral 1 y 2.

Dataciones radiométricas en C14 indican que la edad de estos depósitos se encuentra en el intervalo de  $10530 \pm 100$  y  $280 \pm 60$  AP (Naranjo y Moreno, 2005).

#### DEPÓSITOS INDIFERENCIADOS DE CAIDA DE ESCORIAS (Llce) Histórico

Corresponde a acumulaciones de caída de piroclastos escoriáceos que afloran en forma de manto aislado. Tiene un espesor aproximado entre 1 y 2 m e incluye fragmentos escoriáceos de tamaño lapilli y escasas bombas finas.

Se reconoce sobre el sector oriental, en los alrededores de las unidades Llaima Fisural 2 y 3, y sobre las rocas del Grupo Plutónico Melipeuco, hasta 12 km al este del volcán.

#### DEPÓSITOS MORRÉNICOS RECIENTES INDIFERENCIADOS (Hm) Holoceno

Corresponden a depósitos glaciales y sedimentos removidos por el escurrimiento de aguas fundidas de los glaciares del volcán. Son acumulaciones de detritos matriz soportados, mal seleccionados y formados principalmente por limos, arenas, bloques y bolones de materiales volcánicos, con espesores de 10 a 30 m.

#### DEPÓSITOS LAHARICOS INDIFERENCIADOS (LlIh) Histórico

Corresponde a depósitos de flujo de detritos, o consolidados de origen lahárico, pobres en arcillas, con abundantes fragmentos tamaño grava, mal seleccionados y ricos en matriz arenosa. Constituyen los rellenos de superficie plana de casi todos los valles que drenan radialmente el volcán (Quinteros, 1991)

Estos depósitos son principalmente monolitológicos, con baja proporción de rocas del basamento y están caracterizados por diferentes facies de acumulaciones macizas sin gradación o parcialmente gradadas en forma inversa hasta el tercio inferior y normal hacia arriba, con fábricas débilmente desarrolladas y clastos subangulares a angulares. Los espesores varían de decenas de centímetros a 5-10 m.

#### DEPÓSITOS ATERRAZADOS POLIGENÉTICOS (Htp) Holoceno Tardío- Histórico

Unidad formada por depósitos aluviales de arenas, gravas y limos que forman el relleno principal y más extendido de los grandes valles. Se reconocen al norte, en el valle del río Cautín. Las terrazas han sido cubiertas por flujos laháricos y aluviales producidos por la remoción de éstos. Tienen características intermedias entre depósitos de flujos de detritos y aluviales. Se presentan en depósitos macizos, pero también con estratificación de hasta 1 m definida por la alternancia de horizontes de granulometría gruesa (lavas y bolones) y arenas limosas.

## DEPÓSITOS COLUVIALES Y ABANICOS ALUVIALES (Hca) Holoceno

Corresponden a acumulación de gravas y bloques clastosoportados, mal seleccionados con arenas y barro, generados por el colapso gravitacional de taludes debido a las lluvias. Sobre el volcán Llaima se presentan como pequeños abanicos, formados principalmente de la remoción de depósitos piroclásticos y morrénicos, mezclado con taludes del basamento rocoso.

## DEPÓSITOS FLUVIALES ACTUALES (Hf) Holoceno

Corresponden a depósitos de gravas, bolones y arenas acumulados en las terrazas de inundación de los lechos de ríos y esteros activos, a veces efímeros, entrecruzados. Tienen un gran carácter polilitológico, con un predominio de rodados volcánicos, especialmente si provienen de afluentes que drenan depósitos laháricos y piroclásticos del volcán.

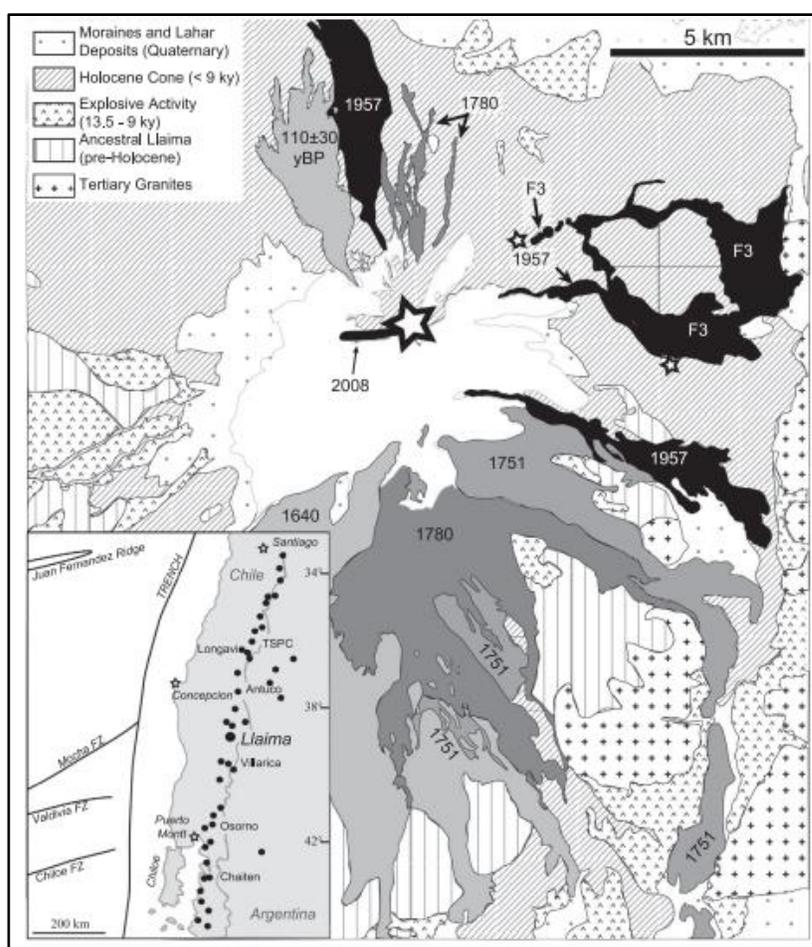


Figura 2.2. Mapa geológico del Volcán Llaima (Naranjo y Moreno, 2005) y modificado por Bouvet et al. (2011). Los flujos de lava históricos están indicados con la etiqueta del respectivo año y los prehistóricos se encuentran indiferenciados y marcados con líneas oblicuas. F3: Fisural 3 (~1850)

## CAPITULO 3. METODOLOGÍA

Las muestras fueron entregadas directamente por la profesora guía. Éstas consisten en dos cortes transparentes, catalogados como NV10 y NV11, que fueron obtenidos desde depósitos de lavas en el flanco norte del volcán. El corte transparente NV10 proviene de flujo de lava norte y sus coordenadas UTM son: 19H 0257429 S, 5726414 W (750 m.s.n.m). El corte transparente NV11 proviene del mismo flujo y sus coordenadas UTM son: 19H 0257404 S, 5726423 W (750 m.s.n.m)



Figura 3.1: Ubicación de las muestras obtenidas para los cortes NV10 y NV11. Imagen tomada en Google Earth.

La metodología empleada para la primera parte de este estudio consiste principalmente en el trabajo realizado en laboratorio: descripción petrográfica en microscopio óptico y de barrido electrónico (en inglés *Scanning Electron Microscopy, SEM*) y el uso de técnicas analíticas como lo son la microsonda electrónica (en inglés *Electron MicroProbe, EMP*) para el análisis de elementos mayores y menores; y para los elementos trazas la técnica de Ablación

Láser (en inglés *Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, LA-ICP-MS*). Para esta parte de la investigación, y más precisamente en lo que se refiere al trabajo con inclusiones vítreas, se usó como referencia el trabajo de Cannatelli et al. (2016), que entrega una completa guía sobre el estudio de inclusiones vítreas, como lo son su caracterización petrográfica, el uso de las reglas de Roedder, microtermometría y el uso de las técnicas analíticas anteriormente mencionadas.

Para la segunda parte, se realizó un trabajo de gabinete consistente en la reducción de datos obtenidos a partir de la Microsonda Electrónica y Ablación Laser, análisis e interpretación de los mismos y la confección final del presente informe.

## **3.1. TRABAJO EN LABORATORIO**

### **3.1.1. PETROGRAFÍA**

La descripción petrográfica se realizó en ambos cortes utilizando el microscopio óptico *Olympus BX51*, perteneciente al Laboratorio de Inclusiones Fluidas y Vítreas del Centro de Excelencia y Geotermia de Los Andes (CEGA), perteneciente al Departamento de Geología de la Universidad de Chile.

En primera instancia, la observación consistió en una descripción petrográfica de ambos cortes transparentes, siendo determinada la mineralogía y las texturas generales de las muestras, seguida por la selección de cristales de olivino contenientes inclusiones vítreas. Para esta etapa, se eligieron solamente cristales íntegros que contenían inclusiones vítreas homogéneas ( $\pm$  burbujas), para cumplir con las Reglas de Roedder (Cannatelli et. al. 2016), y de diámetro superior a 10  $\mu\text{m}$ , para la aplicación de las técnicas analíticas posteriores de Microsonda Electrónica y Ablación Laser.

Para la obtención de fotomicrografías a partir del microscopio óptico, se utilizó una cámara *M Shot* a través del software *M Shot Digital Imaging System*.

### 3.1.2. MICROSCOPIO DE BARRIDO ELECTRÓNICO (SEM)

El Microscopio Electrónico de Barrido, se encuentra en el laboratorio SEM, perteneciente al CEGA en el departamento de Geología de la Universidad de Chile. Con esta herramienta, fue posible determinar semicuantitativamente la composición de los cristales escogidos y sus inclusiones, utilizando la técnica de electrones retrodispersados (en inglés *Back Scattered Electrons, BSE*). El uso de este microscopio permite tener una visión más cercana de la realidad, gracias a sus funciones y, a diferencia del microscopio óptico, se puede determinar con exactitud si una inclusión vítrea es homogénea y se encuentra expuesta en superficie; además de la determinación de otras fases minerales presentes. Por lo tanto, con él fue posible descartar o escoger de manera definitiva las inclusiones que posteriormente fueron analizadas en la Microsonda Electrónica y LA-ICP-MS.

### 3.1.3. ANÁLISIS EN MICROSONDA ELECTRÓNICA (EMPA)

El análisis de elementos mayores y menores se realizó mediante la técnica de microsonda electrónica (en inglés *Electron Microprobe, EMP*), en el Laboratorio de Microscopía Electrónica y Análisis por Rayos X (LAMARX), perteneciente a la Universidad Nacional de Córdoba, en la ciudad de Córdoba, Argentina. La microsonda utilizada corresponde al modelo JEOL KXA-8230. Los análisis fueron realizados en minerales de olivino, plagioclasa y vidrio de inclusiones vítreas. Los parámetros utilizados para las mediciones se encuentran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Parámetros utilizados por la Microsonda Electrónica para el análisis de las muestras

Corriente	9.995+10-9 A
Voltaje	15 kV
Cristales usados	TAP,PETJ,LIF,LIFH
Lineas detectadas	K $\alpha$
Tiempo analizado en peak	Ajustable entre 5 y 20 seg.
Tiempo analizado en background	Ajustable entre 2.5 y 10 seg
Elementos Analizados	F, Na, Mg, Al, Si, P, Cl, K, Ti, Mn, Fe, Zr

### 3.1.4. ESPECTROMETRÍA DE MASAS

Para la obtención de los elementos mayores y trazas se utilizó la técnica de LA-ICP-MS (Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry), realizada en el Laboratorio de Espectrometría de Masas del CEGA, en el Departamento de Geología de la Universidad de Chile (FONDEQUIP 120098).

El sistema de ablación laser utilizado fue uno *Photon Machines Analyte G2 193 nm ArF* con una celda de ablación *Helix-2* acoplado con un espectrómetro de masas cuadrupolo *Thermo Scientific*, modelo *iCapQ*. Los estándares externos utilizados fueron el *Nist SRM 610* y el *BHVO-2G (USGS)*.

Antes de cada análisis, se aplica una secuencia doble de cada estándar y, se termina con una secuencia doble de Nist SRM 610. El diámetro del láser fue ajustado antes de cada medición al diámetro de las inclusiones, intentando de no “contaminar” el análisis con el cristal hospedante.

Tabla 3.2: Parámetros usados para el análisis de muestras mediante LA-ICP-MS.

Photon Machines Analyte G2 193 nm ArF	
Fluencia del láser	6 mJ/cm <sup>2</sup>
Tasa de repetición	10Hz
Tamaño del haz	Ajustable entre 10 y 85 μm
Celda de ablación	Helix-2
Celda de flujo de gas He	Entre 0.5 y 0.7 L/min
iCapQ ThermoFinnigan quadrupole ICP-MS	
Flujo del gas nebulizador	~ 0.9 L/min
Flujo del gas auxiliar	~0.8 L/min
Tiempo de permanencia por isótopo	10ms
Isótopos Analizados	60

Tabla 3.3: Isótopos medidos a partir de elementos químicos cuantificados

Isótopos medidos (69)	Elementos medidos (51)
<sup>23</sup> Na, <sup>24</sup> Mg, <sup>25</sup> Mg, <sup>27</sup> Al, <sup>29</sup> Si, <sup>39</sup> K, <sup>43</sup> Ca, <sup>44</sup> Ca, <sup>45</sup> Sc, <sup>47</sup> Ti, <sup>48</sup> Ti, <sup>49</sup> Ti, <sup>51</sup> V, <sup>52</sup> Cr, <sup>53</sup> Cr, <sup>54</sup> Fe, <sup>55</sup> Mn, <sup>57</sup> Fe, <sup>59</sup> Co, <sup>60</sup> Ni, <sup>63</sup> Cu, <sup>65</sup> Cu, <sup>69</sup> Ga, <sup>83</sup> Kr, <sup>85</sup> Rb, <sup>86</sup> Sr, <sup>88</sup> Sr, <sup>89</sup> Y, <sup>90</sup> Zr, <sup>93</sup> Nb, <sup>101</sup> Ru, <sup>105</sup> Pd, <sup>107</sup> Ag, <sup>111</sup> Cd, <sup>118</sup> Sn, <sup>120</sup> Sn, <sup>125</sup> Te, <sup>133</sup> Cs, <sup>136</sup> Ba, <sup>137</sup> Ba, <sup>138</sup> Ba, <sup>139</sup> La, <sup>140</sup> Ce, <sup>141</sup> Pr, <sup>146</sup> Nd, <sup>147</sup> Sm, <sup>153</sup> Eu, <sup>155</sup> Gd, <sup>156</sup> Gd, <sup>157</sup> Gd, <sup>159</sup> Tb, <sup>163</sup> Dy, <sup>165</sup> Ho, <sup>166</sup> Er, <sup>169</sup> Tm, <sup>172</sup> Yb, <sup>175</sup> Lu, <sup>178</sup> Hf, <sup>181</sup> Ta, <sup>191</sup> Ir, <sup>194</sup> Pt, <sup>197</sup> Au, <sup>206</sup> Pb, <sup>207</sup> Pb, <sup>208</sup> Pb, <sup>232</sup> Th, <sup>238</sup> U	Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Fe, Co, Ni, Cu, Ga, Kr, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Ru, Pd, Ag, Cd, Sn, Te, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, Ir, Pt, Au, Pb, Th, U

## 3.2. TRABAJO DE GABINETE

### 3.2.1. REDUCCIÓN DE DATOS

La reducción de datos para el análisis de Ablación Laser fue realizada de dos formas diferentes, basándose en la existencia o no de un estándar interno previo.

Para aquellas inclusiones que fueron analizadas por EMPA sin medición de cristal huésped, se usó una estimación de la composición total de los minerales, con la normalización de los resultados por LAICPMS a 100 wt% de óxidos.

Para las inclusiones que sí cuentan con una medición del cristal huésped mediante EMPA, la reducción de datos se realizó con el software IOLITE (Paton et al., 2011) de IGOR Pro (Wavemetrics), que entrega datos de concentraciones a partir del estándar interno entregado por los datos de EMPA.

*Tabla 3.4: Isótopos escogidos considerados como resultados finales.*

<i>Isótopos cuantificados (47)</i>
<i><sup>7</sup>Li, <sup>23</sup>Na, <sup>25</sup>Mg, <sup>27</sup>Al, <sup>31</sup>P, <sup>39</sup>K, <sup>44</sup>Ca, <sup>45</sup>Sc, <sup>47</sup>Ti, <sup>51</sup>V, <sup>52</sup>Cr, <sup>53</sup>Cr, <sup>55</sup>Mn, <sup>57</sup>Fe, <sup>59</sup>Co, <sup>60</sup>Ni, <sup>53</sup>Cu, <sup>63</sup>Ga, <sup>85</sup>Rb, <sup>88</sup>Sr, <sup>89</sup>Y, <sup>90</sup>Zr, <sup>93</sup>Nb, <sup>111</sup>Cd, <sup>120</sup>Sn, <sup>133</sup>Cs, <sup>137</sup>Ba, <sup>139</sup>La, <sup>140</sup>Ce, <sup>141</sup>Pr, <sup>146</sup>Nd, <sup>147</sup>Sm, <sup>153</sup>Eu, <sup>157</sup>Gd, <sup>159</sup>Tb, <sup>163</sup>Dy, <sup>165</sup>Ho, <sup>166</sup>Er, <sup>169</sup>Tm, <sup>172</sup>Yb, <sup>175</sup>Lu, <sup>178</sup>Hf, <sup>181</sup>Ta, <sup>195</sup>Pt, <sup>206</sup>Pb, <sup>232</sup>Th, <sup>238</sup>U</i>

### 3.2.2. TRATAMIENTO DE DATOS

Para contar con datos definitivos de elementos mayoritarios, se utilizó el software PetroLog que permite hacer una corrección de las mediciones por EMPA. Este proceso se aplica en específico a análisis de inclusiones vítreas en olivino, debido a posible recristalización post atrapamiento que se produce dentro de ellas. Este software permite entonces modelar el reequilibrio post atrapamiento de las inclusiones fundidas en el olivino, reconstruyendo su composición inicial cuando éstas fueron atrapadas. La base teórica de este modelamiento se debe al reequilibrio de Fe y Mg entre las inclusiones vítreas y los fenocristales de olivino que las hospedan (Danyushevsky et al., 2002).

Contando con los datos de EMPA para inclusiones originales y recalculados, se realizaron diagramas Harker, TAS y Fenner, mediante el software Petrograph (Petrelli et al., 2005).

Con el software IgPet, se realizaron los diagramas de clasificación mineral para plagioclasas y piroxenos, utilizando los datos obtenidos por EMPA.

Con los datos obtenidos por LA-ICP-MS, se realizaron diagramas spider de multielementos. Con este fin, los datos fueron normalizados respecto a la composición del manto primitivo de Sun y McDonough (1989) y a la roca total de Reubi et al. (2011). Estos diagramas fueron hechos utilizando el software Microsoft Excel.

### 3.2.3. GEOTERMOBAROMETRIA

Para estimar las condiciones termodinámicas de presión y temperatura durante el atrapamiento de las inclusiones y crecimiento de las distintas fases minerales, se utilizaron hojas de cálculo en Excel creadas por los autores de los diferentes geotermómetros y barómetros.

Para estimar la temperatura de crecimiento del olivino, se utilizó el termómetro de olivino y vidrio de Putirka et al. (2008)), mediante la hoja de cálculo en Excel *Olivine and glass.xls*

## CAPITULO 4. RESULTADOS

### 4.1. PETROGRAFÍA:

#### 4.1.1. CORTES TRANSPARENTES NV10 Y NV11

En los cortes transparentes NV10 y NV11 se escogieron cristales de plagioclasa, olivino, piroxeno y óxidos de Fe-Ti Y Fe-Cr. que para ser identificados, se asignó a cada fase mineral el nombre del corte transparente (NVII o NV-10), seguido de una letra (A-Z) que especifica la ubicación dentro del corte, y en caso de ser necesario, la abreviatura CX-N° (CX: oli=olivino, plg=plagioclasa, ox=óxido de Fe; px=piroxeno) para aquellos cristales que lo requieran, dada la proximidad entre uno o más cristales en una misma posición (Ej. NV10-oliA-cx1).

##### 4.1.1.1 DESCRIPCION PETROGRÁFICA

Debido a que tanto NV10 y NVII pertenecen a un mismo depósito de lavas, éstas presentan las mismas características petrográficas, en consecuencia, la siguiente descripción petrográfica es para ambos cortes.

La muestra corresponde a una roca ígnea extrusiva con textura hipocristalina, inequigranular entre cristales de la misma fase mineral, porfírica y, en general, con cristales hipidiomórficos. Es posible identificar también texturas glomeroporfírica en cristales de plagioclasa y olivino.

La masa fundamental corresponde al 55% del total de la muestra y está compuesta de una gran cantidad de pequeños cristales de plagioclasas o microlitos (50%), microlitos de olivino (20%), óxidos de Fe (10%) y piroxenos (20%). Los microlitos de plagioclasa se disponen de una forma subparalela, evidenciándose una textura traquítica. También es posible identificar texturas vesiculares. Las vesículas corresponden al 15 % de la muestra.

Aproximadamente un 45% de los fenocristales de la muestra corresponden a plagioclasas y olivino. Del total de éstos, un 60 % son plagioclasas, un 40 % son olivinos y menos del 1 % corresponde a cristales de piroxeno.

Plagioclasa: Para esta fase mineral se identifican dos familias que no pertenecen a la masa fundamental. La primera de ellas es de grano fino, entre 0,3 y 0,8 mm, y la segunda es de grano medio, entre 0.8 y 2 mm. En general se presentan como cristales tabulares y euhedrales, con buena estructuralidad y baja integridad. Las maclas más recurrentes corresponden a las del tipo polisintético. Además, es posible observar zonaciones concéntricas

en la mayoría de las plagioclasas. Aproximadamente en un 90%, los cristales presentan texturas de sieve y reabsorción. Presentan inclusiones vítreas, en casi su totalidad recrystalizadas.

Es posible identificar un tercer grupo de plagioclasas en la masa fundamental de la roca, cuyo tamaño es inferior a los 100  $\mu\text{m}$ . En general son cristales euhedrales tabulares, de buena integridad y estructuralidad. No presentan texturas de reabsorción.

Olivinos: El tamaño de los cristales de esta fase mineral es de entre 0,1 y 0,6 mm. En cuanto a su forma, es posible identificar desde cristales subhedrales a euhedrales, con regular estructuralidad y buena integridad. Presentan textura coronítica de distinta magnitud según el cristal, con piroxenos y óxidos de Fe en el borde los cristales. Presentan inclusiones vítreas recrystalizadas, homogéneas con y sin burbuja en las diferentes zonas de los cristales, con tamaños que van desde los 3  $\mu\text{m}$  hasta los 50  $\mu\text{m}$ , con casi la totalidad de éstas bajo los 20  $\mu\text{m}$ .

La mayoría de los fenocristales presenta texturas de reabsorción en los bordes, vistos como enbahiamentos en los cristales en distintas magnitudes, en la mayoría es necesario reconstruir su forma original para comprender la magnitud de las reabsorciones.

Es posible identificar una segunda población de olivinos dentro de la masa fundamental como microlitos de esta fase, su tamaño es inferior a los 40  $\mu\text{m}$ , anhedrales, con mala estructuralidad y buena integridad. En los bordes de estos microlitos se observan bordes de reacción compuestos de óxidos Fe y clinopiroxenos.

Piroxenos: Se encuentran como pequeños cristales en la matriz de la muestra y presentes en los bordes de olivinos, como bordes de reacción. Anhedrales, de mala estructuralidad y buena integridad. Su tamaño es inferior a 30  $\mu\text{m}$ .

Óxidos de Fe: Se encuentran diseminados en la matriz y como bordes de reacción en cristales de olivino. Algunos logran formar cristales anhedrales distinguibles con tamaños inferiores a los 15-20  $\mu\text{m}$ , y poseen buena integridad y mala estructuralidad. Es posible distinguir también, óxidos de Fe dentro de fenocristales de olivino, que alcanzan un tamaño de hasta 40  $\mu\text{m}$ .

#### 4.1.2. DESCRIPCIÓN DE LAS FAMILIAS DE INCLUSIONES

Una investigación sobre inclusiones vítreas requiere un estudio petrográfico detallado para caracterizar y elegir inclusiones vítreas representativas, con el objetivo de identificar en distintos cristales, familias de inclusiones vítreas (MIAs, sigla en inglés de *Melt Inclusion Assemblages*). Para lograr esto, se sugiere contar con la siguiente información petrográfica en cada inclusión: tamaño, forma, apariencia, presencia de burbuja y su volumen respecto de la inclusión y posición relativa en el cristal que la hospeda (Cannatelli et al., 2016).

Cada inclusión fue elegida siguiendo las Reglas de Roedder, con el fin de asegurarse que ellas representan la composición del fundido en el momento que fueron atrapadas y que no han sido reequilibradas. Estas reglas son: 1) La inclusión debe estar como una fase homogénea única; 2) Luego de su atrapamiento la inclusión debe comportarse como un sistema isocórico cerrado; y 3) Después de su atrapamiento nada se ha agregado o perdido en la inclusión.

En este estudio, las MIAs se determinaron por la fase mineral huésped, la ubicación dentro del cristal (borde, centro o posición intermedia) y la proporción burbuja/vidrio de cada inclusión (Cannatelli et al., 2016)

En general, las inclusiones presentes en olivino tienen un tamaño inferior a 20  $\mu\text{m}$ , consideradas pequeñas, y en su mayoría son homogéneas. La presencia de burbuja se da en las inclusiones de mayor tamaño, y ocupan entre 5 y 20 % de cada inclusión. No se observa recristalización, salvo en las inclusiones más grandes (mayores a 20  $\mu\text{m}$ ). En esta fase mineral, las inclusiones representan menos del 1% del cristal.

En plagioclasas, las inclusiones se encuentran casi todas recristalizadas. Se ubican en los bordes de crecimiento y representan hasta un 3 % del cristal.

La figura 4.1 muestra la selección de una familia de inclusiones en el cristal de olivino NV10-oliA. El detalle de cada cristal descrito y sus respectivas familias de inclusiones se encuentra en el Anexo A.

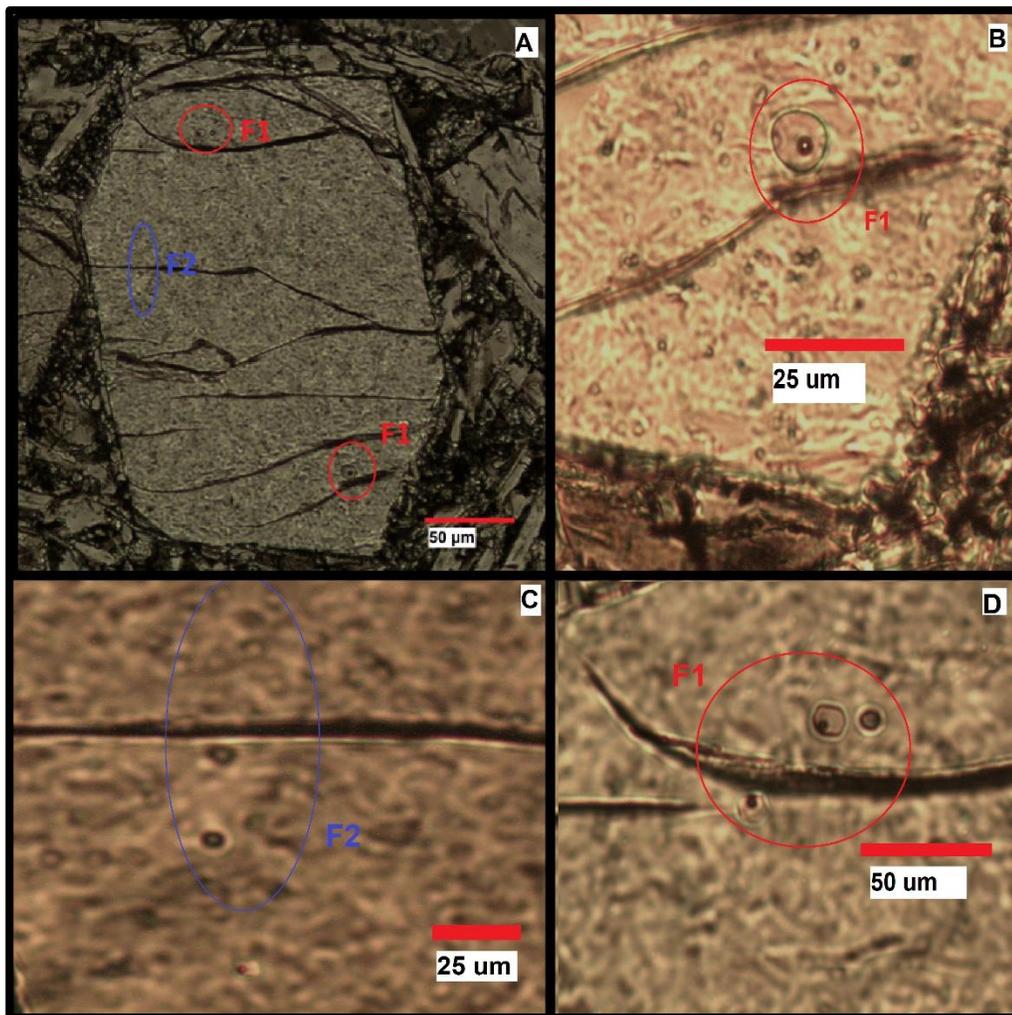


Figura 4.1: Fotomicrografía de las familias de inclusiones vítreas, F1 y F2, en el cristal de olivino NV10-oli1. A) Cristal NV10-oliA; B) Zoom en F1, parte inferior del cristal; C) Zoom en F2, parte media izquierda del cristal; D) Zoom F1, parte superior de cristal. Todas las descripciones de las MIAS y cristales huésped se encuentran en el Anexo A.

### 4.1.3. PETROGRAFÍA EN SEM

El uso del microscopio de barrido electrónico (SEM), fue útil para determinar la presencia de inclusiones en superficie, resultando que la mayoría se encontraban bajo la superficie del cristal huésped.

Además, se obtuvieron resultados de composición química semi cuantitativos, que permitieron determinar con más exactitud las fases minerales, la composición de las

inclusiones y la presencia de fases minerales difíciles de distinguir en el microscopio óptico (como óxidos de Fe y piroxenos).

En las figuras 4.2 y 4.3 se encuentran un cristal de olivino y otro de plagioclasas analizados. En ellas es posible apreciar las ventajas que otorga el SEM en cuanto al reconocimiento de inclusiones en superficie y su homogeneidad, además de la zonación en plagioclasas.

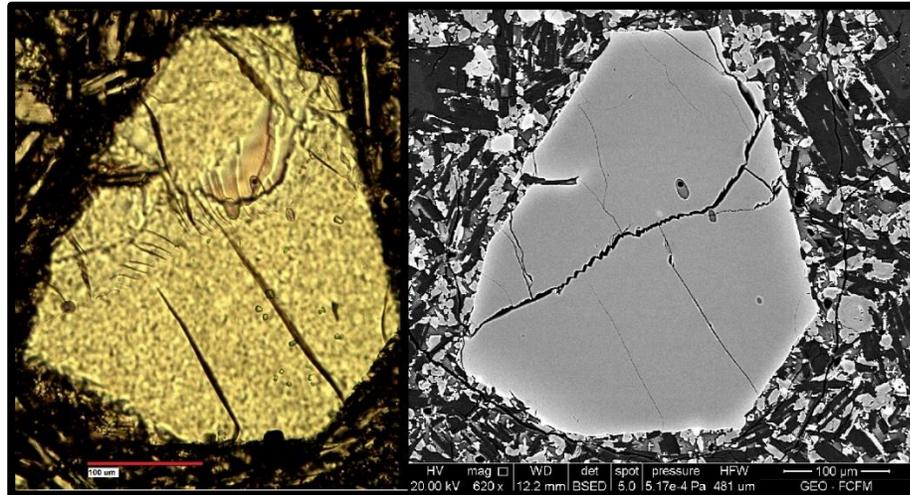


Figura 4.2: Fotomicrografía del cristal de olivino NV10-oliL y las inclusiones vítreas hospedadas en él. A la izquierda, se tiene la imagen en microscopio óptico, a luz transmitida y nícoles paralelos. A la derecha, su imagen en SEM, con electrones retrodispersados

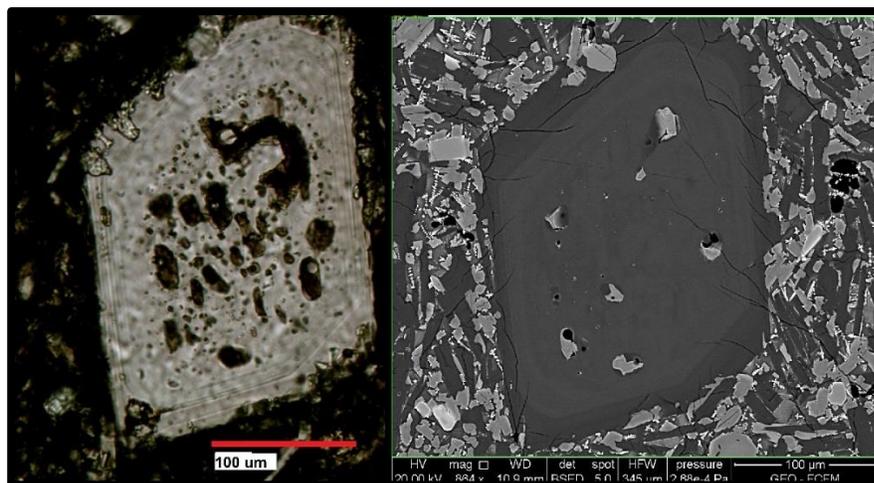


Figura 4.3: Cristal corresponde a una plagioclase, NV10-plgE. A la izquierda, fotomicrografía en microscopio óptico, con luz transmitida a nícoles paralelos. A la derecha, el mismo cristal visto con electrones retrodispersados en SEM. En esta última imagen, se aprecia la zonación concéntrica de la plagioclase analizada.

## 4.2. QUÍMICA MINERAL

### 4.2.1. OLIVINO

La composición química de los cristales de olivino se obtuvo mediante EPMA (anexo C) en 16 fenocristales cristales de la muestra NV10 y 10 de la muestra NVII. En cada cristal huésped de inclusiones se analizaron un punto en el borde y otro en el centro del cristal. En caso de existir zonaciones evidentes, se realizaron los perfiles que se estimaron convenientes. El resultado de las mediciones indica un promedio composicional en los de olivino de  $FO_{77}Fa_{23}$ .

### 4.2.2. PLAGIOCLASA

La composición química de las plagioclasas se obtuvo mediante EPMA (anexo) en 11 fenocristales cristales de la muestra NV10, y se utilizó el diagrama ternario Albita- Anortita- Ortoclasa (Ab-An-Or) de O'Connor (1965) para clasificarlas.

En la figura 4.4 está graficada la composición de los cristales de plagioclasa, en sus bordes y núcleos, además de los microlitos. Se observa que la composición del núcleo de las plagioclasas es principalmente bytownítica y hacia los bordes es labradorítica. Además, los microlitos medidos (2) se clasifican como labradorita.

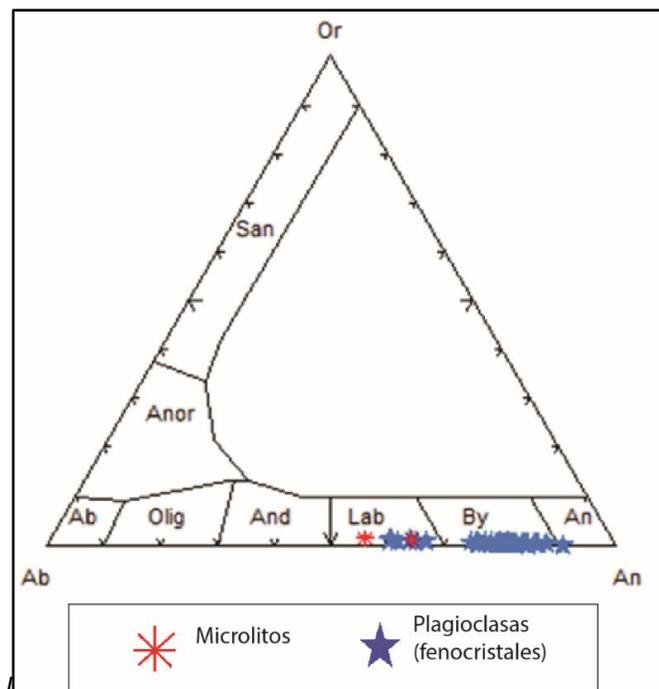


Figura 4.4: Diagrama de clasificación de feldespatos generado en IgPet.

### 4.2.3. PIROXENO

Las fases de piroxeno medidas por EPMA, se encontraron en un fenocristal de enstatita, bordes de reacción de olivino y como microlitos en la matriz de la roca. Los resultados de la composición fueron graficados de acuerdo al diagrama ternario de clasificación de piroxenos (Morimoto, 1988)

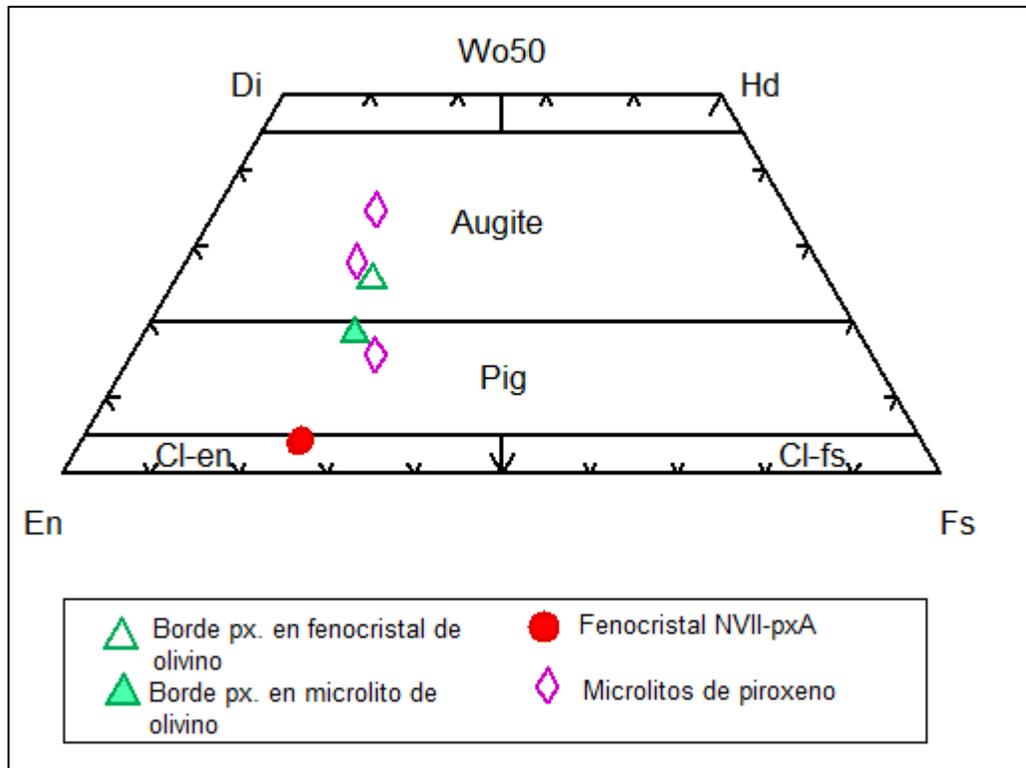


Figura 4.5: Diagrama de clasificación de piroxenos generado en IgPet. Los rombos púrpuras corresponden a microlitos de piroxeno en la matriz de la muestra, escogidos aleatoriamente. Los círculos rojos, corresponden a puntos del único fenocristal de piroxeno encontrado en ambos cortes. El triángulo rellano en verde corresponde a un borde de reacción en un microlito de olivino

### 4.2.4. ÓXIDOS DE HIERRO

La clasificación de óxidos Fe-Ti se determinó a través del termobarómetro de Sack et al. (1991a, 1991b), que calcula la fracción molar de cada miembro de óxidos de Fe a partir del porcentaje en peso de los óxidos del mineral. Es posible así clasificar los óxidos como cromitas, ubicadas dentro y junto a cristales de olivino y de diámetro de hasta 50  $\mu\text{m}$ , y titanomagnetitas, diseminadas en la matriz como pequeños cristales inferiores a 10  $\mu\text{m}$ .

### 4.3. GEOQUÍMICA DE INCLUSIONES VÍTREAS

La composición química de las inclusiones vítreas se determina mediante el uso de la microsonda electrónica (EMPA), que entregó datos referentes a los elementos mayores. Se seleccionaron 41 inclusiones, todas en cristales de olivino. Los resultados sobre la geoquímica de ellas se presentan a continuación.

Los datos para inclusiones que se presentan en los diagramas de Harker y Fenner en su forma original (entregados por la microsonda, color azul) y recalculados con el software Petrolog (color rojo).

Las composiciones de roca total corresponden a valores disponibles en la base de datos *GEOROC* (Ver Anexo E), que se encuentra a libre disposición en la web (<http://georoc.mpch-mainz.gwdg.de/georoc/>).

#### 4.3.1. DIAGRAMA TAS

La clasificación TAS (Total Alkali Silica) es un método que permite clasificar una roca volcánica en base de la relación entre el contenido de minerales alcalinos ( $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{K}_2\text{O}$ ) y de Sílice ( $\text{SiO}_2$ ). Para los efectos de este estudio, el diagrama TAS es utilizado para clasificar la composición del vidrio alojado en cada inclusión vítrea medida por la microsonda electrónica, además del vidrio alojado en la matriz.

Como se observa en la figura 4.6, composicionalmente el vidrio de las inclusiones vítreas en olivino se distribuye entre el campo de las andesitas basálticas y andesitas, y sólo una inclusión sería considerada como una andesita traqui-basáltica.

El vidrio alojado en la matriz cae un poco por encima del límite de una andesita y una traqui-andesita, siendo considerado como traqui-andesita.

La roca total, corresponde a las muestras analizadas que están en la base de datos de *GEOROC*, y este diagrama permite clasificarla como una andesita basáltica.

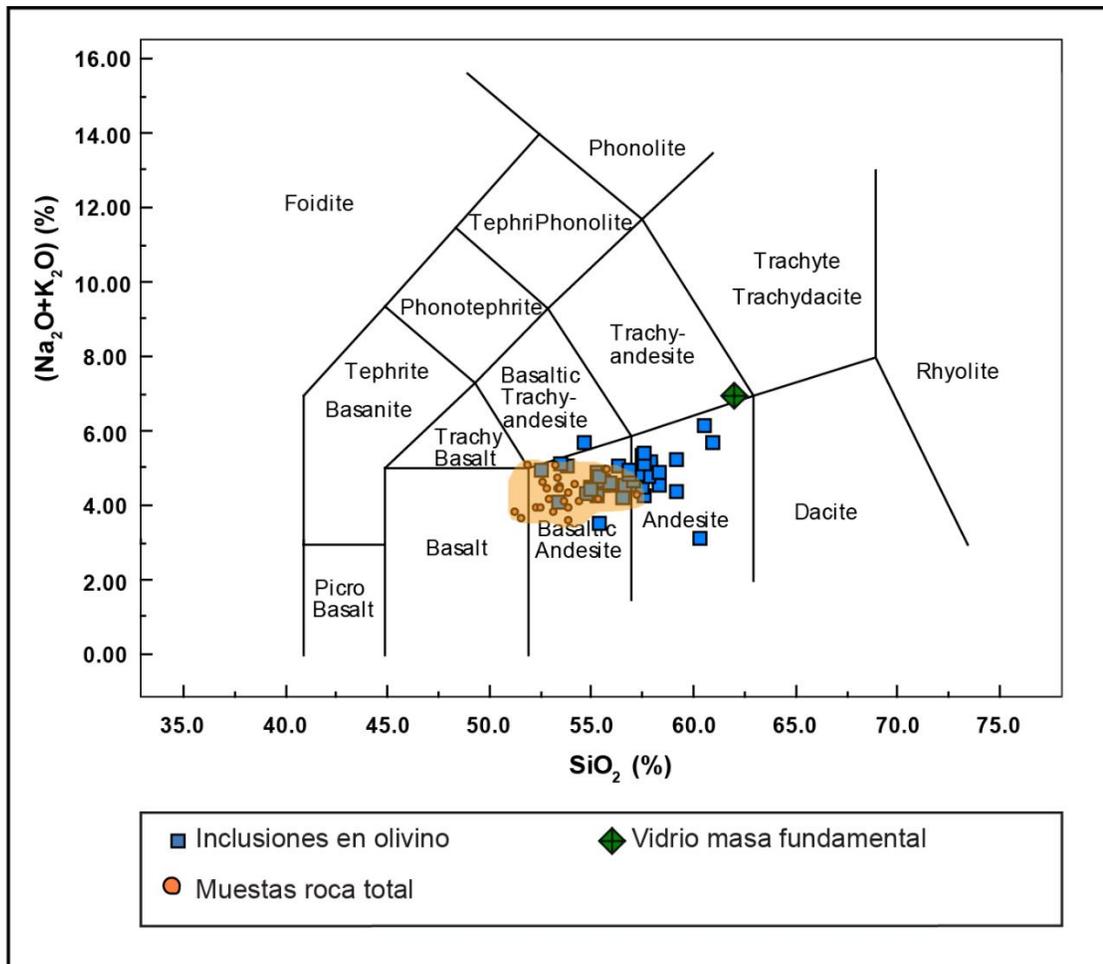


Figura 4.6: Diagrama de clasificación de rocas volcánicas TAS, propuesto por Le Bas et al. (1986). Se clasifican las inclusiones vítreas hospedadas en olivino de los cortes transparentes NV10 y NV11, el vidrio de la matriz medido en NV10 y la roca total. La unidad de medida es %wt. Diagrama generado en Petrograph (Petrelli, 2005)

### 4.3.2. DIAGRAMA K<sub>2</sub>O

El diagrama K<sub>2</sub>O versus SiO<sub>2</sub>, según Peccerillo y Taylor (1976), permite clasificar las rocas sub alcalinas según su contenido de potasio, en calco-alcalina rica en K, calco-alcalina y toleítica.

En la figura 4.7, el grafico fue realizado para inclusiones vítreas en olivino, vidrio de la masa fundamental y roca total, y muestra que casi la totalidad de las inclusiones vítreas pertenecen a una serie calco-alcalina.

Se puede apreciar que algunas inclusiones caen dentro de la serie toleítica.

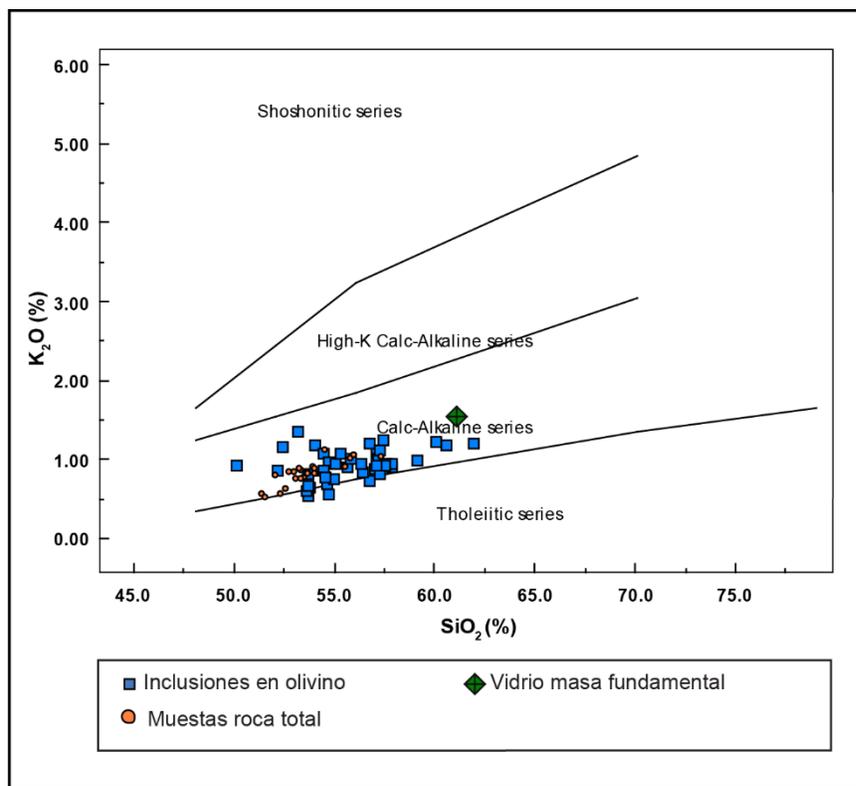


Figura 4.7: Diagrama K<sub>2</sub>O propuesto por Peccerillo y Taylor (1976). Diagrama generado en Petrograph.

### 4.3.3. DIAGRAMAS HARKER Y FENNER

Ambos son diagramas bivariantes que permiten ilustrar la variación de la concentración de elementos mayoritarios y menores en su forma de óxidos, respecto al contenido de  $\text{SiO}_2$  (Harker) y  $\text{MgO}$  (Fenner).

En estos diagramas, se consideran los puntos azules como aquellos directamente entregados por la microsonda electrónica. Los rojos corresponden a las cantidades recalculadas mediante el software Petrolog. En ambos casos se incluyen líneas de tendencias que son sólo ilustrativas de la evolución de las concentraciones de los distintos óxidos.

Los elementos analizados en su forma de óxidos fueron obtenidos mediante análisis de microsonda electrónica y corresponden a: Al, Ca, Fe, K, Mg, Na (mayoritarios); y; P, Sr, Mn, Ti y Cl (minoritarios). Los puntos presentados en los diagramas corresponden al contenido de los diferentes óxidos presentes en las inclusiones respecto de su contenido de Sílice, de las inclusiones hospedadas en cristales de olivino de los cortes transparentes NV10 y NV11.

#### 4.3.3.1 DIAGRAMAS HARKER

Es un diagrama bivalente que muestra la variación de la concentración de elementos mayoritarios y trazas en su forma de óxidos, en el eje de las ordenadas (eje Y), respecto al contenido de  $\text{SiO}_2$  a lo largo del eje horizontal (eje X). Su uso es recurrente debido a que el  $\text{SiO}_2$  es el mayor constituyente en las diferentes series de rocas ígneas y muestra una mayor variabilidad que los demás óxidos. Su correcta interpretación permite identificar procesos que ocurren durante el ascenso de un magma, como lo son los mecanismos de fusión parcial y cristalización fraccionada.

Para esta parte, solo se presentan diagramas para  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  y  $\text{FeO}$  (en su forma de hierro total), debido a que muestran tendencias que permiten hacer interpretaciones, mientras que para  $\text{P}_2\text{O}_5$  y  $\text{TiO}_2$ , sólo se describe el rango de los resultados obtenidos, ya que no se observan tendencias claras en los diagramas.

El contenido de  $\text{FeO}$  (figura 4.8) varía entre 3,07 y 9,23 wt%, observándose una disminución evidente a medida que el contenido de  $\text{SiO}_2$  aumenta, debido a la cristalización de fases de olivino como fenocristales y la posterior aparición de fases de clinopiroxeno y óxidos de Fe. El contenido para las inclusiones recalculadas varía entre 3,20 y 9,39 wt% y el vidrio tiene un 8,95 wt% de  $\text{FeO}$ .

El contenido de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (figura 4.8) varía entre 14,96 y 21,31 wt%., observándose una tendencia incremental en su concentración a medida que el porcentaje de  $\text{SiO}_2$  aumenta y no

aparecen fases minerales ricas en Al. A partir de concentraciones de  $\text{SiO}_2$  superiores a ~56wt%, el porcentaje de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  en las inclusiones disminuye, lo que supone la cristalización de fases como plagioclasas. El contenido para las inclusiones recalculadas varía entre 14,19 y 20,84 wt% y el vidrio tiene un 13,81 wt% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

El contenido de CaO (figura 4.9) varía entre 5,76 y 12,71 wt%, donde todas las inclusiones a excepción de una (5,76 %) se encuentran sobre 8,1 wt% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Se observa una suave tendencia incremental del contenido de CaO hasta aproximadamente un 55 wt% de  $\text{SiO}_2$ , luego disminuye lo que supone la cristalización de fases minerales como el clinopiroxeno. El contenido de CaO para las inclusiones recalculadas varía entre 5,64 y 12,46 wt% y el vidrio tiene un 4,16 wt% de CaO.

El contenido de MgO (figura 4.9) varía entre 0,68 y 4,83 wt%. Se observa una disminución de la concentración de este óxido a medida que aumenta el porcentaje de  $\text{SiO}_2$  en las inclusiones, asociado a la cristalización de olivino rico en Mg. El contenido de MgO para las inclusiones recalculadas varía entre 1,82 y 5,09 wt% y el vidrio tiene un 0,62wt% de MgO.

En general, el contenido de  $\text{SiO}_2$  en inclusiones en olivino analizadas varía entre 50,07 y 61,88 %,  $\text{K}_2\text{O}$  (figura 4.10) varía entre 0,48 y 1,29 wt% aproximadamente, donde la concentración de este óxido muestra una tendencia incremental a medida que sube el contenido de  $\text{SiO}_2$  y el vidrio presenta un 1,48 wt% de  $\text{K}_2\text{O}$ . Los valores de  $\text{K}_2\text{O}$  recalculados para las inclusiones varían entre 0,45 y 1,23 wt%.

El contenido de  $\text{Na}_2\text{O}$  (figura 4.10) varía entre 1,89 y 4,99 wt%, donde la totalidad de las inclusiones, a excepción de una (1,89%), se encuentran entre 2,98 y 4,99 wt% de  $\text{Na}_2\text{O}$ . La concentración de este óxido, al igual que para  $\text{K}_2\text{O}$ , aumenta a medida que sube el contenido de  $\text{SiO}_2$  en las inclusiones de olivino. Las concentraciones recalculadas varían entre 1,85 y 4,88 wt%, mientras que el vidrio presenta 5,37 wt% de  $\text{Na}_2\text{O}$ .

El contenido de  $\text{P}_2\text{O}_5$  en las inclusiones varía entre 0,03 y 0,63 wt%,  $\text{TiO}_2$  entre 1,15 y 2,43 wt% (figura 4.12) y MnO entre 0,02 y 0,31 wt%, no observándose una tendencia clara respecto a su comportamiento.

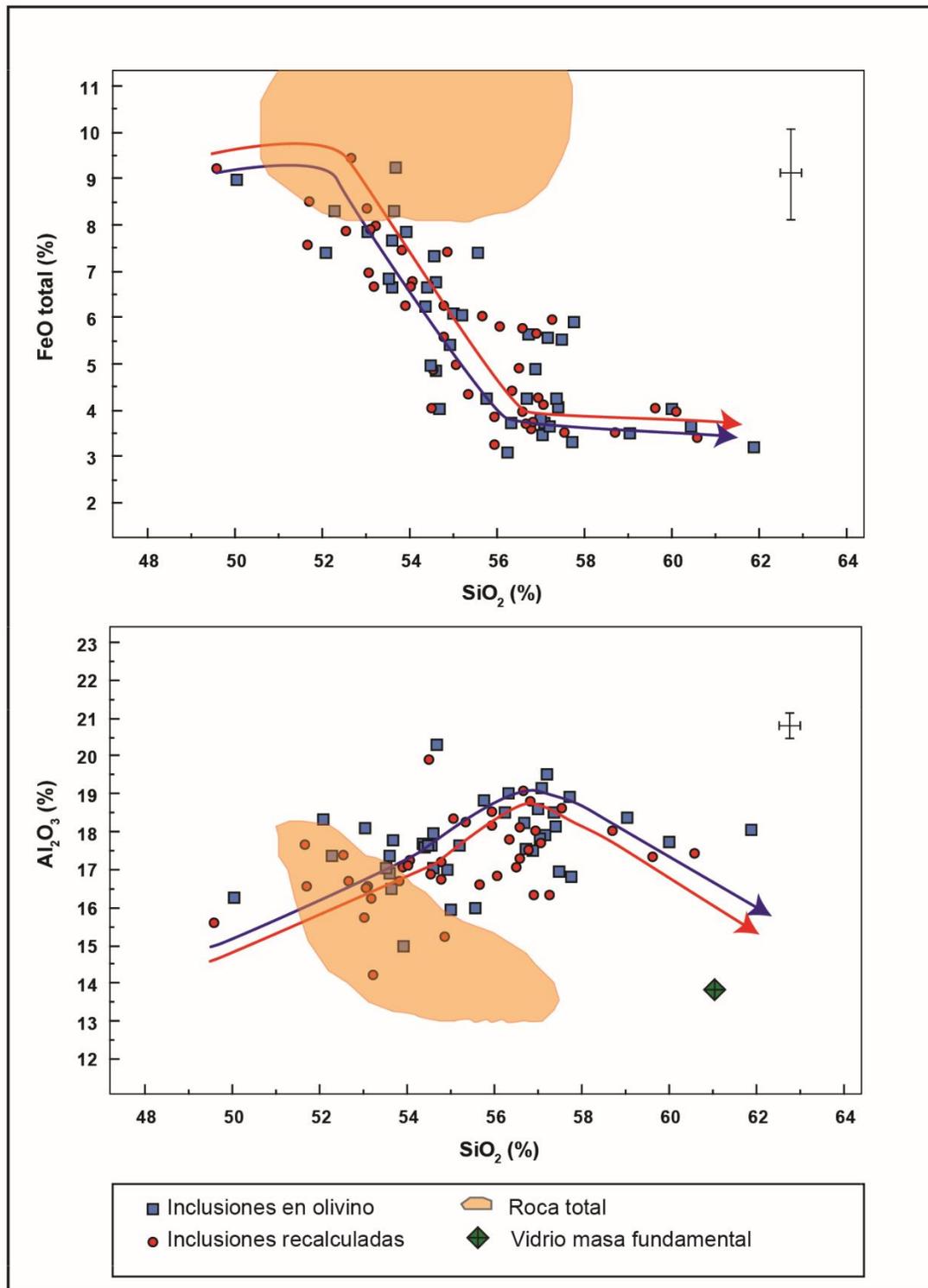


Figura 4.8: Diagramas Harker para los óxidos mayoritarios Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Feo total, en inclusiones vítreas y vidrio de la masa fundamental. Generado en Petrograph (Petrelli, 2005). Las líneas de tendencias son solo referenciales.

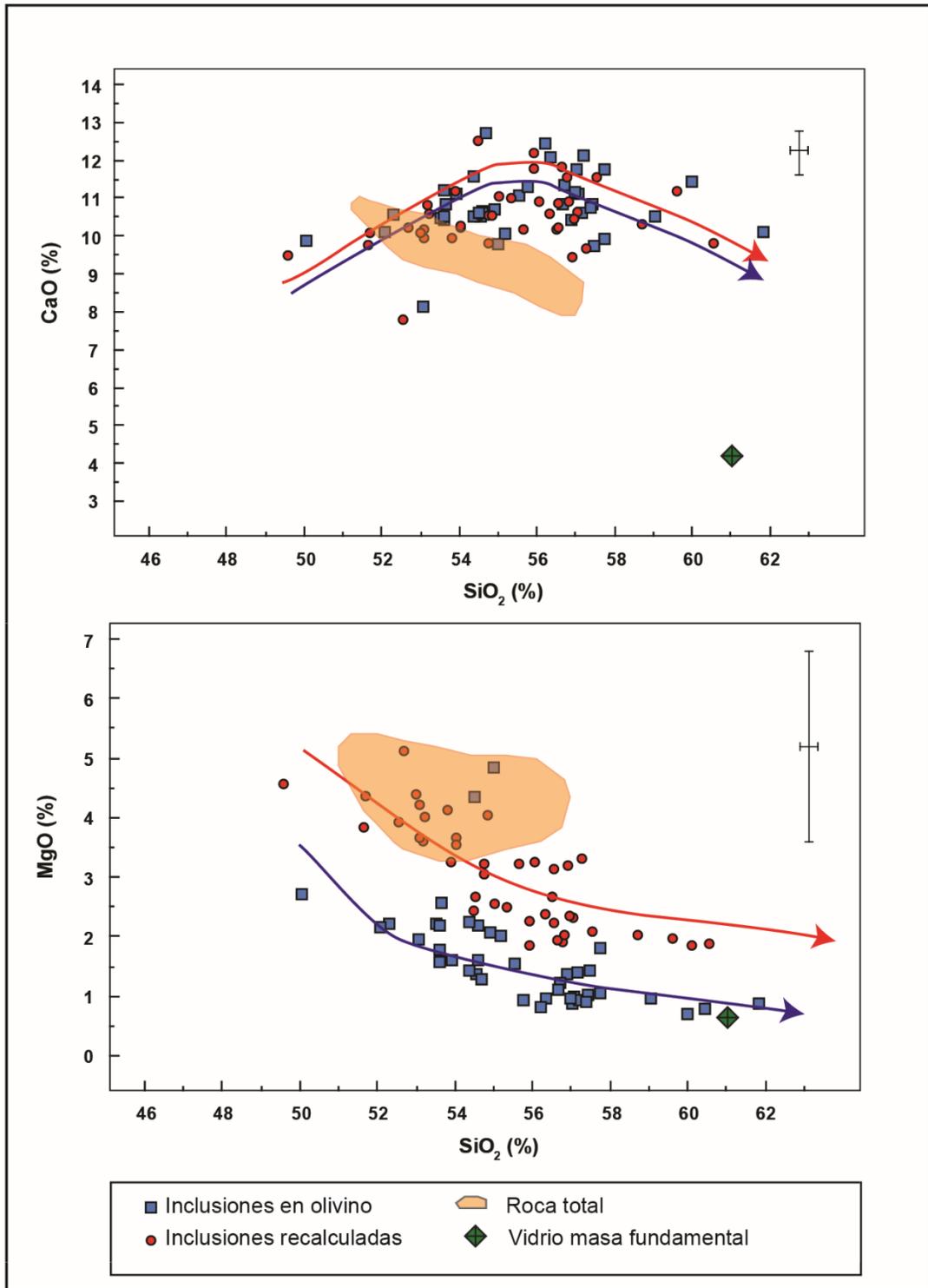


Figura 4.9: Diagramas Harker para los óxidos mayoritarios CaO y MgO, en inclusiones vítreas y vidrio de la masa fundamental. Generado en Petrograph (Petrelli, 2005). Las líneas de tendencia son solo referenciales.

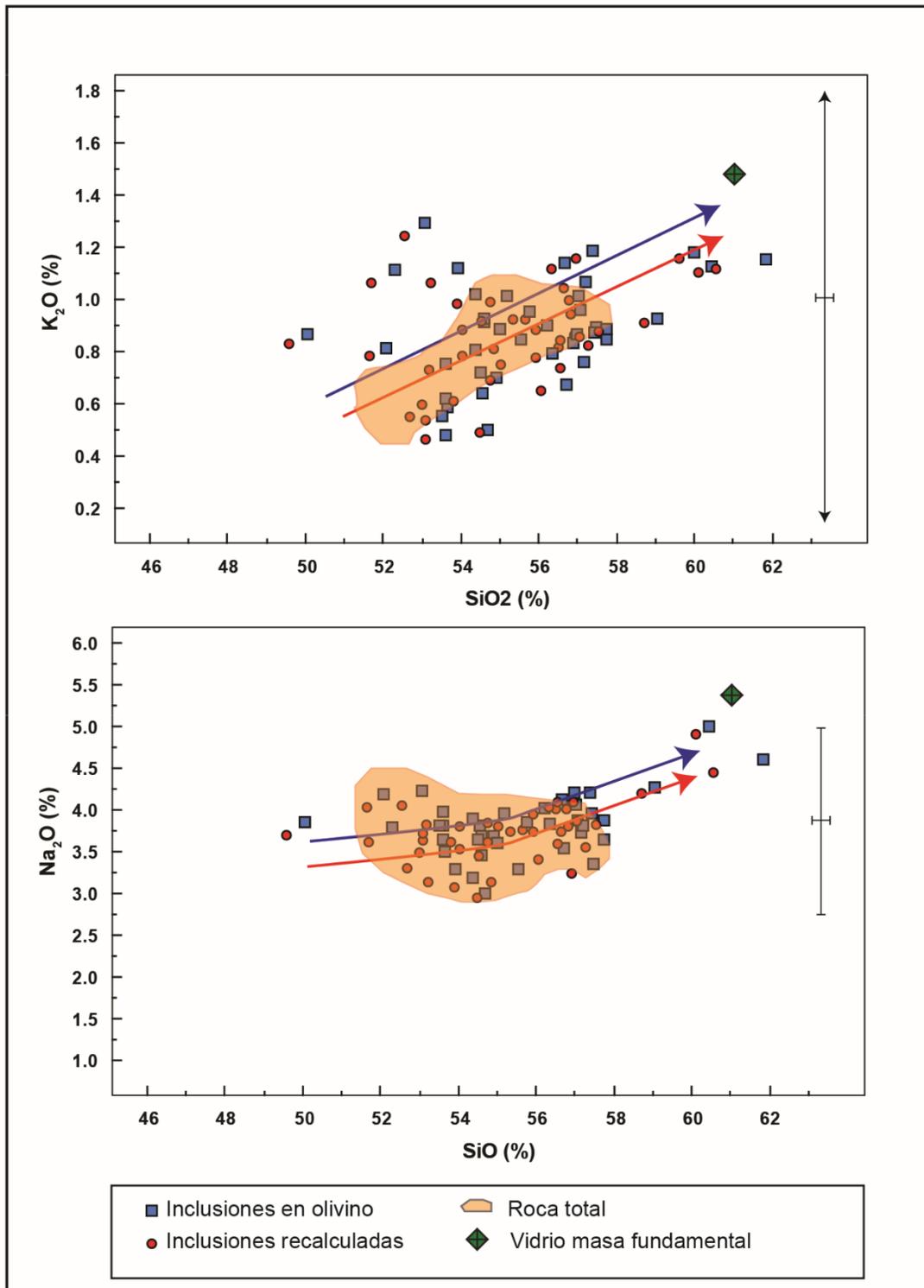


Figura 4.10: Diagramas Harker para los óxidos mayoritarios  $K_2O$  y  $Na_2O$ , en inclusiones vítreas y vidrio de la masa fundamental. Generado en Petrograph (Petrelli, 2005). Las líneas de tendencia son solo referenciales.

#### 4.3.3.2 DIAGRAMAS DE FENNER

Es un diagrama bivalente que muestra la variación de la concentración de elementos mayoritarios y menores en su forma de óxidos, en el eje de las ordenadas (eje Y), respecto al contenido de MgO a lo largo del eje horizontal (eje X). Este diagrama es más apropiado que el Harker, cuando se estudian series de rocas que incluyen abundantes minerales máficos. Dado que el MgO es un componente importante en las fases de minerales en equilibrio con fundidos máficos, éste muestra importantes variaciones como consecuencia de la descomposición de fases ricas en MgO durante procesos de fusión parcial o su remoción en procesos de cristalización fraccionada (Rollinson, 1993).

Las concentraciones de los óxidos analizados no varían respecto a los diagramas anteriores, puesto que se trata de las mismas inclusiones analizadas en microsonda electrónica. Para esta parte, solo se presentan diagramas para  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{FeO}$  (en su forma de hierro total),  $\text{MnO}$  y  $\text{P}_2\text{O}_5$  (figuras 4.11-4.13), debido a que muestran tendencias que permiten hacer interpretaciones), mientras que para  $\text{TiO}_2$  sólo se describe el rango de los resultados obtenidos, ya que no se observan tendencias claras.

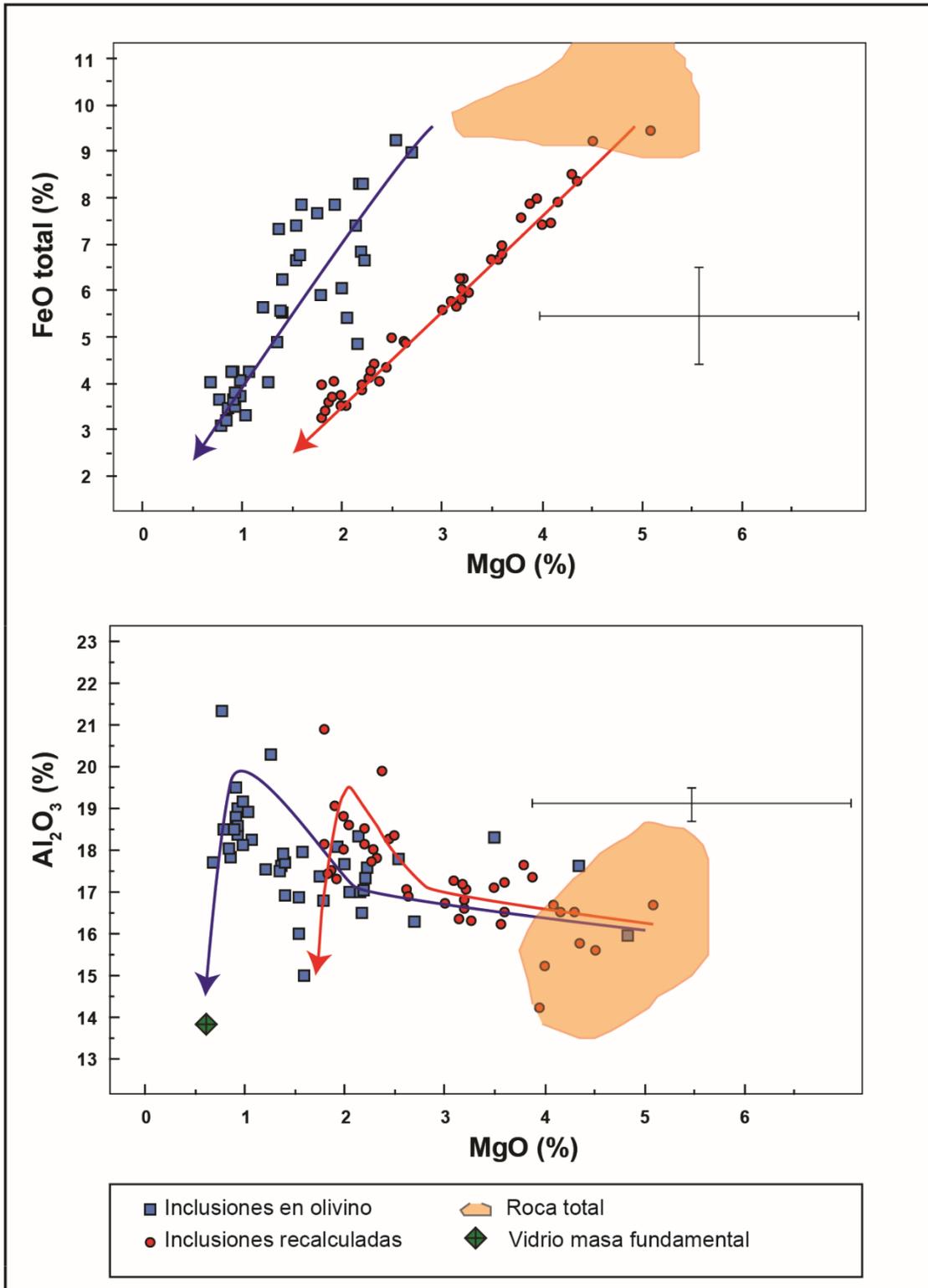


Figura 4.11: Diagramas de Fenner para los óxidos mayoritarios FeO total y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, en inclusiones vítreas y vidrio de la masa fundamental. Generado en Petrograph (Petrelli, 2005). Las líneas de tendencia son solo referenciales.

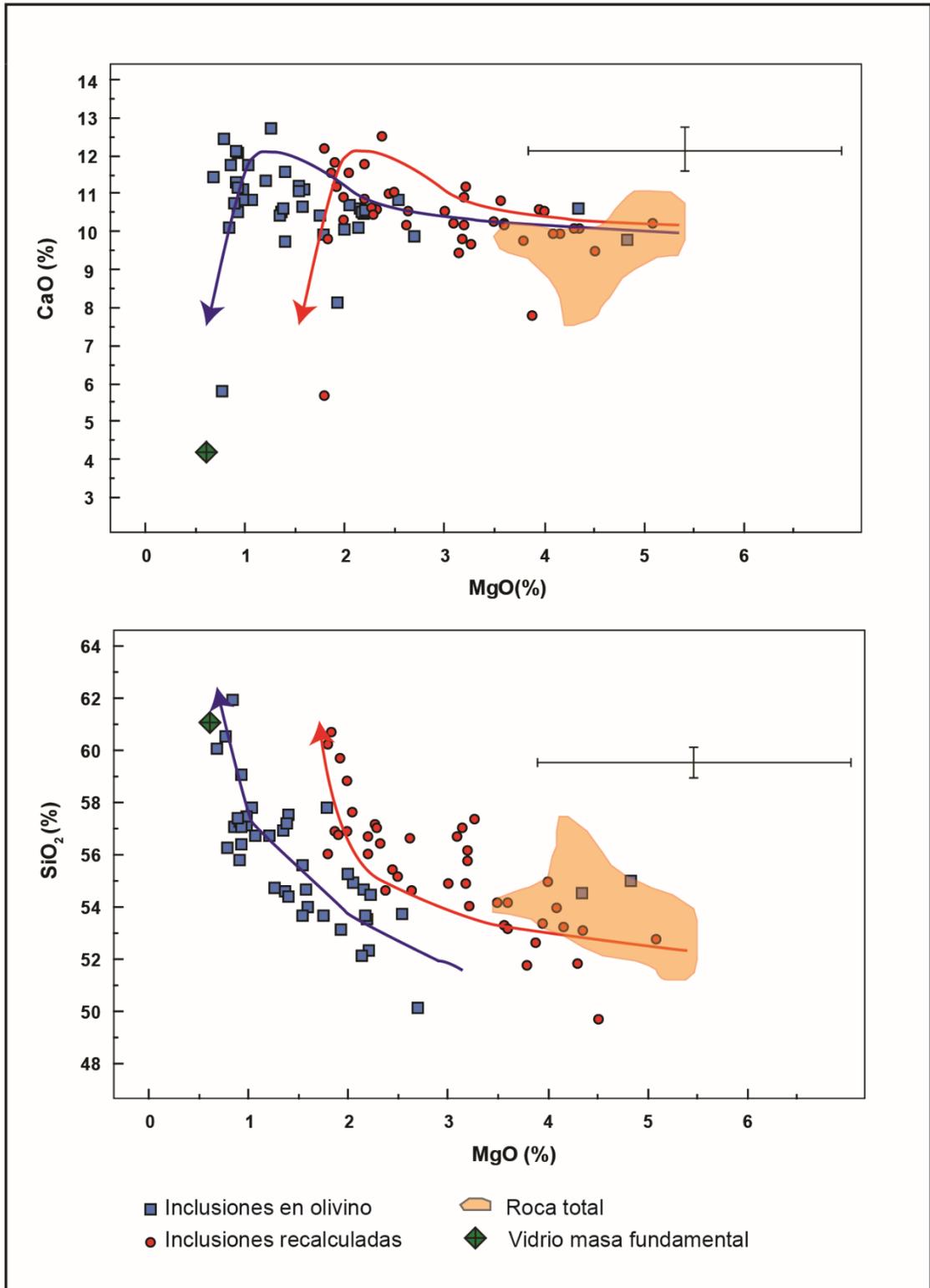


Figura 4.12: Diagramas de Fenner para los óxidos mayoritarios CaO y SiO<sub>2</sub>, en inclusiones vítreas y vidrio de la masa fundamental. Generado en Petrograph (Petrelli, 2005). Las líneas de tendencia son solo referencias.

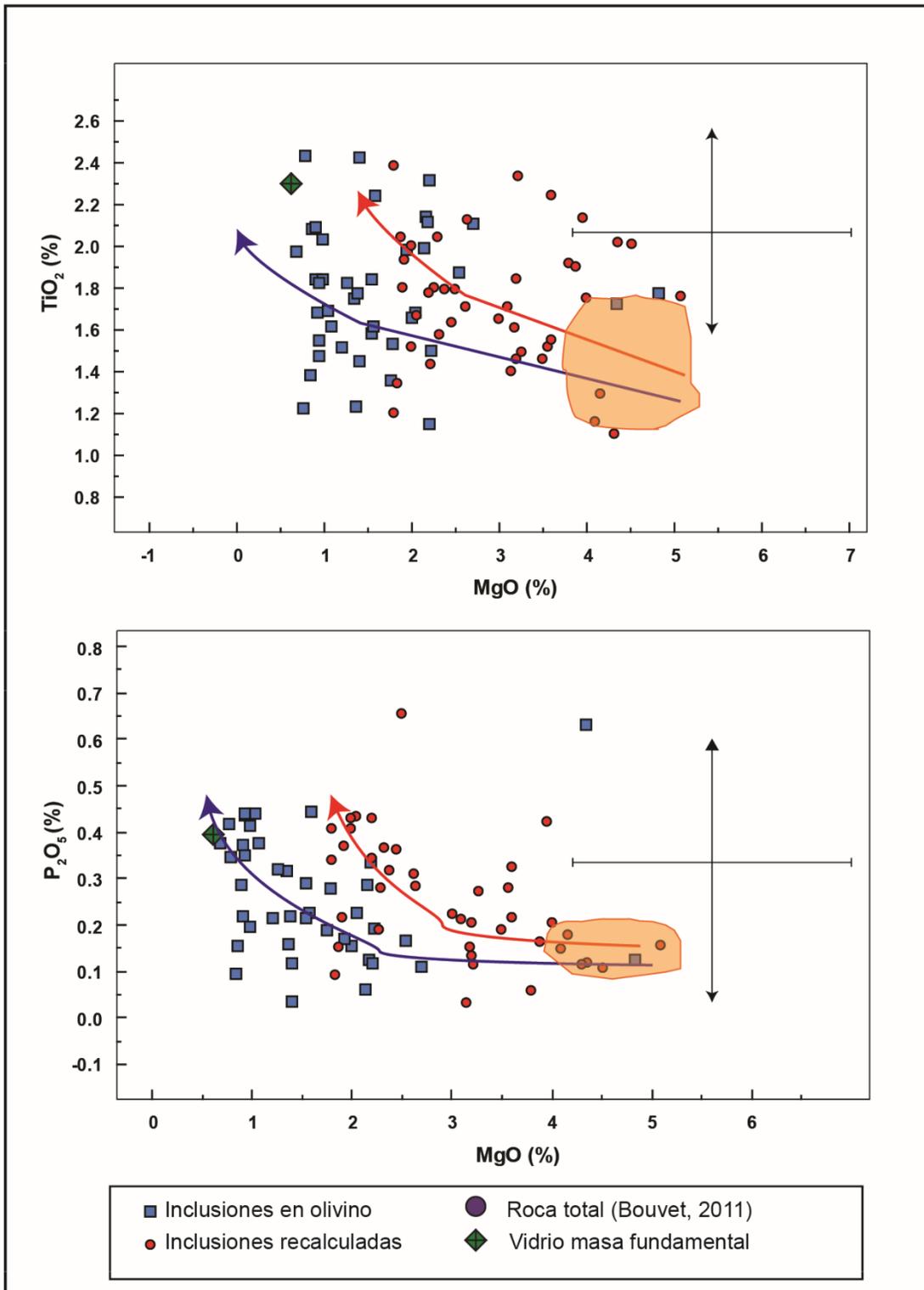


Figura 4.13: Diagramas de Fenner para los óxidos mayoritarios MnO y P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, en inclusiones vítreas y vidrio de la masa fundamental. Generado en Petrograph (Petrelli, 2005). Las líneas de tendencia son solo referenciales.

#### 4.3.4. DIAGRAMAS DE MULTI ELEMENTOS (SPIDER)

Un elemento traza se define como un elemento que está presente en una roca en concentraciones inferiores al 0.1 % wt, esto es, menos de 1000 partes por millón (ppm). En ocasiones los elementos trazas forman minerales por su cuenta, pero comúnmente sustituyen a elementos mayores en los minerales formadores de roca.

Los estudios con elementos trazas son parte fundamental de la petrología moderna y su correcta interpretación permite diferenciar e identificar los procesos petrológicos que ha sufrido una roca de mejor manera que los elementos mayoritarios.

Su estudio se realiza mediante diagramas de tierras raras y/o de multielementos, que son normalizados a la composición del manto primitivo, corteza continental superior o inferior, condritos, MORB, etc., según sea el requerimiento del estudio.

Para este estudio se realizaron diagramas multi elementos medidos en las inclusiones vítreas hospedadas en olivino normalizados al manto primitivo (Sun & McDonough, 1989) y a la roca total (Reubi, 2010). Además, incluye un diagrama de la roca total normalizado a los valores del manto primitivo.

En la figura 4.14, se presenta el diagrama multielementos para las inclusiones vítreas hospedadas en olivino normalizadas al manto primitivo de Sun & McDonough (1989). Se desprende que las inclusiones están enriquecidas en todos los elementos respecto del manto escogido. Los elementos litófilos (LIL, en inglés: large ion lithophiles elements), Cs, Rb, K, Ba, Sr y Eu, se encuentran enriquecidos en el vidrio de las inclusiones respecto del manto primitivo.

Los elementos con pequeño radio y alta carga, HFS (En inglés, High field strength elements) Th, U, Pb, Zr, Hf, Ti, Nb, Ta se encuentran enriquecidos respecto al manto, destacando un fuerte pico para el Pb (entre 1 y 3 órdenes de magnitud respecto al manto) y un enriquecimiento más ligero en el Nb (menor a 1 orden de magnitud).

Las tierras raras (La, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Y, Yb y Lu) también se encuentran enriquecidas, en ordenes de magnitud que varían según la inclusión, pero en general cercanos a 1.

En la figura 4.15, se presenta el diagrama para las inclusiones vítreas en olivino, normalizadas respecto a la roca total de Reubi (2010), en el cual se observa un claro enriquecimiento en Hf y empobrecimiento en Zr. Además, se encuentran enriquecidos los elementos Sm, Eu, Gd, Ti, Dy, Y, Yb y Lu, y empobrecidos los Pb, Zr y Sr, salvo por algunas inclusiones enriquecidas, mismo caso para el Cs, Rb, Ba. En cuanto a los demás elementos el diagrama indica que para algunas inclusiones se encuentra enriquecido y/o empobrecido, siempre en módulos inferiores a 10.

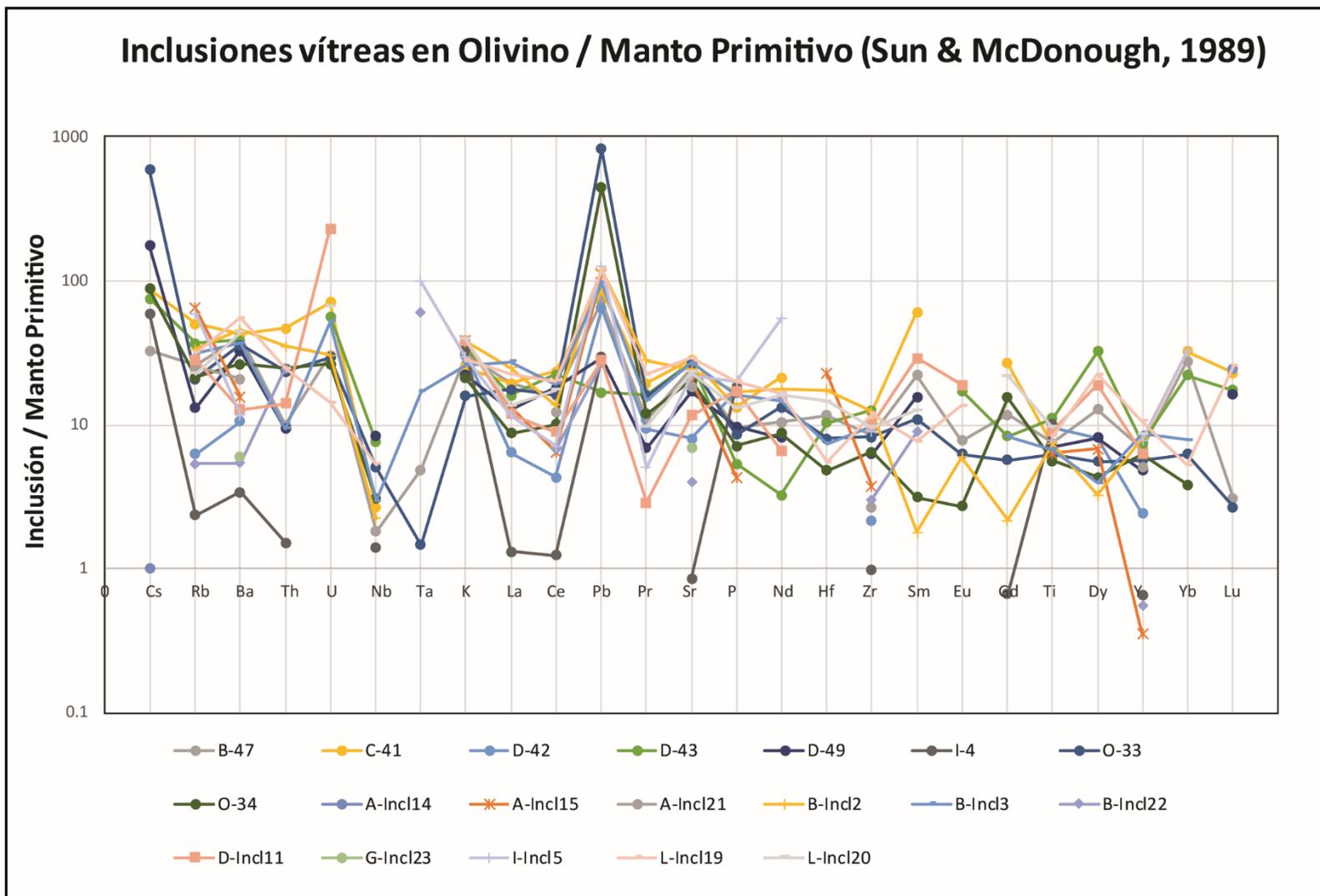


Figura 4.14: Diagrama Spider de multi elementos para inclusiones vítreas hospedadas en plagioclasa respecto al manto primitivo de Sun y McDodough (1989)

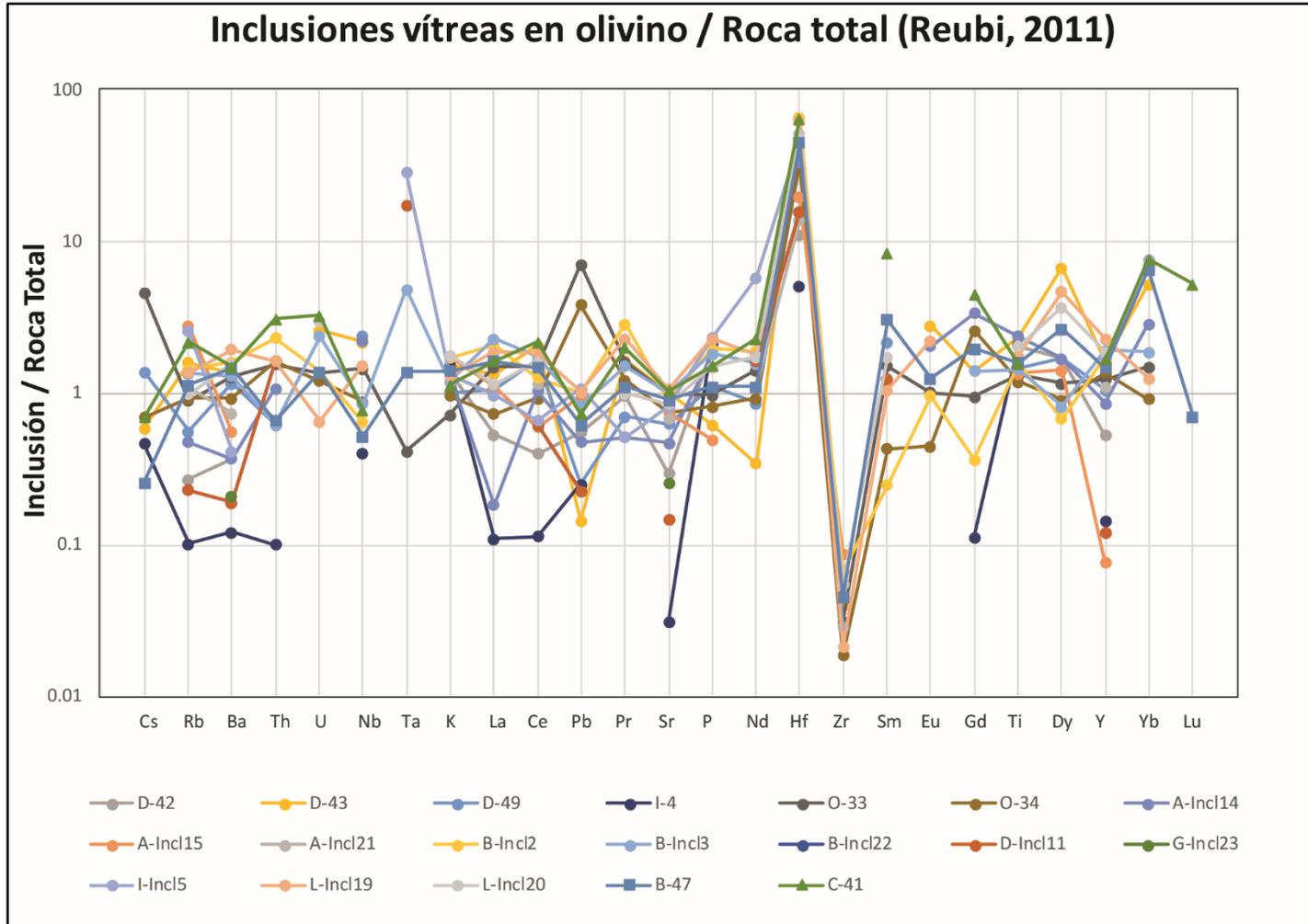


Figura 4.15: Diagrama Spider de multi elementos para inclusiones vítreas hospedadas en olivino respecto a la composición de la roca total de Reubi et al. (2011)

## 4.4. TEXTURAS Y ASOCIACIONES MINERALES

### 4.4.1. OLIVINO

Los olivinos presentan texturas de desequilibrio evidenciadas en la disolución o reabsorción de sus bordes, donde en algunos casos este desequilibrio es muy pervasivo dejando cristales anhedrales, sin relictos de los bordes originales.

En general, los olivinos se presentan de subhedrales a anhedrales, con bordes sinuosos y embahiamientos de distinta magnitud dependiendo del cristal.

Además, es posible encontrar olivinos y plagioclasas en paragénesis, formando glómeros y agregados minerales de distinto tamaño.

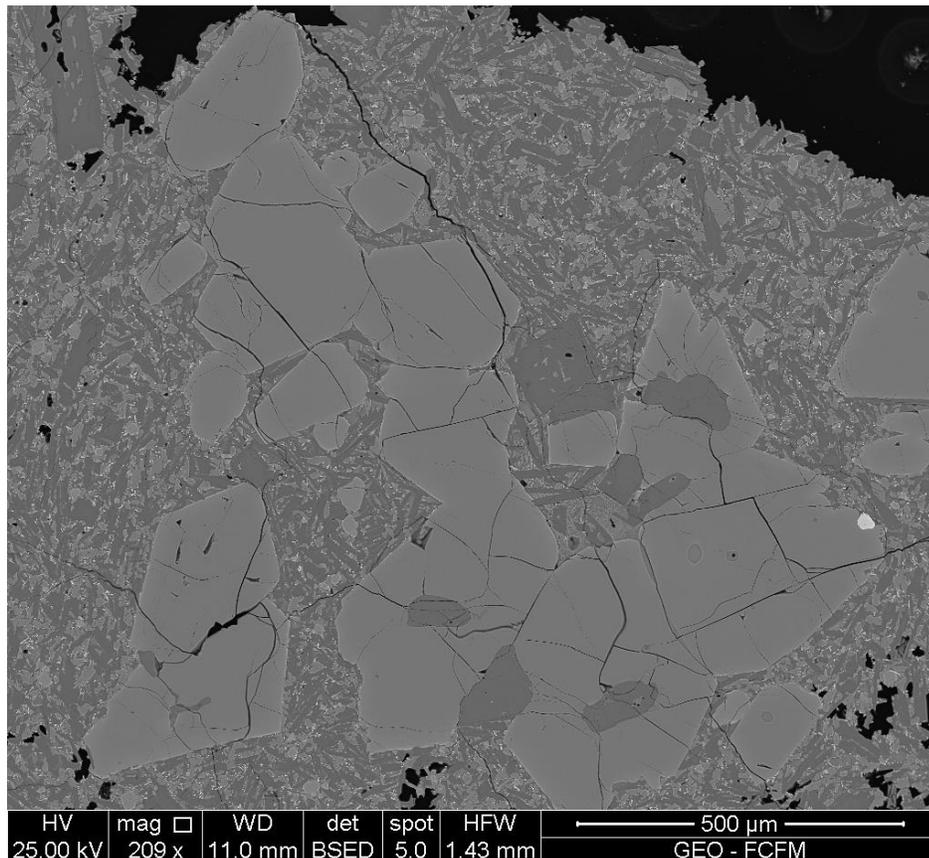
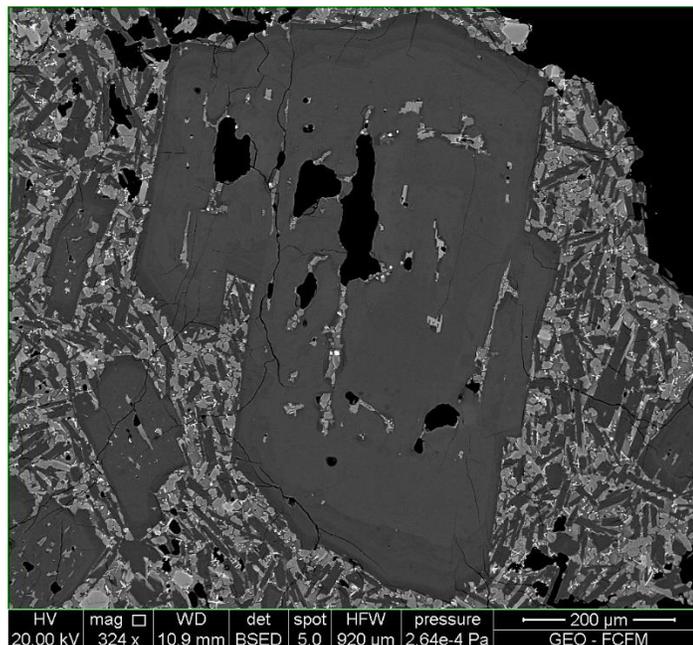


Figura 4.16: Glómero de olivinos y plagioclasas. Fotomicrografía tomada en SEM.

#### 4.4.2. PLAGIOCLASA

Una característica común en los fenocristales de plagioclasa es su textura de reabsorción, evidenciada en los sieves de distinta magnitud que éstos presentan en su núcleo de bytownita, que compone casi la totalidad del cristal. Estos grandes núcleos están rodeados de un crecimiento de plagioclasa más sódica (labradorita), en una delgada franja en los bordes del cristal, que no presenta claras evidencias de reabsorción.



*Figura 4.17: Cristal NV10-plgF. Plagioclasa con intensa reabsorción en su núcleo, evidenciando texturas de sieve en su núcleo, rodeado por un borde de distinta composición que no está reabsorbido.*

## 4.5. PERFILES COMPOSICIONALES

### 4.5.1. OLIVINO

De acuerdo con la información entregada por los perfiles composicionales de los cristales NV11-oliU, NV11-oliY y NV10-oliG, se tiene que la composición de estos en términos de su porcentaje de Fo varía al alejarse desde el núcleo hasta el borde del cristal. Si bien, en la mayor parte de los cristales de olivino existe cierta homogeneidad en cuanto al contenido de forsterita y fayalita, se encuentra que hacia los bordes el porcentaje de Fo disminuye respecto a la composición del núcleo (ver figuras 4.18 – 4.20).

En los núcleos se han encontrado en promedio composiciones  $Fo_{77}Fa_{23}$ , y en los bordes  $Fo_{71}Fa_{29}$ . Es importante destacar que la disminución de Fo ocurre en las proximidades del borde, encontrándose un gran núcleo, casi sin zonación en la mayor parte de los cristales. Además, en general, es posible encontrar bordes de reacción de enstatita y augita en los fenocristales de olivino. Estos bordes se manifiestan de manera leve, es decir, no existen grandes coronas de augita rodeando a los olivinos, pero si evidencias petrográficas, algunas medidas en EPMA, que permiten comprobar este desequilibrio.

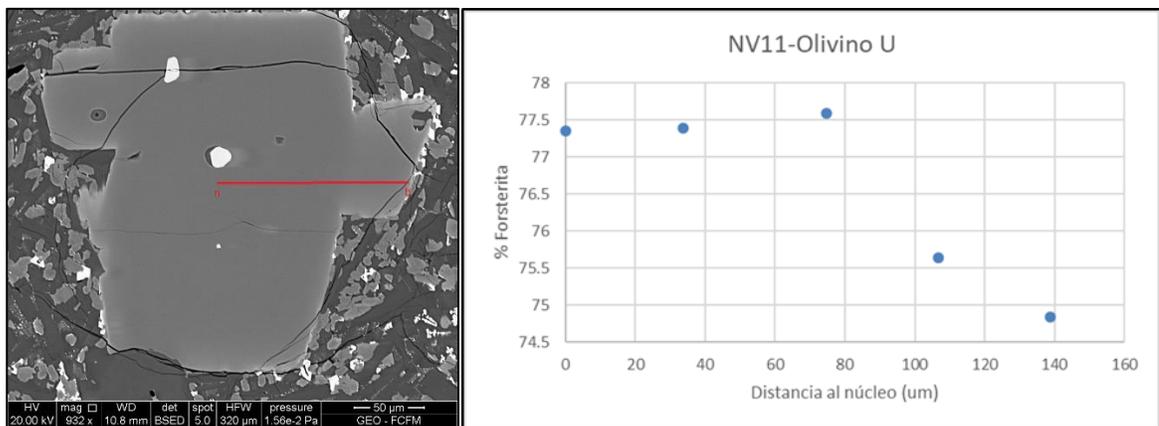


Figura 4.18: Perfil composicional realizado en cristal de olivino NVII-Oli U en términos del porcentaje de forsterita, medidos según la línea roja

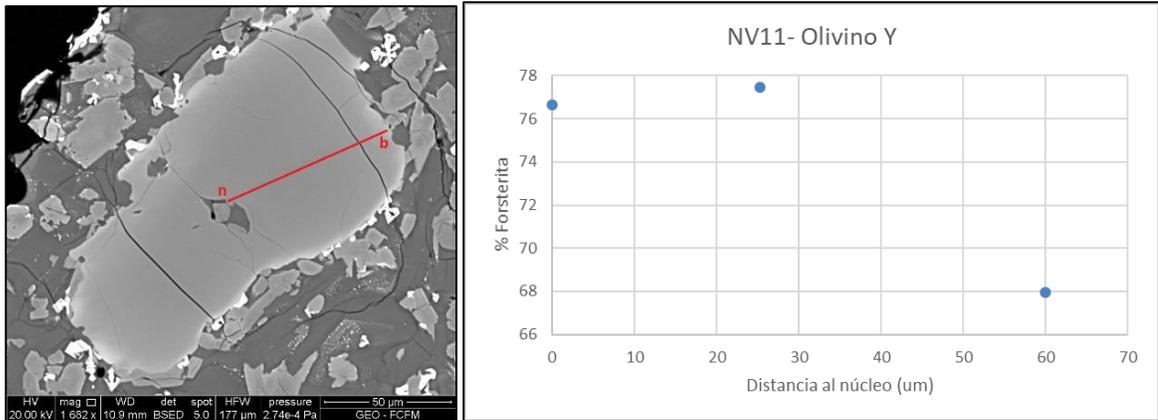


Figura 4.19: Perfil composicional realizado en cristal de olivino NV11- Oli U en términos del porcentaje de forsterita, medidos según la línea roja

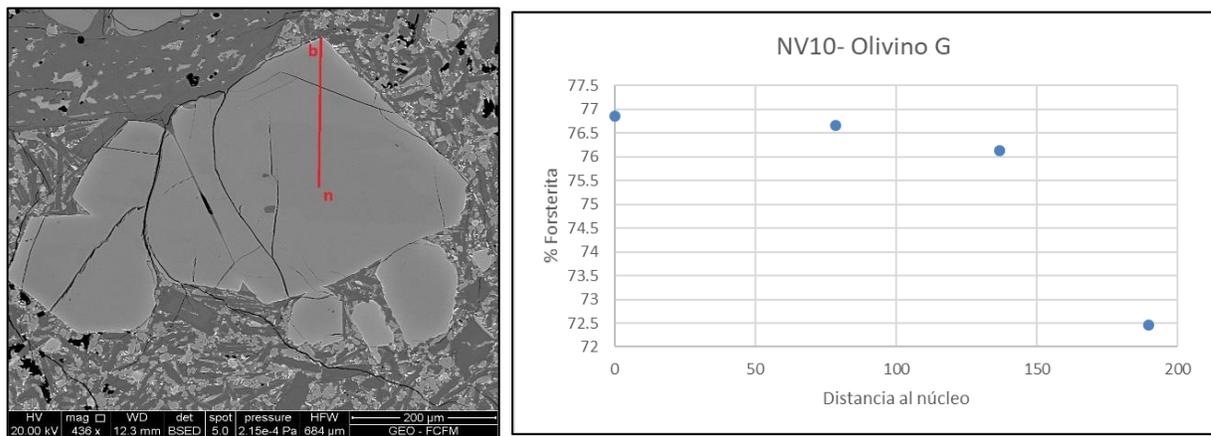


Figura 4.20: Perfil composicional realizado en cristal de olivino NV10- Oli G en términos del porcentaje de forsterita, medido según la líneas roja

## 4.5.2. PLAGIOCLASA

En la figura 4.21 se muestran las líneas de los perfiles composicionales realizados en las plagioclasas del corte NV10 (plgC, plgD, plgE, plgF y plgH). Las figuras 4.22-4.26 muestran los resultados de los perfiles realizados en EPMA, en términos de su contenido de Anortita (%An).

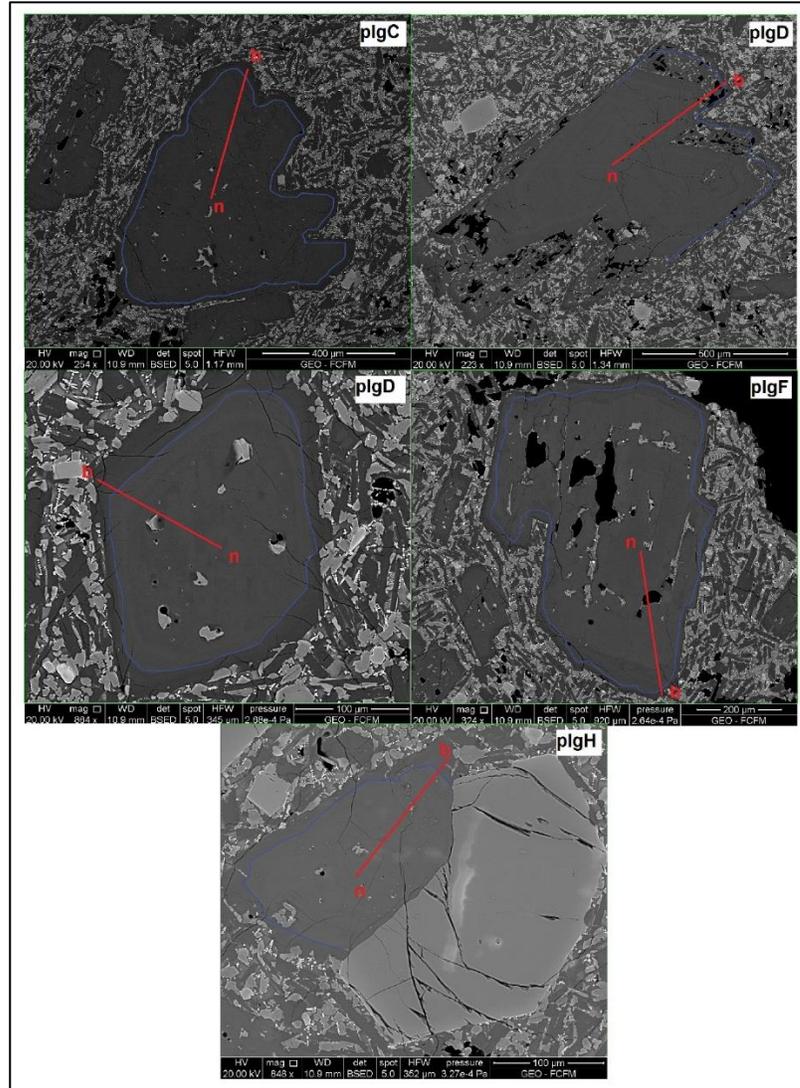


Figura 4.21: Perfiles realizados en EPMA en cristales de plagioclasas del corte NV10. La línea roja indica la dirección sobre la cual se realizaron las mediciones, desde el núcleo (n) hasta el borde (b). La línea divisoria azul marca las zonaciones presentes.

Como característica común en todos los cristales analizados, se encuentra que los núcleos de las plagioclasas, marcados en azul en la figura 4.21, son relativamente homogéneos en términos del contenido de An, con porcentajes entre 80 y 90%, y con una lenta y progresiva disminución hacia los bordes. El tipo de plagioclasa para esta zona corresponde a una bytownita. En los bordes, el contenido de An disminuye considerablemente a porcentajes entre 58 y 66% dependiendo del cristal analizado, clasificando aquí cada plagioclasa como una labradorita. En la transición núcleo-borde, antes de la línea azul, se observa una progresiva disminución del porcentaje de An no tan marcada como fuera de ella, en los bordes mismos.

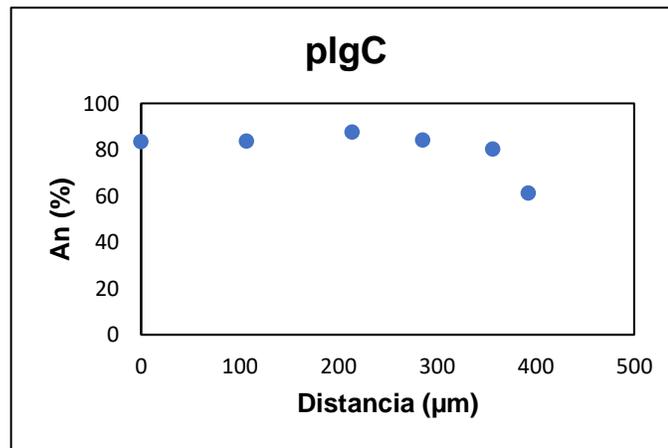


Figura 4.22: Perfil composicional en términos del porcentaje de Anortita (%An) del cristal NV10-plgC, medidos según las líneas rojas de la figura 5.1

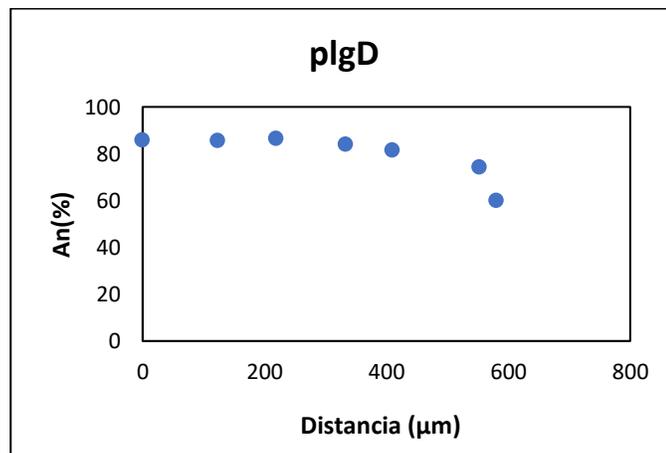


Figura 4.23: Perfil composicional en términos del porcentaje de Anortita (%An) del cristal NV10-plgD, medidos según las líneas rojas de la figura 5.1

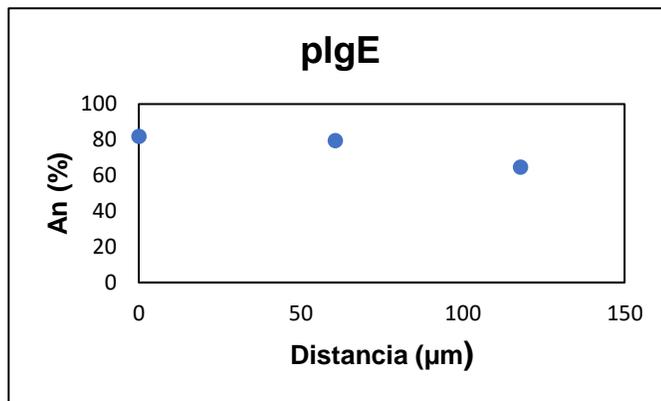


Figura 4.24: Perfil composicional en términos del porcentaje de Anortita (%An) del cristal NV10-plgE, medidos según las líneas rojas de la figura 5.1

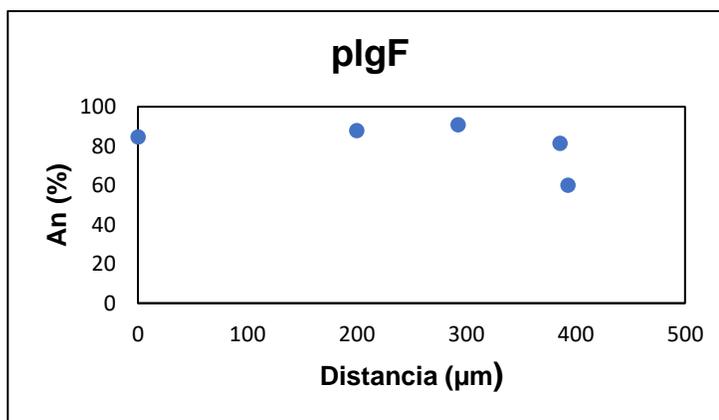


Figura 4.25: Perfil composicional en términos del porcentaje de Anortita (%An) del cristal NV10-plgF, medidos según las líneas rojas de la figura 5.1

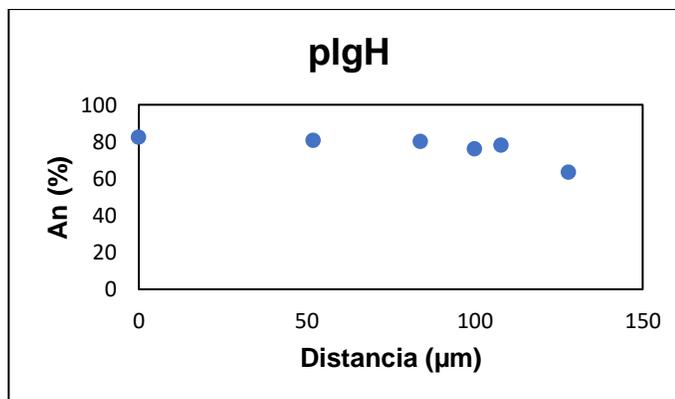


Figura 4.26: Perfil composicional en términos del porcentaje de Anortita (%An) del cristal NV10-plgH, medidos según las líneas rojas de la figura 5.1

## 4.6. VOLÁTILES

A pesar de no medirse específicamente el contenido de volátiles mediante EPMA, se calcula que el contenido de estos es la diferencia entre la suma de los óxidos mayoritarios para llegar al 100 wt%. Ciertamente este método no es el más recomendable para cuantificar los volátiles, pues no permite saber el contenido específico de los distintos volátiles en el magma durante el atrapamiento de cada inclusión vítrea.

Al graficar el contenido de volátiles en cada inclusión analizada, respecto a su contenido de MgO y SiO<sub>2</sub> (figuras 4.27 y 4.28), se obtiene que el porcentaje de volátiles en la inclusión, i.e. en el fundido, disminuye con el aumento del porcentaje de SiO<sub>2</sub> (y con la disminución del porcentaje de MgO).

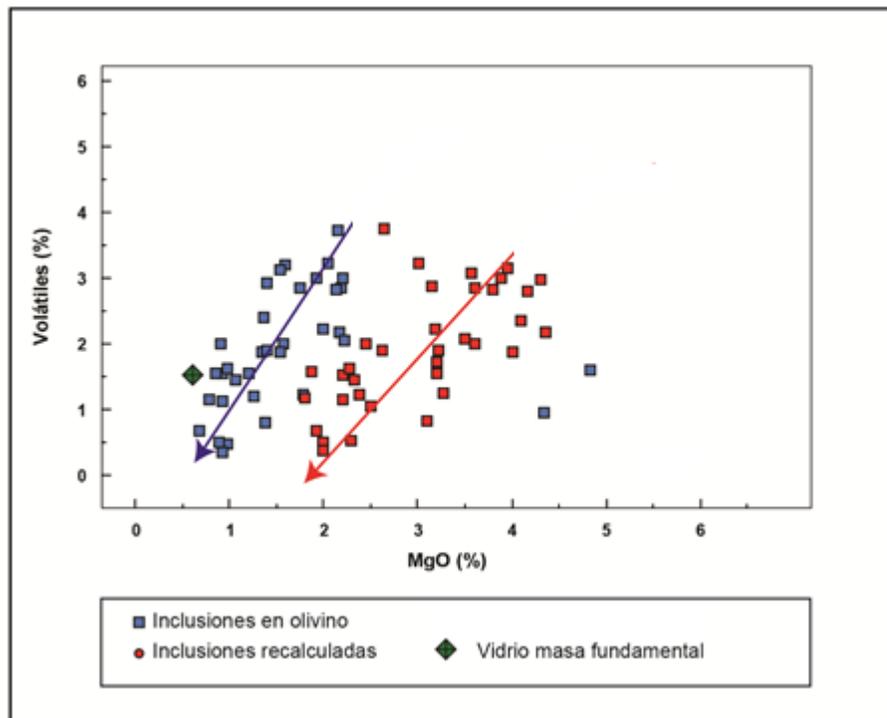


Figura 4.27: Contenido de volátiles en inclusiones vítreas hospedadas en olivino versus contenido de MgO.

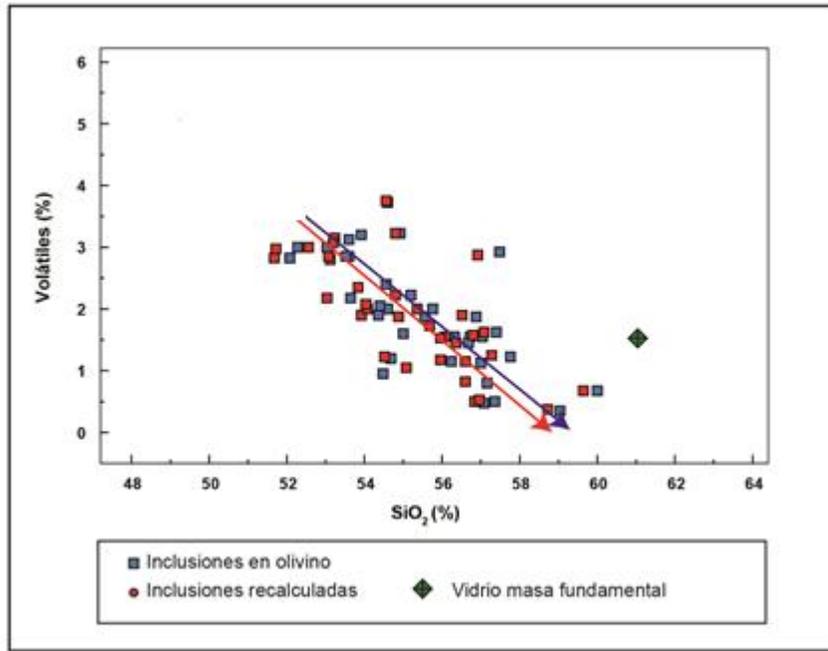


Figura 4.28: Contenido de volátiles en inclusiones vítreas hospedadas en olivino versus contenido de SiO<sub>2</sub>.

## 4.7. GEROTERMOBAROMETRÍA

### 4.7.1. TERMÓMETRO DE OLIVINO Y VIDRIO

Putirka et. al (2007) proponen un termómetro para calcular la temperatura de atrapamiento del vidrio de las inclusiones dentro del olivino, cuando el líquido está en equilibrio con la fase sólida. El margen de error para estos cálculos se estima en  $\pm 20$  °C.

Para el cálculo de esta temperatura se han utilizado los datos de la composición de las inclusiones recalculadas en Petrolog, ya que se espera que éstos sean más cercanos a la realidad dado la difusión Mg-Fe entre el vidrio y su huésped, además de la composición del olivino huésped.

De las 36 inclusiones medidas junto a su huésped, solamente 5 pares inclusión-huésped, no pasan el test de equilibrio de Rhoades et al. (1979). La temperatura promedio entregada por las demás es de 1099°C, según el termómetro de Putirka et al., (2007) y 1085°C para el de Beattie (1993). El detalle de cada test se incluye en la tabla 4.2.

Las temperaturas calculadas por Putirka et al. (2007) y Beattie (1993) son similares, sin embargo, dada la confiabilidad y la inclusión en el método de un margen de error, se considera para esta investigación la de Putirka et al.

Tabla 4.1: Resumen de resultados para termómetros de Putirka et al. (2007) y Beattie (1993)

Temperatura	T(°C)-Beattie (1993)	T(°C)-Putirka et al. (2007) $\pm 20$ °C
T° mayor	1199.2	1203.7
T° menor	990.9	1024.0
T° Promedio	1085.8	1099.4

En la tabla 4.1, se encuentran los principales resultados de estos termómetros, encontrándose que la temperatura promedio para el termómetro de Putirka es  $1099 \pm 20$  °C, con una temperatura menor de  $1024 \pm 20$  °C y mayor de  $1203 \pm 20$  °C.

Tabla 4.2: Termómetro de olivino y vidrio según Putirka et al. (2007) y Beattie (1993).

Inclusión	KD(Fe-Mg)	Equilibrio (Rhodes et al., 1979)	T(°C)-Beattie (1993)	T(°C)-Putirka et al. (2007) ±20 °C
NV10-A-50 rec	0.289	Sí	1061.9	1076.8
NV10-A-51 rec	0.282	Sí	1116.5	1124.5
NV10-B-46 rec	0.285	Sí	1137.5	1143.6
NV10-C-41 rec	0.283	Sí	1135.1	1142.1
NV10-D-43 rec	0.285	Sí	1103.3	1115.7
NV10-D-49 rec	0.294	Sí	1106.0	1119.7
NV10-F-39 rec	0.289	Sí	1101.1	1113.0
NV10-F-40 rec	0.286	Sí	1067.3	1078.3
NV10-I-6 rec	0.283	Sí	1141.3	1148.3
NV10-K-52 rec	0.292	Sí	1138.2	1145.6
NV10-L-35 rec	0.293	Sí	1109.3	1113.9
NV10-L-37 rec	0.295	Sí	1117.8	1124.8
NV10-O-33 rec	0.286	Sí	1168.8	1171.8
NV10-O-34 rec	0.287	Sí	1164.9	1168.0
NV10-P-54 rec	0.290	Sí	1106.5	1114.9
NV 10 - Ol Q - inclusión 3 rec	0.278	Sí	1138.2	1143.7
NV 10 - Ol Q - inclusión 4 rec	0.281	Sí	1174.7	1176.9
NV 10 - Ol Q - inclusión 6 rec	0.283	Sí	1119.9	1124.7
NV 10 - Ol R - inclusión 11 rec	0.269	No	1181.2	1176.8
NV 10 - Ol R - inclusión 12 rec	0.265	No	1166.9	1154.3
NV 10 - Ol S - inclusión 8 rec	0.277	Sí	1165.7	1164.6
NV 10 - Ol S - inclusión 9 rec	0.279	Sí	1122.0	1126.1
NV 10 - Ol S - inclusión 10 rec	0.270	No	1156.1	1155.3
NV 10 -U inclusión 1 rec	0.284	Sí	1199.2	1203.7
NVII - A - Inclusión 14 rec	0.299	Sí	990.9	1024.0
NVII - A - Inclusión 15 rec	0.292	Sí	1026.1	1044.7
NVII - B - Inclusión 2 rec	0.289	Sí	1057.3	1074.0
NVII - B - Inclusión 3 rec	0.303	Sí	1016.6	1042.0
NVII - B - Inclusión 4 rec	0.294	Sí	1044.3	1062.3
NVII - C - Inclusión 10 rec	0.311	Sí	1013.7	1043.8
NVII - D - Inclusión 11 rec	0.335	No	991.2	1027.4
NVII - D - Inclusión 12 rec	0.303	Sí	1005.1	1035.1
NVII - D - Inclusión 13 rec	0.293	Sí	1063.2	1081.3
NVII - E - Inclusión 1 rec	0.249	No	1085.3	1067.9
NVII - H - Inclusión 18 rec	0.294	Sí	1047.8	1067.4
NVII - I - Inclusión 5 rec	0.304	Sí	1017.3	1045.0
NVII - J - Inclusión 6 rec	0.296	Sí	1007.2	1035.8
NVII - J - Inclusión 7 rec	0.298	Sí	1007.5	1029.9
NVII - K - Inclusión 8 rec	0.296	Sí	1016.7	1035.8
NVII - L - Inclusión 19 rec	0.292	Sí	1027.5	1046.6
NVII - L - Inclusión 20 rec	0.282	Sí	1053.7	1069.6

## CAPITULO 5. DISCUSIÓN

### 5.1. TRATAMIENTO DE DATOS

Los análisis de inclusiones vítreas que presentaban valores de  $Al_2O_3 > 20\%$  wt se han considerados no válidos o alterados. Por consiguiente, las inclusiones vítreas NII-E-incl1 y NVII-c-incl10 han sido descartadas debido a este criterio.

Por otra parte, en los diagramas Harker y Fenner los puntos considerados “outlayers” fueron eliminados, porque difieren considerablemente de la tendencia observada por la mayoría de las inclusiones, dejando el sospecho de ser análisis contaminadas por el cristal huésped.

Tabla 5.1: Datos "outlayer" de inclusiones en diagramas bivariantes

Óxido	Harker ( $SiO_2$ )	Fenner (MgO)
$Na_2O$	NV10-D-incl11	NV10-D-incl11
$SiO_2$	NO APLICA	NVII-D-incl13 NV10-A-51
CaO	NVII-E-incl1	NVII-E-incl1
$P_2O_5$	NVII-D-incl13	NVII-D-incl13
MgO	NVII-D-incl13 NV10-A-51	NO APLICA
$P_2O_5$	-	NVII-E-inc1

En cuanto a la medición de datos mediante Ablación Láser para diagramas spider, se procede a descartar todos aquellos datos en que el haz del instrumento supere el diámetro de la inclusión medida. Por este motivo han sido descartadas en el corte NV10 las inclusiones A-50, A-51, F-40, K-52, P-53 y P-54. Del mismo modo del corte NV11 se han descartado las inclusiones B-incl4, D-incl12, D-incl13 y E-incl1.

## 5.2. PETROLOGÍA:

### 5.2.1. TEXTURAS Y PERFILES COMPOSICIONALES EN OLIVINO Y PLAGIOCLASA

#### 5.2.1.1 Olivino

La existencia de glómeros de plagioclasa y olivino, sugiere que ambas fases habrían cristalizado en tiempos similares. Las composiciones del olivino y la plagioclasa en paragénesis, ya sea en cúmulos o pares de cristales, son muy similares a las encontradas en fenocristales de ambas fases que no están en contacto; por lo que la plagioclasa bytownítica y el olivino  $F_{077}$ - $F_{a23}$  son fases que habrían cristalizado casi simultáneamente, o bien, la aparición de la plagioclasa es un poco posterior al olivino, pero en condiciones que permitirían aún su paragénesis.

En cuanto a los bordes disueltos en el olivino, que se presentan sinuosos y con embahiamientos, se tiene que la disolución de los bordes podría relacionarse a un aumento de la temperatura del sistema, por ejemplo, por el calor liberado en la cristalización de las distintas fases minerales. Esto va en línea con lo planteado por Watson (1982), sobre el comportamiento del olivino dentro de un fundido de una temperatura mayor a la del liquidus del olivino, que conlleva al proceso de disolución mencionado.

Donaldson (1985) sugiere que la disolución de distintos minerales, entre ellos el olivino, está relacionado a la existencia de gradientes en la composición del líquido que rodea los cristales, y que sería resultado de una combinación de difusión y convección de componentes desde y hacia la interfaz líquido-cristal. De manera similar, Chen et al. (2008) proponen que la disolución del olivino en sus bordes y caras está relacionada con la difusión del Mg entre el cristal y el líquido y la convección que ocurre dentro de una cámara magmática.

Por lo tanto, la disolución del olivino podría estar dada por el aumento de la temperatura que se produce en el líquido por la cristalización de las distintas fases minerales presentes, y por el reequilibrio que ocurre en él debido a los cambios composicionales del líquido que lo rodea, por ejemplo, por el movimiento del fundido mismo dentro de la cámara magmática por convección, o por el desplazamiento de los cristales debido a la convección y buoyancia.

En cuanto a la zonación del borde encontrada en los olivinos, esta podría deberse al cambio en la química del magma, esto es, una disminución del contenido de MgO en el fundido, que explicaría el paso desde un mayor nivel de Fo en el núcleo a una disminución de la misma en los bordes (y su consecuente aumento de Fa). De esta forma, el borde de piroxeno en olivino ocurre cuando este último está en contacto con un fundido más rico en sílice, y, por lo tanto, ya no está en equilibrio con el líquido (Tsuchiyama, 1986).

Estas evidencias permiten plantear que los olivinos se han visto afectados por cambios en las condiciones de presión, temperatura y química del fundido durante el crecimiento cristalino.

#### 5.2.1.2 Plagioclasa

Una característica común en los fenocristales de plagioclasa es su textura de reabsorción, evidenciada en los sieves de distinta magnitud que éstas presentan en su núcleo de bytownita, que compone casi la totalidad del cristal. Estos grandes núcleos están rodeados de un crecimiento de plagioclasa más sódica (labradorita), en una delgada franja en los bordes del cristal, que no presenta claras evidencias de reabsorción.

El gran tamaño relativo del núcleo de bytownita respecto al borde, permite establecer un tiempo de residencia en las etapas iniciales del crecimiento cristalino mucho mayor que si se compara con la delgada franja del borde. En otras palabras, previo al desequilibrio y consecuente reabsorción del núcleo, éste creció durante un gran tiempo en condiciones de equilibrio con un magma rico en Ca, que permite la cristalización de bytownita. Además, de los perfiles de plagioclasa (figuras 4.23-4.27) se observa una lenta disminución del % de An, antes de la línea de transición núcleo-borde, teniéndose una zonación normal. Esto permitiría descartar una recarga magmática rica en Ca (Streck, 2008), más máfica y caliente, que haría aumentar el porcentaje de An, por lo que la disminución en el núcleo de An, antes de la línea de transición, podría deberse a la herencia de la misma diferenciación del fundido en su evolución.

La reabsorción pervasiva de los núcleos está asociado a un evento de desequilibrio, que en este caso podría corresponder a uno de descompresión (Vance, 1965), probablemente de gran intensidad debido a la gran cantidad de sieves a lo largo del núcleo relativamente homogéneo en términos del contenido de An (ver perfiles composicionales en figuras 4.22-4.26).

Asumiendo que los núcleos de bytownita en las plagioclasas cristalizan de una fuente magmática básica, poco evolucionada y saturada en volátiles, se puede postular que la descompresión de estos magmas saturados podría dar lugar a un nuevo tipo de plagioclasa, representada por la labradorita en los bordes. La reabsorción del núcleo sería posible durante el ascenso magmático, desde la cámara magmática donde la plagioclasa cristalizó hasta la superficie, teoría que va en línea con los propuesto por Nelson y Montana (1992) y Blundy y Cashman (2001).

La poca evidencia de reabsorción en la franja del borde de los cristales, y, de acuerdo con sus características composicionales, permiten afirmar que estos bordes crecieron en nuevas condiciones de equilibrio, diferentes a las del núcleo bytownítico, con un fundido ya más evolucionado, y más cercano a la superficie respecto de la hipotética cámara en que creció el núcleo.

### 5.3. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE DATOS GEOQUÍMICOS EN INCLUSIONES VÍTREAS

Respecto al diagrama TAS (figura 4.6), se tiene que el contenido de sílice de las inclusiones vítreas en olivino varía entre 50.07 y 61.88 wt %, siendo las composiciones del vidrio entre los campos de andesita basáltica y andesita.

El único punto medido en vidrio de la matriz indica un porcentaje de sílice de 62,1 wt %, concordante con el contenido de SiO<sub>2</sub> en las inclusiones hospedadas en olivino, ya que el porcentaje es mayor para el vidrio de la matriz. El vidrio de la matriz se puede considerar como el “vidrio residual” del fundido en el sistema magmático, y, por ende, que sea lo más evolucionado resulta lógico. Además, resulta interesante que su contenido de sílice esté solo un poco por encima de la inclusión más evolucionada (61.88 % SiO<sub>2</sub>), lo que podría interpretarse como que las últimas inclusiones atrapadas en olivino fueron encapsuladas poco antes de la erupción.

Por otra parte, el contenido de sílice de la roca total está en el rango ensombrecido que aparece en el mismo diagrama, encontrándose muestras desde el campo del basalto hasta la más diferenciada (57,4 % SiO<sub>2</sub>), considerada como una andesita basáltica. Su contenido de álcalis está entre 3,64 y 5 wt%, acotado por todas las inclusiones medidas. Estos resultados resultan coherentes si se considera que la roca total es el resultado de todos los fenocristales presente en el magma, y que en teoría debería ser un promedio composicional de los mismos. Por lo tanto, resulta coherente con lo señalado que estas muestras estén acotadas por las inclusiones más primitivas y más evolucionadas.

La ausencia de inclusiones más primitivas en olivinos hace suponer que éstos han crecido en un magma relativamente diferenciado y que no se ha visto afectado por procesos de mezcla como lo sería una recarga magmática.

Los diagramas bivariantes, muestran que la cristalización fraccionada de minerales es el evento predominante dentro del sistema. Esto es concordante con lo planteado por Bouvet de Maisonneuve et al. (2011), que se respalda en el gran contenido de plagioclasas presentes, el gran contenido de cristales que se encuentran en estas lavas, la gran cantidad de cúmulos cristalinos

De acuerdo a la información de las inclusiones graficadas en los diagramas Harker, el contenido de MgO disminuye continuamente debido a la cristalización y fraccionamiento de Mg en fases ricas en este elemento, ellas son el olivino forsterítico y la posterior cristalización de piroxenos (enstatita, pigeonita y augita).

Del mismo modo, el fraccionamiento del calcio en plagioclasas y posteriormente en augita y pigeonita, lleva en primer lugar a un aumento en la concentración de éste en el fundido mientras cristaliza el olivino, que sería un poco antes a la aparición de la plagioclasa, y luego

a un empobrecimiento de este elemento cuando comienzan a cristalizar la plagioclasa y posteriormente los piroxenos.

En cuanto al FeO este sufre un progresivo empobrecimiento dentro del fundido por el fraccionamiento de este óxido en el olivino, luego en las fases de piroxenos y óxidos de Fe, como lo son las cromitas y titanomagnetitas.

El  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sufre un enriquecimiento dentro del fundido por la cristalización de olivinos en primera instancia, lo que confirma que la aparición de las plagioclasas ricas en Anortita es posterior al olivino, luego se ve un empobrecimiento de este óxido debido a la aparición de las plagioclasas.

Respecto al contenido de álcalis en el fundido, estos tienen un progresivo enriquecimiento mientras cristalizan las fases minerales más primitivas. La información aportada por las inclusiones no muestra la disminución en el contenido de  $\text{Na}_2\text{O}$ , pero la zonación de las plagioclasas, donde existe un continuo pero lento aumento desde el núcleo hacia los bordes de este óxido, y por la composición misma del borde (mucho más rico en albita que en el núcleo), sugiere que existiría una disminución del Na en el fundido en las etapas más diferenciadas del fundido, que no estaría registrado en las inclusiones vítreas analizadas.

El contenido de  $\text{SiO}_2$  en el magma, mostrado en el diagrama de Fenner ( $\text{SiO}_2$  vs  $\text{MgO}$ ), también daría cuenta de la cristalización fraccionada, dado que como se esperaría este aumentaría progresivamente a medida que cristalizan las fases minerales más máficas.

En el diagrama spider de multi elementos normalizado al manto primitivo (figura 4.14), se observa un enriquecimiento general de los elementos incompatibles con el manto en las inclusiones vítreas, esto indicaría que la fuente magmática tiene signature mantélica, por lo que su origen estaría dado por magmas que nacen producto de la fusión parcial del manto.

Además, el enriquecimiento en elementos HFS (Th, U, Pb, Zr, Hf, Ti, Nb y Ta) y LILE (Cs, Rb, K y Ba, Sr y Eu), indican influencia cortical, por lo que se trataría de un magma en ambientes de subducción con contaminación cortical. Además, como planteado por Xiao et al. (2016), el enriquecimiento en Rb, Ba, Sr, Pb, U, Cs y K es característico e indicativo de contaminación cortical, producto de la deshidratación de la corteza oceánica.

En el diagrama spider de inclusiones vítreas hospedadas en olivino normalizadas a la roca total (figura 4.15), es posible apreciar un empobrecimiento en Rb y Ba, que sería indicativo con la presencia de granate en la fuente, siendo estos de derivación muy profunda, en la cuña mantélica. Además, el enriquecimiento de las inclusiones en Hf podría deberse también a la presencia de granate en la fuente del magma, por lo que la fuente podría corresponder a una lherzolita con granate. El empobrecimiento en las inclusiones de Sr, Rb y Ba, resulta coherente considerando que este elemento se fracciona fuertemente dentro de la plagioclasa, dejando

las inclusiones empobrecidas e indicando que el atrapamiento de las inclusiones ocurrió durante la cristalización de las plagioclasas.

Resulta interesante comparar los datos de roca total, recopilados por Reubi et al. (2011) y el manto primitivo de Sun y McDonough (1989). El diagrama spider para este caso se muestra en la figura 5.13. El alto contenido de Pb es indicativo de subducción de sedimentos en el margen de subducción. Se observa un enriquecimiento relativo de elementos LILE respecto de los HFSE, que es una signature característica de arcos (McCulloch y Gamble, 1991). El enriquecimiento en LILE y tierras raras livianas como La y Ce, provendría desde el slab en subducción, debido a su alta movilidad en la fase fluida liberada por la deshidratación de la placa oceánica.

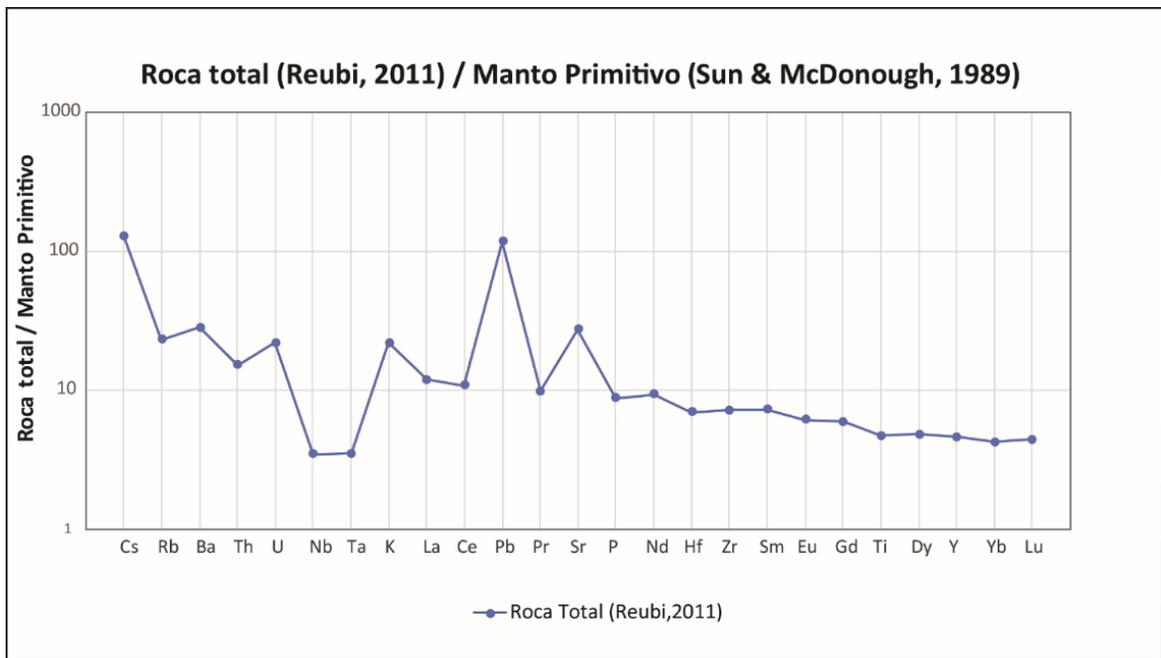


Figura 5.1: Diagrama Spider de multielementos para la roca total (Reubi et al. 2011) normalizado al manto primitivo (Sun y McDonough, 1989)

## **5.4. VOLÁTILES**

Los gráficos referentes a los volátiles presentados en la sección de resultados (figuras 4.27 y 4.28) muestran la variación de éstos en las inclusiones vítreas. A pesar de no ser el método más adecuado ni preciso, el resultado de este análisis es bastante claro para poder afirmar que, durante el atrapamiento de las inclusiones durante el crecimiento del olivino, el magma está en constante proceso de desgasificación.

La continua desgasificación podría asociarse a la sobresaturación de volátiles en el magma y su posterior exsolución, debido a la alta cristalización de fenocristales en un proceso de cristalización fraccionada. Además, Shinohara (2008) propone que la desgasificación de este tipo de volcanes está dada por los movimientos ascendentes de porciones de fundido más ricos en volátiles y el descenso de las porciones más pobres, dentro del sistema cámara magmática- chimenea, sin necesidad de haber una erupción, produciéndose la exsolución de volátiles cuando las porciones de fundido ascendente llegan cerca de la superficie, aumentando su densidad y volviendo a bajar hacia la cámara magmática.

## **5.5. MECANISMO DE ASCENSO**

El volcán Llaima está ubicado 9 km al oeste de la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui, sistema de rumbo N-S, y paralelo al arco magmático (Cembrano et al. 2000). Los estratovolcanes Llaima y Lonquimay están asociados con grietas de tensión de rumbo NE, mientras que los centros eruptivos primitivos están ubicados en el rumbo NNE del ZFLO (Cembrano y Lara, 2009).

Por lo tanto, y a pesar de no contar con mayor evidencia sobre las estructuras internas del volcán Llaima, se sugiere que el ascenso magmático se daría a través de estructuras internas, como las grietas de tensión planteadas por Cembrano y Lara (2009), que internamente pueden ser interpretados como grandes y profundos diques en la corteza, asociados a los brazos de la Zona de Falla de Liquiñe-Ofqui.

## 5.6. MODELO PETROGENÉTICO

De acuerdo con lo planteado en las secciones anteriores de la discusión, en esta sección se propone un modelo petrogenético y evolutivo para el magma que originó los productos volcánicos de la erupción de 1957 del volcán Llaima.

Las inclusiones vítreas hospedadas en olivino dan cuenta de que el magma a partir del cual esta fase habría cristalizado corresponde composicionalmente a uno de tipo andesítico-basáltico a andesítico (55,75% wt. SiO<sub>2</sub>, en promedio). La signatura de elementos trazas para el vidrio de las inclusiones, sugiere que el origen de este magma estaría dado por la fusión parcial del manto astenosférico, y, por lo tanto, habría evolucionado hasta las composiciones registradas en las inclusiones, principalmente por cristalización fraccionada de plagioclasa rica en anortita, olivino Fo<sub>77</sub>Fa<sub>23</sub>, piroxenos (enstatita, pigeonita y augita) y óxidos de Fe-Ti y Fe-Cr (Cromita y titanomagnetita).

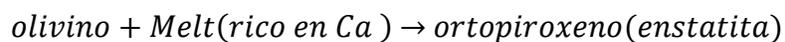
Ruth et al. (2008) y Bouvet de Maisonneuve et al. (2011, 2012)) proponen la existencia de una cámara magmática muy superficial, aproximadamente a 4 km. En ella ocurriría un proceso de cristalización fraccionada dominado en primera instancia por la aparición del olivino y, al poco tiempo, de la plagioclasa. Así, el geotermómetro aplicado indica que cristalización del olivino con vidrio o inclusiones vítreas se da entre 1079.4 y 1119.4 °C, con una media de 1099.4 °C. El atrapamiento de cromitas dentro de fenocristales de olivino permite afirmar que este óxido de Fe-Cr habría cristalizado contemporáneamente con el olivino, cuando el magma recién comenzaba a diferenciarse.

Un aumento de la temperatura del magma y los cambios composicionales del líquido que lo rodea, el movimiento del fundido dentro de la cámara magmática por convección que puede inducir variaciones composicionales en el mismo, y, el desplazamiento de los cristales debido a la convección y buoyancia habrían generado las condiciones para la reabsorción de los bordes en el olivino.

La formación de las plagioclasas ricas en anortita (núcleos bytowníticos), sería un poco posterior a la aparición del olivino, aunque la presencia de estas fases en paragénesis sugiere que el olivino habría seguido cristalizando una vez que aparece la plagioclasa. Se puede plantear que las plagioclasas siguen cristalizando a medida que el fundido se diferencia. El aumento de la sílice en el líquido y la posterior cristalización de piroxenos (que incluyen Ca en su estructura), disminuiría la disponibilidad de Ca para la plagioclasa, comenzando a cristalizar bordes más albiticos, que se verían aún más marcados a medida que el magma sigue evolucionando durante el proceso de ascenso final previo a la erupción. El empobrecimiento de elementos traza como Sr y Ba en las inclusiones reflejaría su atrapamiento durante la cristalización de la plagioclasa. La aparición de microlitos de plagioclasa de similar composición a los bordes en estas últimas, esto es labradorita, sugieren que estos se han formado en tiempos similares a los bordes encontrados, lo que confirmaría la hipótesis de que el borde fue formado durante el ascenso final, previo a la erupción, junto a los microlitos de la matriz.

Las evidencias texturales en la plagioclasa indican que las texturas de sieve encontradas en los núcleos de bytownita, sería producto del ascenso final y descompresión del magma, anterior a la cristalización del borde de labradorita.

El origen de la enstatita presente en microlitos y como un único fenocristal encontrado, estaría dado por el desequilibrio del olivino en la cámara magmática, y por el fraccionamiento en equilibrio de esta fase de piroxeno a medida que el magma evoluciona en este lugar. El desequilibrio de olivino a enstatita supone una saturación del magma en elementos compatibles con esta última fase, que estaría dado por el grado de evolución magmática dentro de la cámara. El magma dentro de la cámara después de haberse diferenciado sería más rico en sílice, y el fraccionamiento previo del olivino forsterítico, incrementarían las concentraciones de Ca y Fe en el líquido. Así, el desequilibrio de olivino a enstatita, en términos simples, está dado por la siguiente reacción:



Los perfiles composicionales anteriormente expuestos, van en línea con lo expuesto en el párrafo anterior, ya que dan cuenta de una disminución del porcentaje de forsterita en los bordes, coherente con la diferenciación magmática planteada.

El desequilibrio de microlitos de olivino (Fo<sub>57</sub>Fa<sub>43</sub>) a pigeonita, da cuenta que esta fase mineral sería más tardía respecto a los otros piroxenos encontrados, debido principalmente a que el olivino, más fayalítico que en los fenocristales, habría sido originado cuando el magma alcanzó una evolución mayor a la que tuvo en la cámara. La saturación en Ca y Fe, genera las condiciones necesarias para la formación de pigeonita. Además, éste es un mineral que ocurre cuando un magma se enfría rápidamente, por lo que la presencia de esta fase como microlitos en la matriz sería coherente con el tipo de depósito estudiado y se habría dado durante el ascenso final hacia la superficie, que implica una disminución de la temperatura del sistema, o bien, en el flujo de lava mismo.

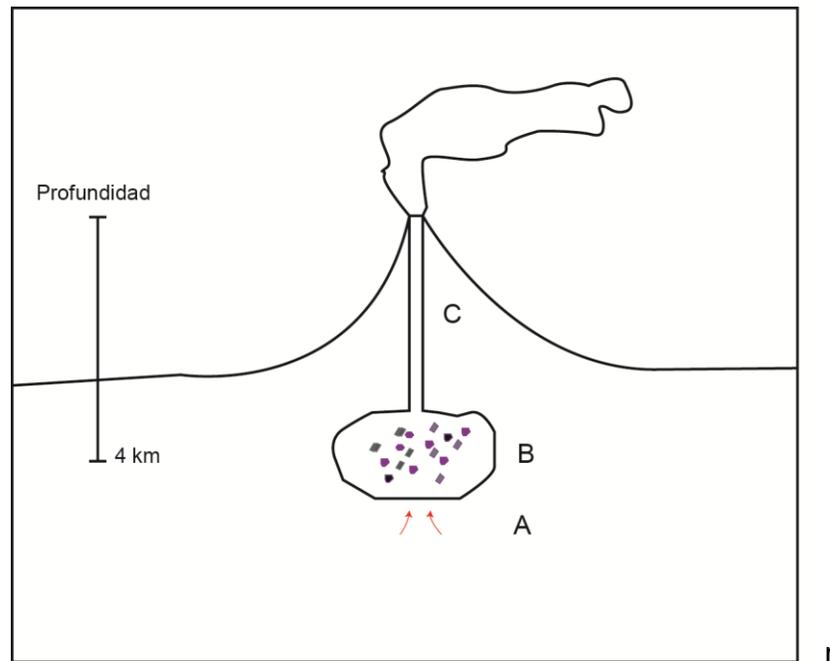
La presencia de microlitos de augita en la matriz, es indicativo de que esta fase habría aparecido durante el enfriamiento del fundido en su ascenso o cuando ya fluía como lava en superficie.

También en una última etapa, habría ocurrido la cristalización de pequeños microlitos de óxidos de Fe-Ti, principalmente titanomagnetita, producto de la saturación del magma en Fe. El pequeño tamaño de los microlitos de óxidos de Fe-Ti, incluso diseminados en gran cantidad dentro del vidrio residual, hace suponer que su aparición sería uno de los últimos eventos durante el ascenso magmático.

La continua desgasificación, retratada en las inclusiones en olivino, hace suponer que la cristalización fraccionada habría saturado el fundido en volátiles debido a la cristalización de las fases minerales anhidras anteriormente descritas. Esta desgasificación podría verse beneficiada con la existencia estructuras, vistas como diques, que facilitarían el ascenso de

los volátiles exsueños por el magma hacia la superficie. Las observaciones en el volcán Llaima dan cuenta de una continua desgasificación de su sistema magmático, evidenciada en las fumarolas y salida de volátiles continuamente desde su interior.

El ascenso del magma desde esta cámara magmática se daría a través de diques asociados a la geología estructural de la zona, marcada por el ZFLO.



*Figura 5.2: Esquema del modelo petrogenético. (A) da cuenta del ascenso de magmas producto de la fusión parcial del manto y que se estacionan en una cámara magmática bajo el volcán Llaima a 4 km de profundidad. (B) representa el interior de la cámara y los procesos que ocurren dentro de ella: Cristalización fraccionada de olivino, plagioclasa y cromita, seguido de enstatita. (C) representa el ascenso magmático previo a la erupción, donde se la plagioclasa se desequilibra y se refunde (sieves), se crea el borde de labradorita en ellas y cristalizan microlitos de plagioclasa, olivino, augita, pigeonita y titanomagnetita.*

## CAPITULO 6. CONCLUSIONES

Petrográficamente, el depósito volcánico estudiado, corresponde macroscópicamente a una andesita basáltica de plagioclasas y olivino.

A partir del estudio de la química mineral de la lava eruptada en el volcán Llaima el año 1957, se determina que el olivino corresponde, en promedio, a uno de  $F_{077}$ - $F_{a23}$ ; la plagioclasa es de composición bytownítica en los núcleos y labradorítica en los bordes. Los piroxenos corresponden a augita, pigeonita y enstatita. Los óxidos de Fe-Ti, corresponden a cromitas y titano-magnetitas.

Los análisis en inclusiones vítreas hospedadas en olivino, determinó un magma de composición entre andesita-basáltica y andesita, con un promedio de 55,75 wt %  $SiO_2$  (entre 52,7-61.08 wt %  $SiO_2$ ), con un contenido promedio de  $K_2O$  de 0,88 wt % (entre 0,47 y 1,29 wt %).

Las condiciones de cristalización del magma que originó esta erupción, según los geotermobarómetros utilizados, indican temperatura promedio para la cristalización del olivino de  $1099 \pm 20$  °C

El modelo de evolución petrogenético propuesto en este estudio considera que: i) La fuente magmática original estaría dada por magmas que ascienden desde el manto, dada la signatura de elementos trazas presentes, que se estacionan en una cámara magmática a 4 km de profundidad; ii) La evolución y diferenciación del magma, registrado en las inclusiones vítreas en olivino, está dado por un proceso de cristalización fraccionada, donde en primer lugar cristalizan las fases de olivino y plagioclasa, y posteriormente enstatita; (iii) El ascenso magmático previo a la erupción, y el flujo de lava durante la erupción misma, genera las texturas de sieve en la plagioclasa y la cristalización del borde de labradorita. En esta última etapa se da la cristalización de óxidos de Fe-Ti, microlitos de plagioclasa, augita y pigeonita. El ascenso magmático estaría facilitado por estructuras como diques, asociados a la presencia de la Zona de Falla de Liquiñe-Ofqui.

El contenido de sílice de las inclusiones vítreas en olivino más diferenciadas, un poco menor que el encontrado dentro del vidrio residual, sugiere que el atrapamiento de estas fue poco antes de la erupción misma.

El recálculo de la composición de las inclusiones mediante el software Petrolog está dentro de lo esperado, ya que el contenido de MgO y FeO aumenta dentro de ellas. Además, los óxidos recalculados más abundantes en el sistema melt-olivino, siguen tendencias más claras respecto a los medidos con la microsonda electrónica. Esta herramienta, por lo tanto, se considera de gran utilidad en este tipo de estudios, ya que permite disminuir las incertezas inherentes a un sistema que no es perfectamente cerrado.

Se sugiere seguir profundizando en el estudio de inclusiones vítreas para estos depósitos, ya que, por ejemplo, las inclusiones vítreas en plagioclasas no han sido analizadas. Estas entregarían información relevante para tener una mejor perspectiva del sistema magmático bajo el volcán Llaima.

## CAPITULO 7. BIBLIOGRAFÍA

BAS, M. L., Maitre, R. L., Streckeisen, A., Zanettin, B., & IUGS Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. (1986). A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of petrology*, 27(3), 745-750.

Beattie, P. (1993). Olivine-melt and orthopyroxene-melt equilibria. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 115(1), 103-111.

Blundy, J., & Cashman, K. (2001). Ascent-driven crystallisation of dacite magmas at Mount St Helens, 1980–1986. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 140(6), 631-650.

Bouvet de Maisonneuve, C, M. A., Bachmann, O., & Burgisser, A. (2011). Insights into shallow magma storage and crystallization at Volcán Llaima (Andean Southern Volcanic Zone, Chile). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 211, 76-91.

Bouvet de Maisonneuve, C., Dungan, M. A., Bachmann, O., & Burgisser, A. (2012). Petrological insights into shifts in eruptive styles at Volcán Llaima (Chile). *Journal of Petrology*, 54(2), 393-420.

Cannatelli, C., Doherty, A. L., Esposito, R., Lima, A., & De Vivo, B. (2016). Understanding a volcano through a droplet: A melt inclusion approach. *Journal of Geochemical Exploration*, 171, 4-19.

Cembrano, J., Schermer, E., Lavenu, A., & Sanhueza, A. (2000). Contrasting nature of deformation along an intra-arc shear zone, the Liquiñe–Ofqui fault zone, southern Chilean Andes. *Tectonophysics*, 319(2), 129-149.

Charrier, R., Pinto, L., & Rodríguez, M. P. (2007). Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. In *The geology of Chile*.

Chen, Y., & Zhang, Y. (2008). Olivine dissolution in basaltic melt. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(19), 4756-4777.

Danyushevsky, L. V., McNeill, A. W., & Sobolev, A. V. (2002). Experimental and petrological studies of melt inclusions in phenocrysts from mantle-derived magmas: an overview of techniques, advantages and complications. *Chemical Geology*, 183(1-4), 5-24.

Donaldson, C. H. (1985). The rates of dissolution of olivine, plagioclase, and quartz in a basalt melt. *Mineralogical Magazine*, 49(354), 683-693

Hervé, M. (1976). Estudio geológico de la falla Liquiñe-Reloncaví en el área de Liquiñe: Antecedentes de un movimiento transcurrente (Provincia de Valdivia). In *Congreso Geológico Chileno No. 1*, Actas. Vol. 1, p B39-B56, Santiago.

Hervé, F., Araya, E., Fuenzalida, J. L., & Solano, A. (1979, August). Edades radiométricas y tectónica neógena en el sector costero de Chiloé continental, X Región. In *Congreso Geológico Chileno* (No. 2, pp. F1-F18).

Hervé, M. (1984). La zona de falla Liquiñe-Ofqui en Liquiñe. *Comunicaciones*, vol. 34, p. 101-105.

Jochum, K. P., Weis, U., Stoll, B., Kuzmin, D., Yang, Q., Raczek, I., ... & Günther, D. (2011). Determination of reference values for NIST SRM 610–617 glasses following ISO guidelines. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 35(4), 397-429.

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.

McCulloch, M. T., & Gamble, J. A. (1991). Geochemical and geodynamical constraints on subduction zone magmatism. *Earth and Planetary Science Letters*, 102(3-4), 358-374.

Moreno, T., & Gibbons, W. (Eds.). (2007). The geology of Chile. Geological Society of London

Morimoto, N. (1988). Nomenclature of pyroxenes. *Mineralogy and Petrology*, 39(1), 55-76.

Naranjo, J. A., & Moreno, H. (1991). Actividad explosiva postglacial en el Volcán Llaima, Andes del Sur (38 45'S). *Andean Geology*, 18(1), 69-80.

Naranjo, J. A., & Moreno, H. (2005). Geología del Volcán Llaima, Región de La Araucanía, Escala: 1: 50.000.

Navarrete, P. (2017). *Volcán Llaima: Antecedentes, Amenaza volcánica y evaluación de la gestión de riesgo*.

Nelson, S., & Montana, N. (1992). Sieve-textured plagioclase in volcanic rocks produced by rapid decompression. *American Mineralogist*, 77, 1242-1249

Paton, C., Hellstrom, J., Paul, B., Woodhead, J., & Hergt, J. (2011). Iolite: Freeware for the visualisation and processing of mass spectrometric data. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 26(12), 2508-2518.

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.

Petrelli, M., Poli, G., Perugini, D., & Peccerillo, A. (2005). PetroGraph: A new software to visualize, model, and present geochemical data in igneous petrology. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 6(7).

Putirka, K. D., Perfit, M., Ryerson, F. J., & Jackson, M. G. (2007). Ambient and excess mantle temperatures, olivine thermometry, and active vs. passive upwelling. *Chemical Geology*, 241(3-4), 177-206.

Putirka, K. D. (2008). Thermometers and barometers for volcanic systems. *Reviews in mineralogy and geochemistry*, 69(1), 61-120.

Reubi, O., Bourdon, B., Dungan, M. A., Koornneef, J. M., Selles, D., Langmuir, C. H., & Aciego, S. (2011). Assimilation of the plutonic roots of the Andean arc controls variations in U-series disequilibria at Volcan Llaima, Chile. *Earth and Planetary Science Letters*, 303(1), 37-47.

Rhodes, J. M., Dungan, M. A., Blanchard, D. P., & Long, P. E. (1979). Magma mixing at mid-ocean ridges: evidence from basalts drilled near 22° N on the Mid-Atlantic Ridge. *Tectonophysics*, 55(1-2), 35-61.

Rollinson H.R., (1993), *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*. Longman, UK.

Rosenau, M., Melnick, D., & Echtler, H. (2006). Kinematic constraints on intra-arc shear and strain partitioning in the southern Andes between 38° S and 42° S latitude. *Tectonics*, 25(4).

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

Sack, R. O., & Ghiorso, M. S. (1991). Chromian spinels as petrogenetic indicators; thermodynamics and petrological applications. *American Mineralogist*, 76(5-6), 827-847.

Shinohara, H. (2008). Excess degassing from volcanoes and its role on eruptive and intrusive activity. *Reviews of Geophysics*, 46(4).

Streck, M. J. (2008). Mineral textures and zoning as evidence for open system processes. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 69(1), 595-622.

Suárez, M., & Emparan, C. (1997). *Hoja Curacautin: Regiones de la Araucanía y del Biobío*. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile. No. 71. 105p., escala 1:250.000.

Sugawara, T. (2000). Empirical relationships between temperature, pressure, and MgO content in olivine and pyroxene saturated liquid. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B4), 8457-8472.

Sun, S. S., & McDonough, W. S. (1989). Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1), 313-345.

Tsuchiyama, A. (1986). Experimental study of olivine-melt reaction and its petrological implications. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 29(1-4), 245-264.

Vance, J. A. (1965). Zoning in igneous plagioclase: patchy zoning. *The Journal of Geology*, 73(4), 636-651.

Watson, E. B. (1982). Basalt contamination by continental crust: some experiments and models. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80(1), 73-87.

Xiao, Y., Niu, Y., Wang, K. L., Lee, D. C., & Iizuka, Y. (2016). Geochemical behaviours of chemical elements during subduction-zone metamorphism and geodynamic significance. *International Geology Review*, 58(10), 1253-1277.

## CAPITULO 8. ANEXOS

### 8.1. ANEXO A: IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE INCLUSIONES VÍTREAS EN CORTES TRANSPARENTES NV10 Y NV11

#### 8.1.1. CORTE TRANSPARENTE NV10: OLIVINOS

##### 8.1.1.1 Cristal NV10-oliA:

Corresponde a un cristal de olivino, con buena integridad y estructuralidad. Tiene un tamaño de 271  $\mu\text{m}$  por 191  $\mu\text{m}$ . Posee textura coronítica con bordes de reacción de augita.

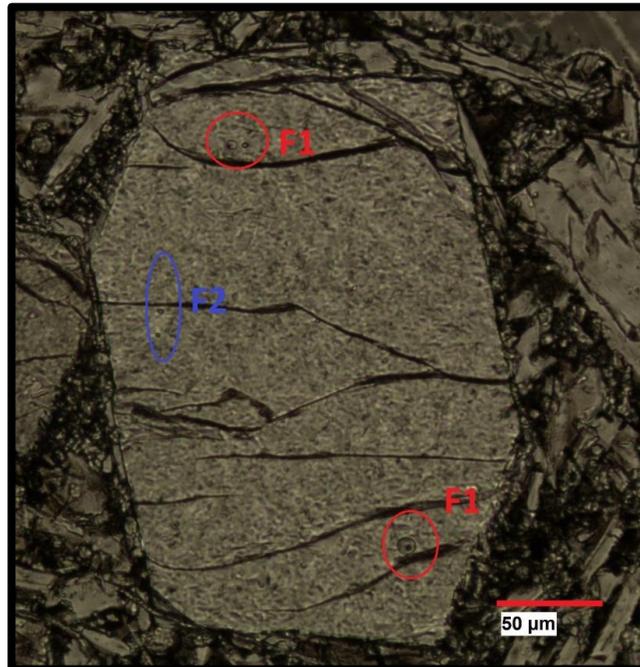


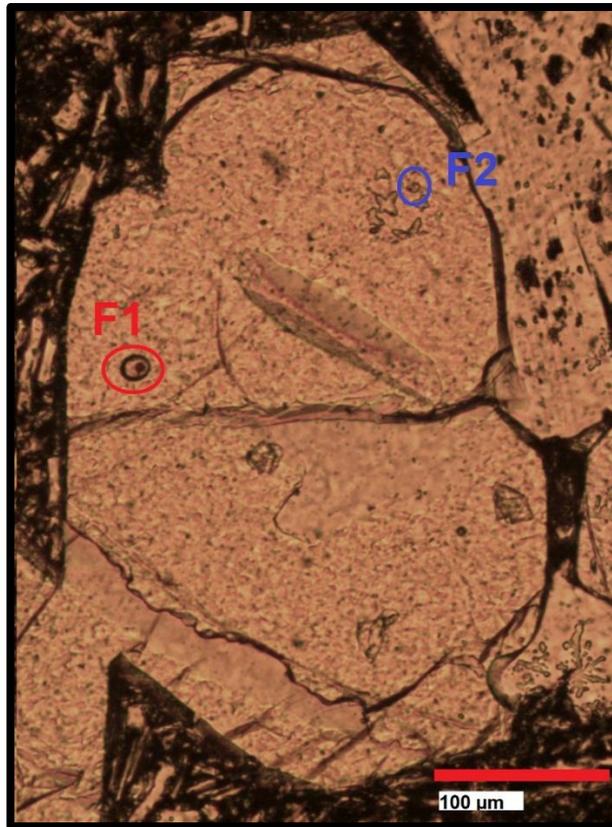
Figura 8.1: Cristal NV10-oliA visto a nícoles paralelos

F1: Inclusiones vítreas homogéneas con burbuja, con un diámetro de 5  $\mu\text{m}$  para las de abajo y 12  $\mu\text{m}$  para la F1 de arriba en la imagen. La burbuja ocupa aproximadamente un 15 % de cada inclusión.

F2: Inclusiones vítreas homogéneas con burbuja, con un diámetro de 3  $\mu\text{m}$ . La burbuja ocupa aproximadamente un 20% de cada inclusión.

### 8.1.1.2 Cristal NV10-oliB

Corresponde a un cristal de olivino, de buena estructuralidad y regular integridad. Tiene un tamaño de 424  $\mu\text{m}$  por 271  $\mu\text{m}$ . Está dentro de un cúmulo de cristales de olivino y plagioclasa.



*Figura 8.2: Cristal NV10-oliB visto a nícoles paralelos*

F1: Inclusión vítrea homogénea con burbuja, con un diámetro de 15  $\mu\text{m}$ . La burbuja ocupa aproximadamente un 15 % de la inclusión.

F2: Inclusiones vítrea homogénea sin burbuja, con un diámetro de 4  $\mu\text{m}$ .

### 8.1.1.3 Cristal NV10-oliC

Corresponde a un cristal de olivino, de 256  $\mu\text{m}$  por 197  $\mu\text{m}$  aprox., posee mala estructuralidad y buena integridad. En él se observa una MIA de inclusiones vítreas sin burbuja de entre 10  $\mu\text{m}$  y 20  $\mu\text{m}$ .

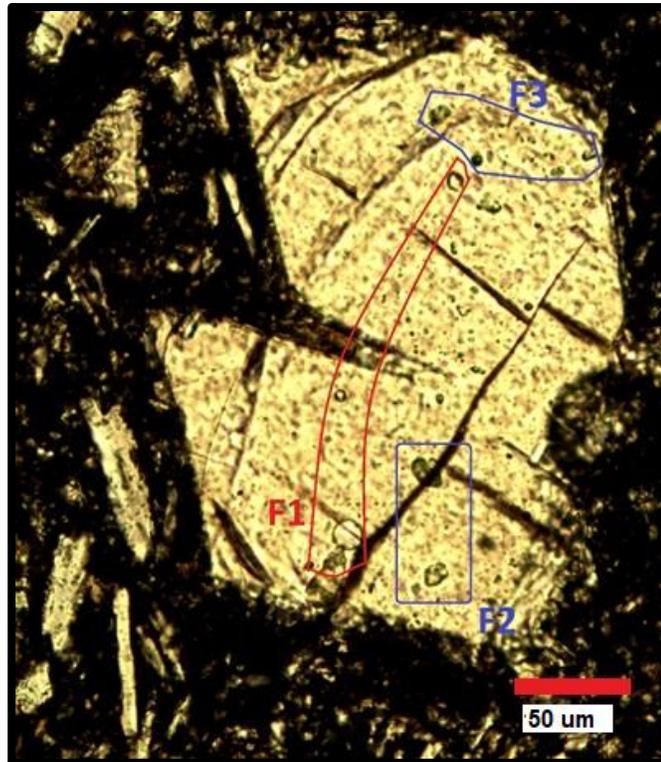


Figura 8.3: Cristal NV10-oliC visto a nícoles paralelos.

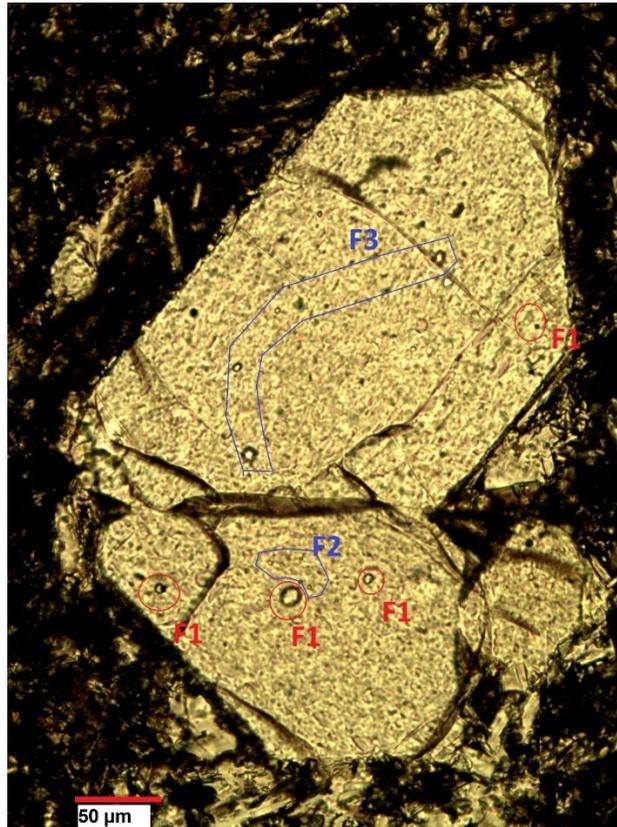
F1: Inclusiones vítreas sin burbuja, esféricas, de entre 10  $\mu\text{m}$  y 20  $\mu\text{m}$ , donde la más grande (parte inferior) se encuentra expuesta en superficie y fue analizada.

F2: Inclusiones vítreas recristalizadas, de 20  $\mu\text{m}$  de diámetro aprox.

F3: Inclusiones vítreas recristalizadas, con un tamaño inferior a los 5  $\mu\text{m}$ .

#### 8.1.1.4 Cristal NV10-oliD

Corresponde a un cristal de olivino, de 396  $\mu\text{m}$  por 273  $\mu\text{m}$ , de mala estructuralidad y buena integridad. En este cristal se observan al menos tres familias de inclusiones descritas a continuación:



*Figura 8.4: Cristal NV10-oliD, visto a nícoles paralelos*

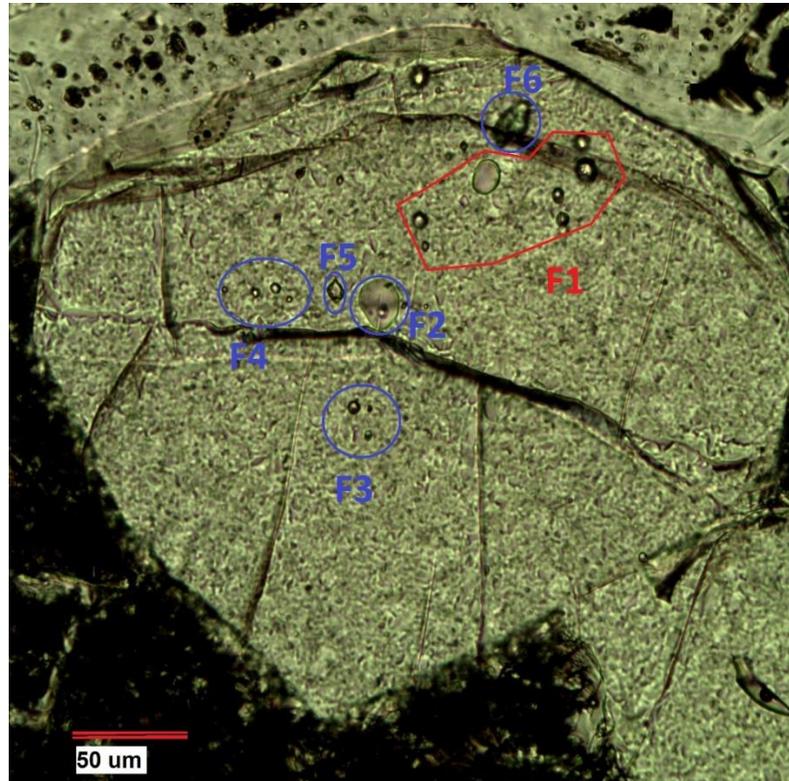
F1: Corresponden a inclusiones vítreas homogéneas con burbuja, donde éstas ocupan un 10 % de la inclusión. Su diámetro está entre los 10 y 15  $\mu\text{m}$ .

F2: Corresponde a un grupo de pequeñas inclusiones, con un tamaño menor a 3  $\mu\text{m}$ . Todas son homogéneas y no tienen burbuja.

F3: Inclusiones vítreas sin burbuja, de un tamaño entre 5 y 10  $\mu\text{m}$ .

### 8.1.1.5 Cristal NV10-oliF

Corresponde a un cristal de olivino, de 337 por 346  $\mu\text{m}$ , de mala estructuralidad y buena integridad. Se encuentra formando un cúmulo junto a plagioclasas, las que son observadas en la imagen sobre el cristal. Se observan al menos seis familias de inclusiones descritas a continuación:



*Figura 8.5: Cristal NV10-oliF, visto a nícoles paralelos.*

F1: Inclusiones vítreas homogéneas, de forma esférica y con diámetros entre 7 y 16  $\mu\text{m}$ , sin burbuja. Algunas de ellas se encuentran expuestas en superficie y han sido analizadas.

F2: Inclusión vítrea homogénea, con una burbuja que ocupa un 10 % de su volumen aprox.

F3: Inclusiones homogéneas con diámetros entre 1 y 4  $\mu\text{m}$ . Presentan una burbuja que representa aproximadamente el 20 % de cada inclusión.

F4: Inclusiones homogéneas con diámetros entre 1 y 4  $\mu\text{m}$ . No tienen burbuja.

F6: Inclusión recristalizada, de aprox. 30  $\mu\text{m}$  de diámetro.

#### 8.1.1.6 Cristal NV10-oliG

Corresponde a un cristal de olivino, de 633 por 352  $\mu\text{m}$ , de mala estructuralidad y buena integridad. Se encuentra formando un cúmulo junto a plagioclasas, las que son observadas en la imagen sobre el cristal. Mediante el uso del microscopio SEM es posible apreciar una zonación en el cristal de olivino. Se observan al menos tres familias de inclusiones descritas a continuación

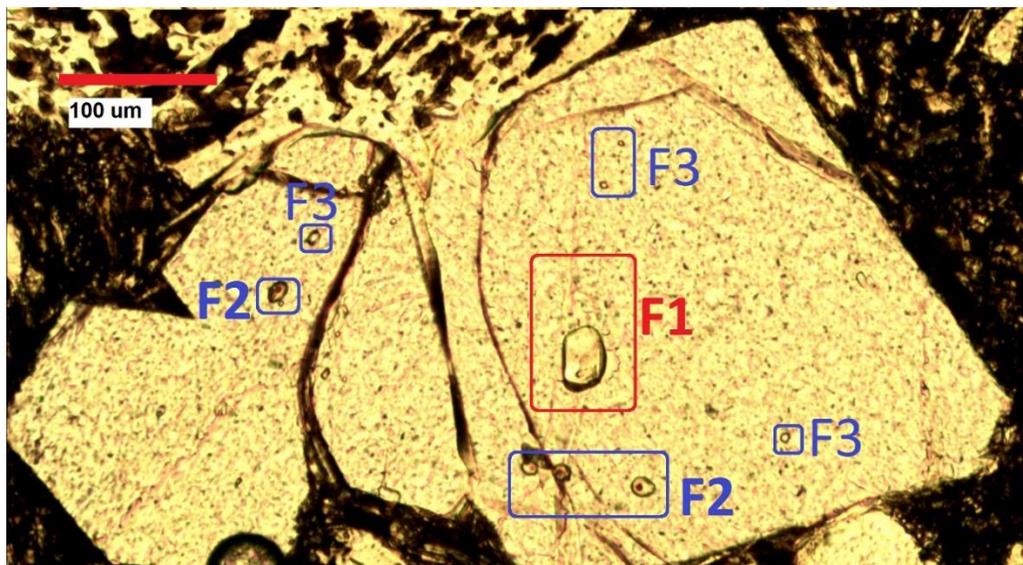


Figura 8.6: Cristal NV10-oliG, visto a nicoles paralelos.

F1: Inclusión vítrea homogénea, de forma esférica y con un diámetro de 25  $\mu\text{m}$ , sin burbuja.

F2: Inclusión vítrea homogénea, con una burbuja que ocupa un 10 % de su volumen aprox. Sus diámetros son cercanos a los 10  $\mu\text{m}$

F3: Inclusiones homogéneas con diámetros entre 1 y 4  $\mu\text{m}$ . No presentan burbuja

### 8.1.1.7 Cristal NV10-oliH

Corresponde a un cristal de olivino, de 275 por 160  $\mu\text{m}$ , de mala estructuralidad y buena integridad. Se encuentra en contacto con una plagioclasa.

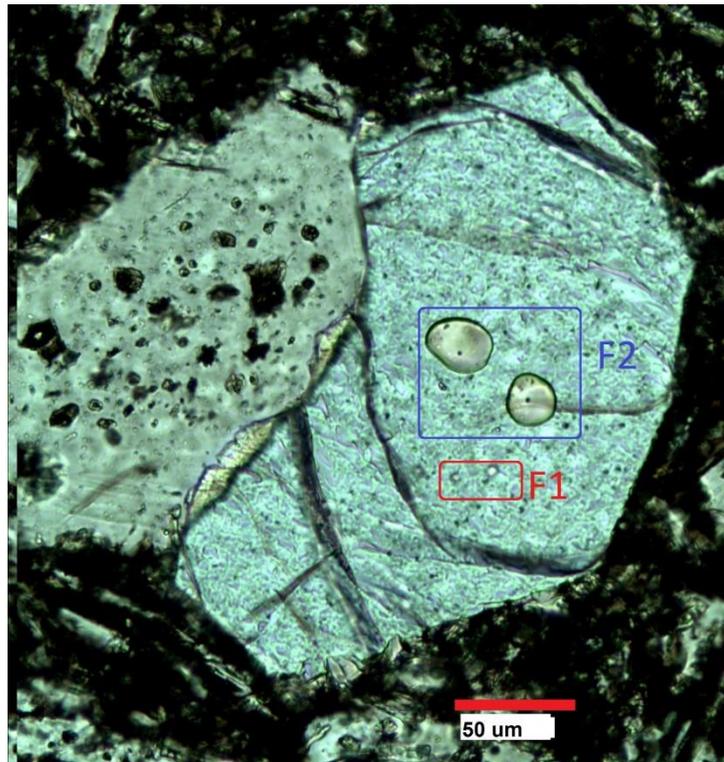


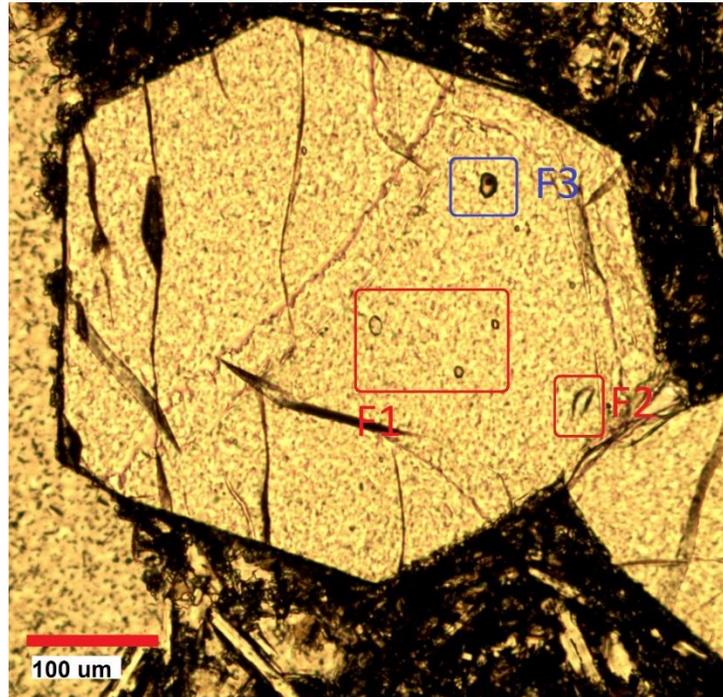
Figura 8.7: Cristal NV10-oliH, visto a nicoles paralelos.

F1: Inclusiones vítreas homogéneas con una burbuja que ocupa un 10% de la inclusión, de forma esférica y con diámetros de 5  $\mu\text{m}$ . Algunas de ellas se encuentran expuestas en superficie y han sido analizadas.

F2: Inclusiones vítreas homogéneas, con una burbuja que ocupa un 3 % de su volumen aprox. Su tamaño es de 50  $\mu\text{m}$  para los miembros de esta familia.

### 8.1.1.8 Cristal NV10-olil

Corresponde a un cristal de olivino, de 519 por 456  $\mu\text{m}$ , de excelente estructuralidad y buena integridad.



*Figura 8.8: Cristal NV10-oli-I, visto a nicoles paralelos.*

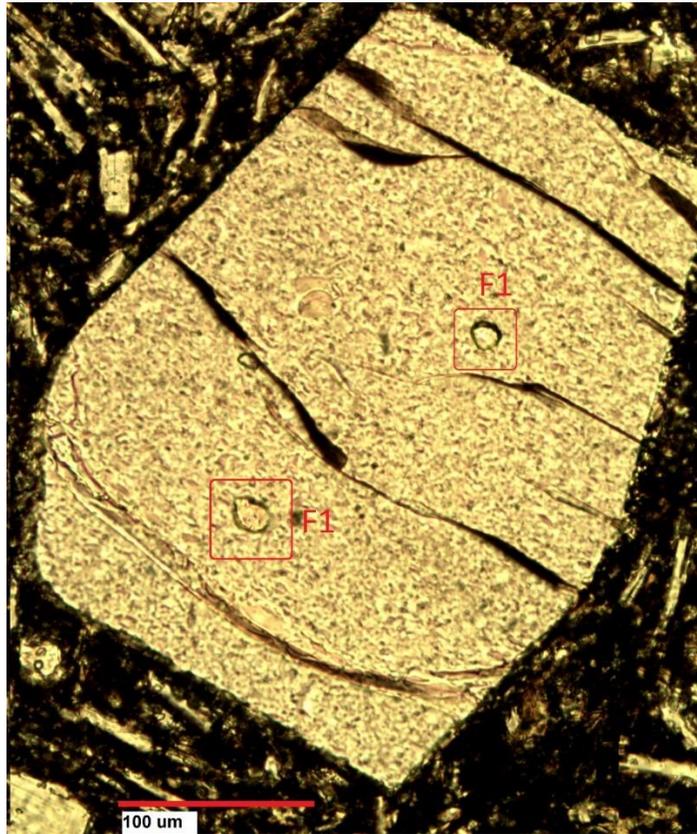
F1: Inclusiones vítreas homogéneas, de forma elipsoidal y con diámetros entre 10 y 20  $\mu\text{m}$ , sin burbuja. Algunas de ellas se encuentran expuestas en superficie y han sido analizadas.

F2: Inclusión recristalizada, de forma elipsoidal alargada, sin burbuja y con un diámetro de aproximadamente 30  $\mu\text{m}$ .

F3: Inclusión homogénea con diámetro de aproximadamente 25  $\mu\text{m}$ . Presentan una burbuja que representa aproximadamente el 30 % de la inclusión.

### 8.1.1.9 Cristal NV10-oliK

Corresponde a un cristal de olivino, de 380  $\mu\text{m}$  por 207  $\mu\text{m}$ , de buena estructuralidad e integridad.



*Figura 8.9: Cristal NV10-oliK, visto a nicoles paralelos.*

F1: Inclusiones vítreas homogéneas sin burbuja, de forma elipsoidal y con diámetros entre 10 y 20  $\mu\text{m}$ .

### 8.1.1.10 Cristal NV10-oliL

Corresponde a un cristal de olivino, de 312  $\mu\text{m}$  por 301  $\mu\text{m}$ , de regular estructuralidad e integridad.

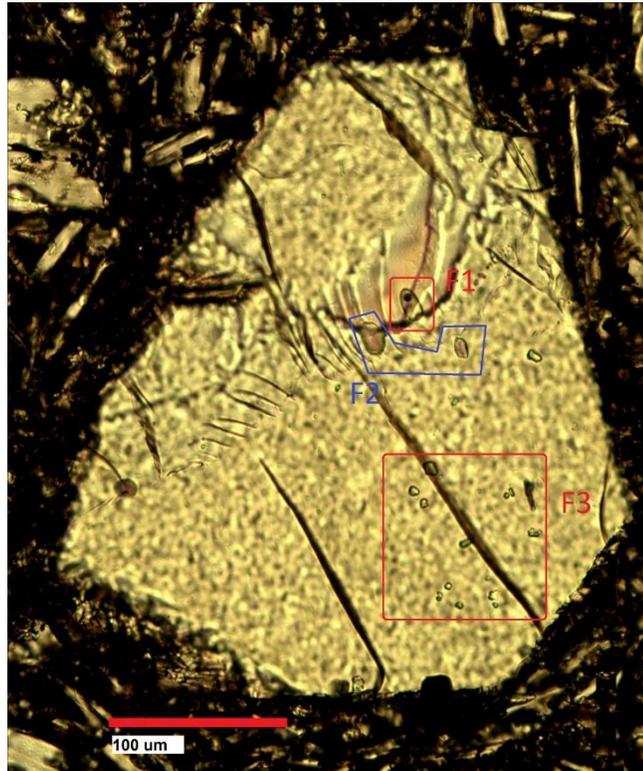


Figura 8.10: Cristal NV10-oliL, visto a nicoles paralelos.

F1: Inclusión vítrea homogénea con burbuja que ocupa un 20 % de su volumen total, de forma elipsoidal y con un diámetro de 25  $\mu\text{m}$ . Se encuentra expuesta en superficie y ha sido analizada.

F2: Inclusiones vítreas homogéneas sin burbuja, de forma elipsoidal y con un diámetro entre 15 y 25  $\mu\text{m}$ . La que se encuentra más a la izquierda está expuesta en superficie, pero no ha sido analizada ya que se encuentra cortada por una fractura en la mitad.

F3: Inclusiones vítreas homogéneas sin burbuja homogénea con diámetros entre 3 y 10  $\mu\text{m}$ , una de las cuales ha sido analizada ( $\sim 8$   $\mu\text{m}$ ) al encontrarse expuesta en superficie.

### 8.1.1.11 Cristal NV10-oliO

Corresponde a un cristal de olivino de dimensiones 449 por 370  $\mu\text{m}$ . Tiene buena estructuralidad e integridad.

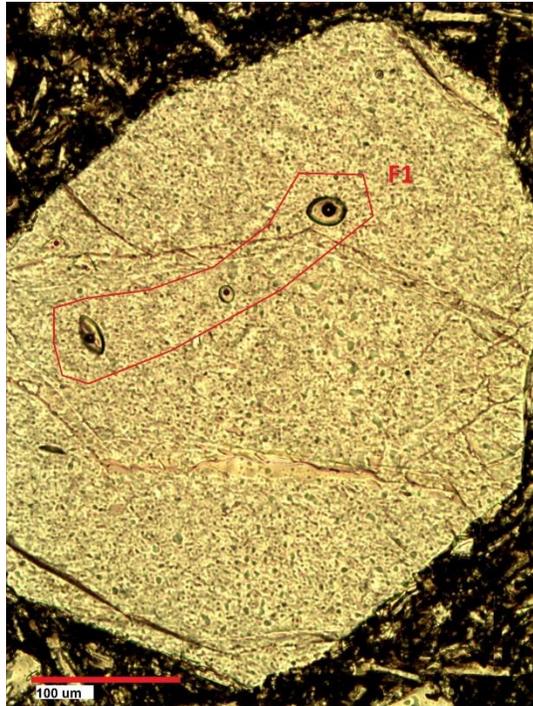
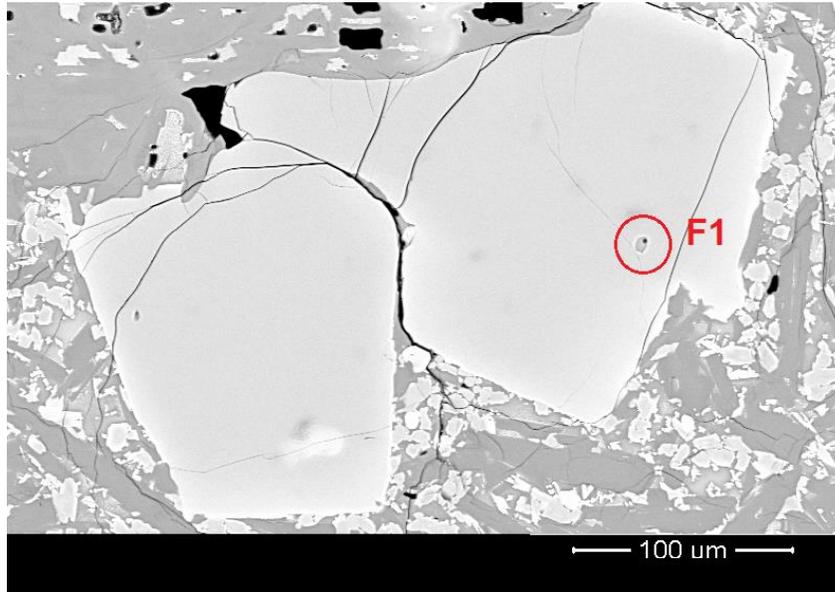


Figura 8.11: Cristal NV10-oliO, visto a nicoles paralelos.

F1: Inclusiones vítreas homogéneas con burbuja que ocupa entre un 15 y 30 % del total. Sus diámetros están entre 12 y 28  $\mu\text{m}$ . Tienen forma elipsoidal.

### 8.1.1.12 Cristal NV10-oliP

Corresponde a un cristal de olivino, de 150 por 200  $\mu\text{m}$ , de mala estructuralidad y buena integridad.



*Figura 8.12: Cristal NV10-oliP. Imagen tomada en SEM*

F1: Inclusión vítrea homogénea de 10  $\mu\text{m}$  de diámetro, con una burbuja que ocupa un 15 % de su volumen total.

### 8.1.1.13 Cristal NV10-oliQ1 y Q2

OliQ1 corresponde a un cristal de olivino dentro de un glómero de plagioclasas y olivinos, sus dimensiones son aproximadamente 357 por 341  $\mu\text{m}$ . Tiene buena integridad y mala estructuralidad. Se encuentra en contacto con un cristal de cromitas. OliQ2: Corresponde a un cristal de olivino, de 161  $\mu\text{m}$  por 95  $\mu\text{m}$ , de regular estructuralidad y buena integridad.

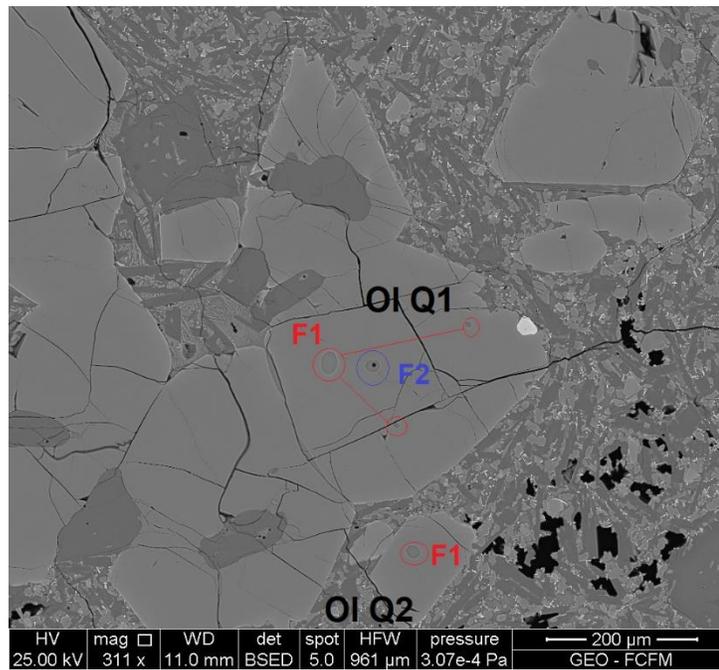


Figura 8.13: Cristales NV10-oliQ1 y NV10-oliQ2, vistos en SEM.

#### Familias de inclusiones en OliQ1

F1: Inclusiones vítreas homogéneas sin burbuja, de diámetro entre 5 y 25  $\mu\text{m}$ . Se encuentran expuestas en superficie.

F2: Inclusión Vítreas homogénea con burbuja, que ocupa un 15 % de su volumen total.

#### Familias de inclusiones en OliQ2

F1: Inclusión vítrea homogénea sin burbuja de diámetro 20  $\mu\text{m}$ .

#### 8.1.1.14 Cristal NV10-oliR

Corresponde a un cristal de olivino, de 309 por 283  $\mu\text{m}$ , de mala estructuralidad y regular integridad.

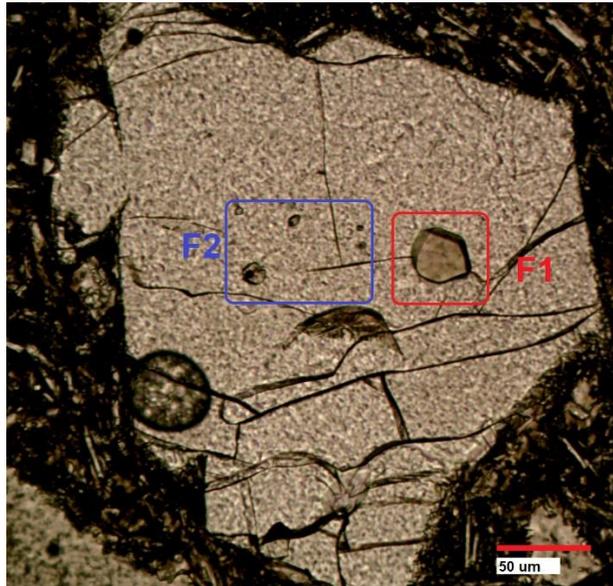


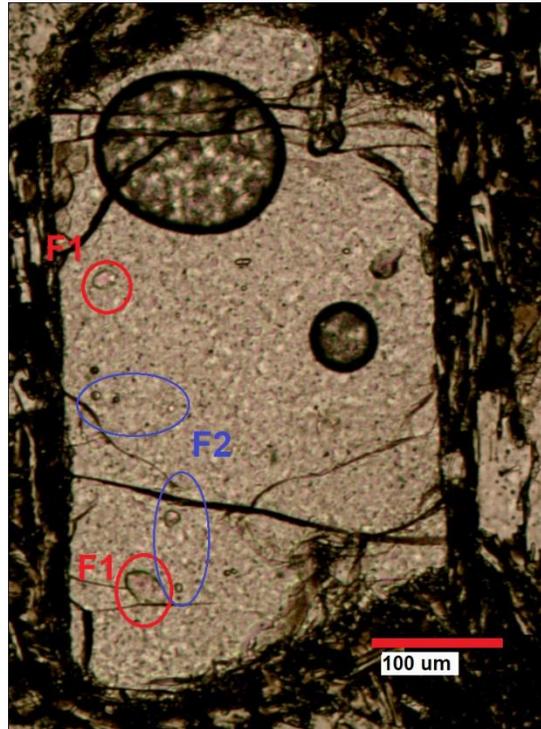
Figura 8.14: Cristal NV10-oliR, visto a nicoles paralelos.

F1: Inclusión vítrea homogénea si burbuja, con forma semi circular de diámetro 33  $\mu\text{m}$ . Expuesta en superficie y analizada en EMPA

F2: Inclusiones vítreas homogéneas con burbuja, que ocupa menos del 10% de su volumen total. Tienen diámetros entre 5 y 12  $\mu\text{m}$ . Algunas expuestas en superficie han sido analizadas en EMPA.

### 8.1.1.15 Cristal NV10-oliS

Corresponde a un cristal de olivino, de 531 por 290  $\mu\text{m}$ , de regular estructuralidad y buena integridad.



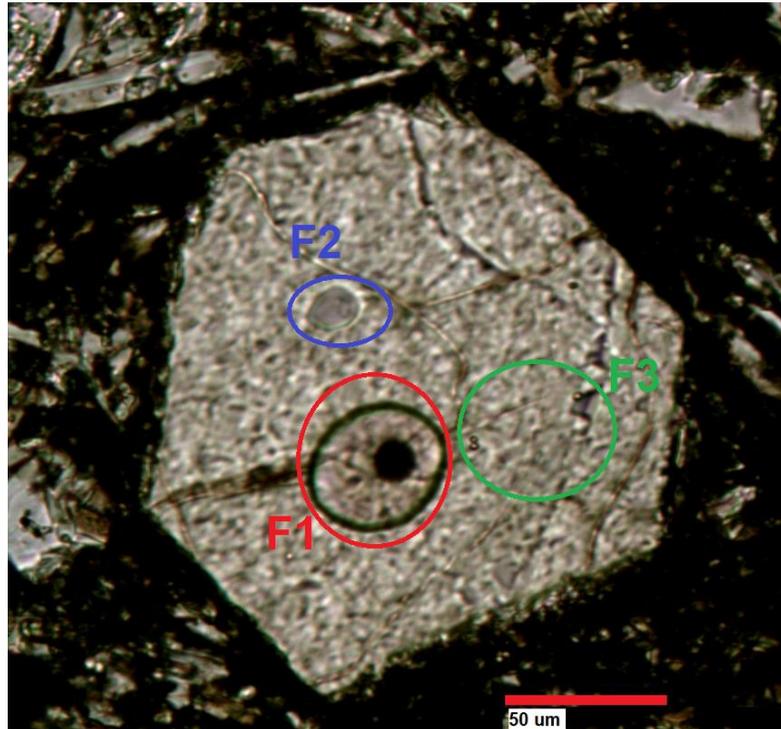
*Figura 8.15: Cristal NV10-oliS, visto a nicoles paralelos.*

F1: Inclusión es vítreas homogénea sin burbuja de forma elpsoidal y con diámetros entre 20 y 37  $\mu\text{m}$ . Expuestas en superficie y analizada en EMPA

F2: Inclusiones vítreas homogéneas con burbuja de forma circular, con diámetros entre 8 y 15  $\mu\text{m}$ . Algunas expuestas en superficie y analizadas en EMPA.

### 8.1.1.16 Cristal NV10-oliU

Corresponde a un cristal de olivino, de 160 por 174  $\mu\text{m}$ , de buena estructuralidad e integridad.



*Figura 8.16: Cristal NV10-oliU, visto a n ciles paralelos.*

F1: Inclusi3n vítreas homogénea con burbuja que ocupa un 15% aproximadamente del volumen total y su diámetro es de 40  $\mu\text{m}$ . Se encuentra expuesta en superficie y ha sido analizada.

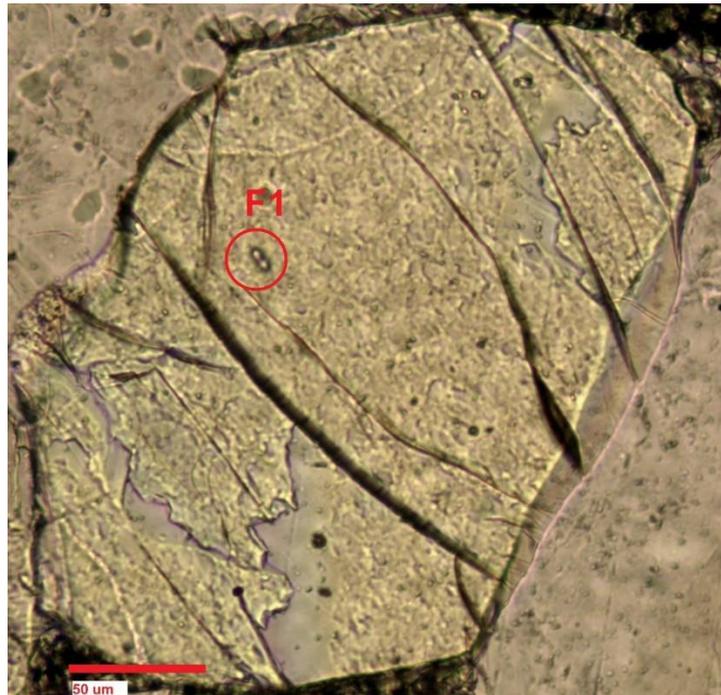
F2: Inclusi3n vítreas homogénea sin burbuja, de diámetro 15  $\mu\text{m}$ . No se encuentra en superficie

F3: Inclusi3nes vítreas homogéneas sin burbuja, de diámetro menor a 3 $\mu\text{m}$ . No se encuentran en superficie

## 8.1.2. CORTE TRANSPARENTE NV11: OLIVINOS

### 8.1.2.1 Cristal NV11-oliA-CX1

Corresponde a un cristal de olivino, de 249 por 181  $\mu\text{m}$ , de buena estructuralidad y integridad. Se encuentra formando un cúmulo junto a plagioclasas y otros cristales de olivino. Se reconoce solo una inclusión en superficie.

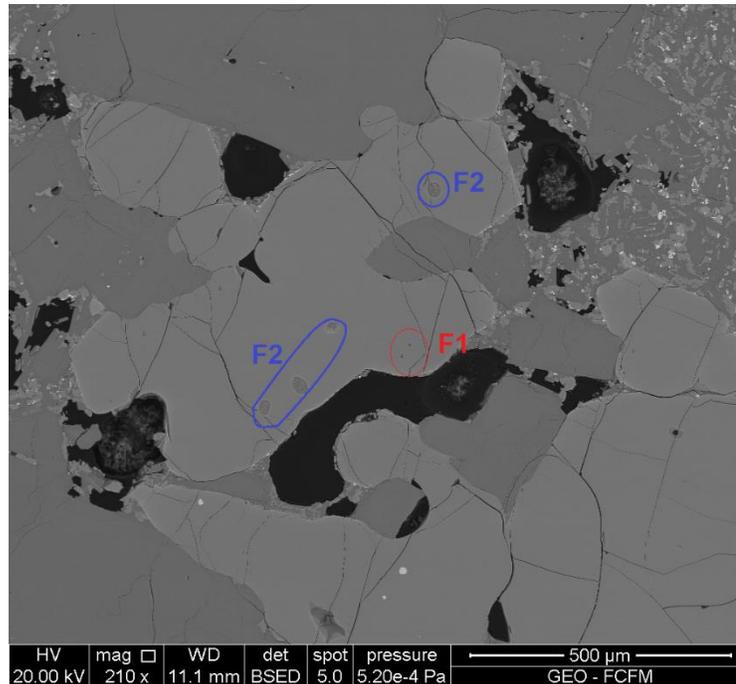


*Figura 8.17: Cristal NV11-oliA-CX1, visto a nicoles paralelos.*

F1: Inclusión vítrea homogénea con burbuja que ocupa un aproximadamente un 10 % de su volumen total, de forma elipsoidal y con un diámetro de 10  $\mu\text{m}$ . Se encuentra expuesta en superficie y ha sido analizada.

### 8.1.2.2 Cristal NV11-oliA-CX2

Corresponde a un cristal de olivino, de 928 por 442  $\mu\text{m}$ , de mala estructuralidad y buena integridad. Se encuentra formando un cúmulo junto a plagioclasas y otros cristales de olivino. Se reconocen inclusiones en superficie.



*Figura 8.18: Cristal NV11-oliA-CX2, visto en SEM*

F1: Inclusiones vítrea homogénea con burbuja que ocupa un aproximadamente un 15 % de su volumen total, de forma circular y con un diámetro de 9  $\mu\text{m}$ . Se encuentran expuesta en superficie y ha sido analizada.

F2: Inclusiones vítreas recristalizadas, de forma circular y con un diámetro de entre 35 y 50  $\mu\text{m}$ . Se encuentran expuestas en superficie, y es posible identificar óxidos de Fe en su interior.

### 8.1.2.3 Cristal NV11-oliB

Corresponde a un cristal de olivino, de aproximadamente 249  $\mu\text{m}$  por 155  $\mu\text{m}$ , de mala estructuralidad y regular integridad. Se observa un crecimiento interior de plagioclasa en centro del cristal.

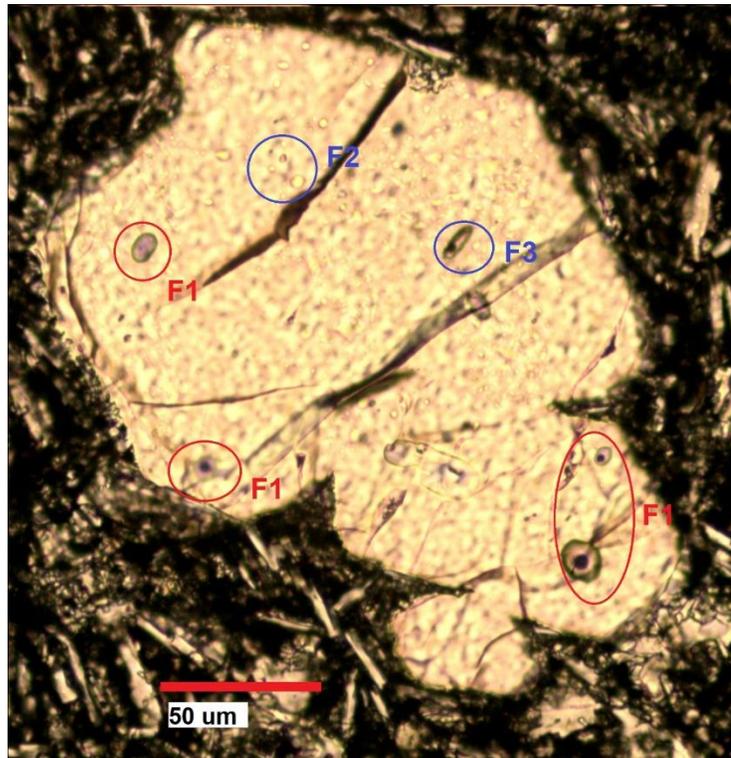


Figura 8.19: Cristal NV11-oliB, visto a nicoles paralelos.

F1: Inclusiones vítreas homogéneas con burbujas que ocupan entre un 15 y 30 % de su volumen total, de forma circular y con diámetros entre 9 y 20  $\mu\text{m}$ . En la imagen, las dos inclusiones de la izquierda de F1 (polígono inferior) se encuentran expuestas en superficie y han sido analizadas, al igual que la inclusión de esta familia en la parte de arriba.

F2: Inclusiones vítreas homogéneas sin burbuja, de forma circular y con un diámetro inferior a 2  $\mu\text{m}$ . No se encuentran expuestas en superficie.

F3: Inclusión homogénea de forma elipsoidal, alargada y con burbuja que ocupa un 10% de su volumen. Tiene un diámetro de 12  $\mu\text{m}$  y no se encuentra en superficie

#### 8.1.2.4 Cristal NV11-oliC

Corresponde a un cristal de olivino, de 268  $\mu\text{m}$  por 191  $\mu\text{m}$ , de regular estructuralidad y buena integridad.

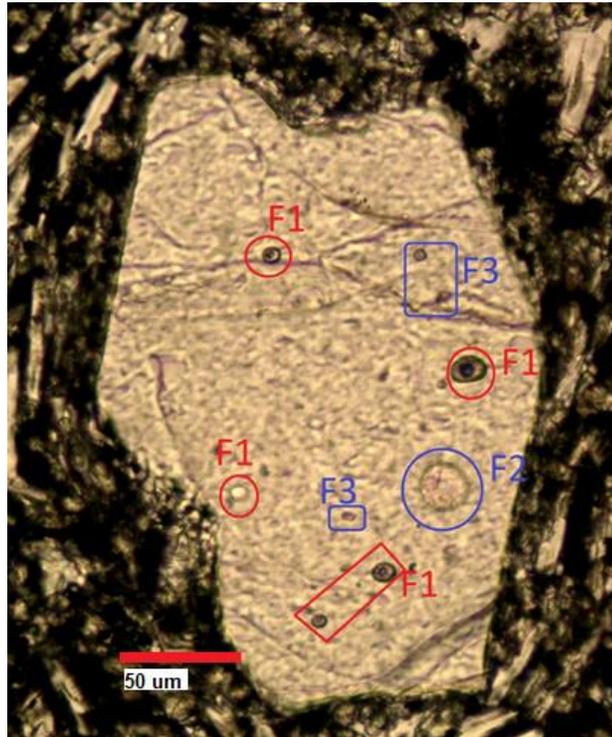


Figura 8.20: Cristal NV11-oliC, visto a nicoles paralelos.

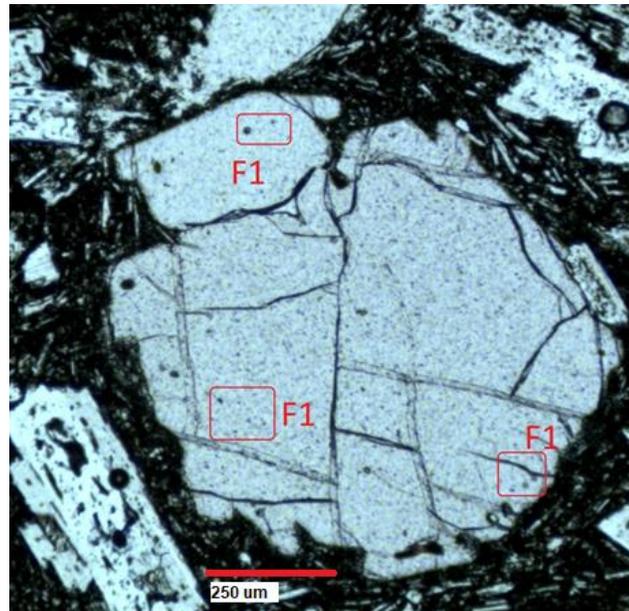
F1: Inclusiones vítreas homogéneas con burbujas que ocupan entre un 20 y 30 % de su volumen total, de forma circular y con diámetros entre 7 y 20  $\mu\text{m}$ . En la imagen, la inclusión más a la izquierda de F1, se encuentra expuesta en superficie y ha sido analizada...

F2: Inclusión vítrea totalmente recristalizada, de forma circular y con un diámetro de 38  $\mu\text{m}$ .

F3: Inclusiones vítreas homogéneas con burbuja con diámetros entre 3 y 5  $\mu\text{m}$ . La que se encuentra en la parte inferior del polígono está expuesta en superficie, sin embargo, por su reducido tamaño, no ha sido analizada.

### 8.1.2.5 Cristal NV11-oliD

Corresponde a un cristal de olivino, de aproximadamente 985  $\mu\text{m}$  por 950  $\mu\text{m}$ , de regular estructuralidad y buena integridad. Se encuentra en contacto con una plagioclasa en su extremo superior derecho.



*Figura 8.21: Cristal NV11-oliD, visto a nicoles paralelos.*

F1: Inclusiones vítreas homogéneas con burbujas que ocupan entre un 15% de su volumen total, de forma circular y con diámetros entre 5 y 10  $\mu\text{m}$ .

### 8.1.2.6 Cristal NV11-oliE

Corresponde a un cristal de olivino, de aproximadamente 691  $\mu\text{m}$  por 356  $\mu\text{m}$ , de mala estructuralidad e integridad. Se encuentra en paragénesis con una plagioclasa en su extremo superior.

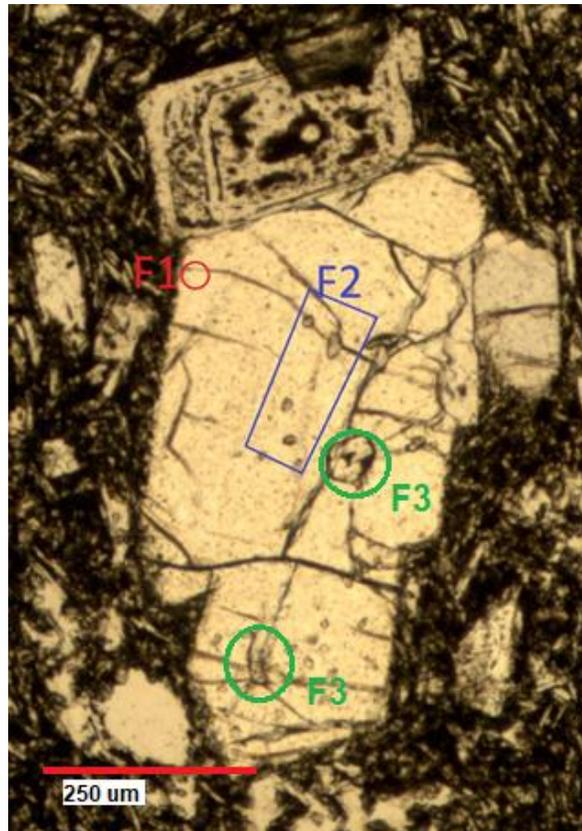


Figura 8.22: Cristal nv11-oliE, visto a nicoles paralelos.

F1: Inclusión vítrea homogénea sin burbuja, de forma circular y con un diámetro de 9  $\mu\text{m}$ . Está expuesta en superficie y ha sido analizada.

F2: Inclusiones vítreas homogéneas, con burbuja las cuales ocupan un 5 % del vol. Total. No se encuentran expuestas en superficie.

F3: Inclusiones vítreas de mayor tamaño, de formas más irregulares se encuentran cortadas por fracturas y presentan cristalización de óxidos de Fe en su interior.

### 8.1.2.7 Cristal NVII-oliH

Corresponde a un cristal de olivino, de aproximadamente 624  $\mu\text{m}$  por 293  $\mu\text{m}$ , de mala estructuralidad y regular integridad. Se encuentra en contacto con una plagioclasa en su extremo superior.

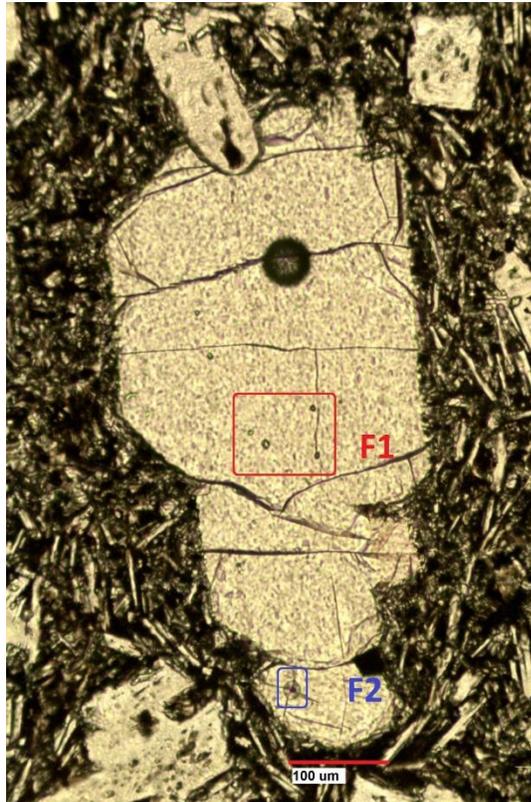


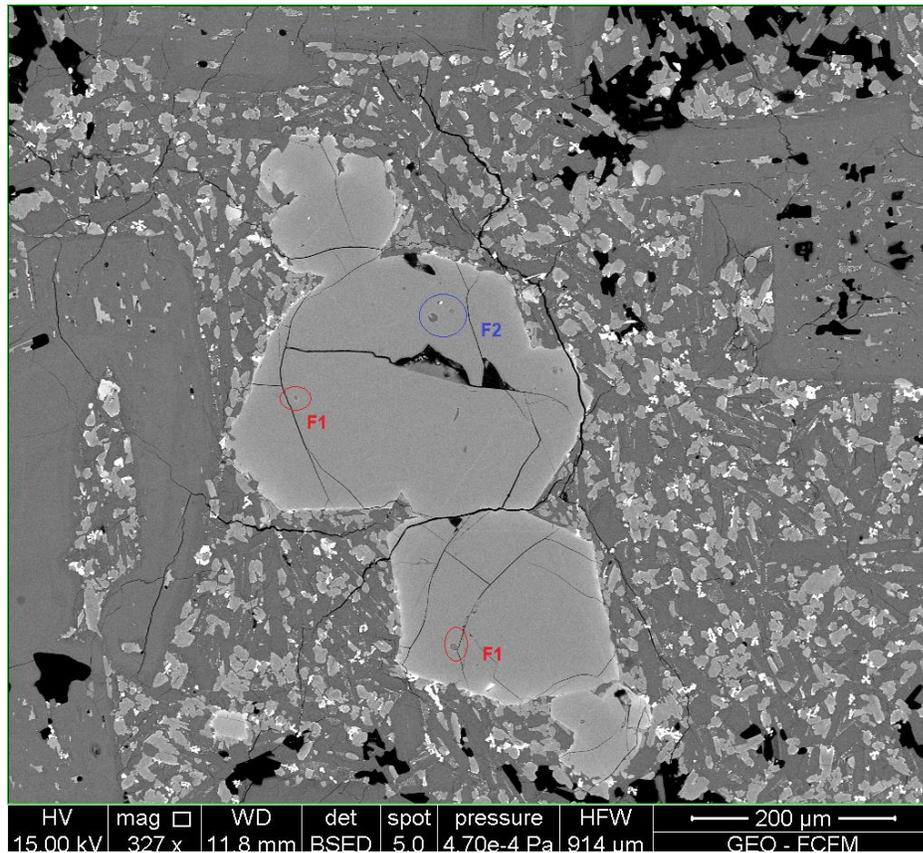
Figura 8.23: Cristal NV10-oliH, visto a nicoles paralelos.

F1: Inclusiones vítreas homogéneas con burbuja que ocupan aproximadamente un 20 % de su volumen total, de forma circular y con diámetros entre 7 y 15  $\mu\text{m}$ . La inclusión de la esquina inferior derecha se encuentra expuesta en superficie y ha sido analizada.

F2: Inclusión vítrea homogénea con burbuja, de forma circular, con un diámetro entre de aproximadamente 20  $\mu\text{m}$ . La burbuja corresponde a un 10 % de su volumen total. No se encuentra expuesta en superficie.

### 8.1.2.8 Cristal NV11-olil

Corresponde a un cristal de olivino, de aproximadamente 637  $\mu\text{m}$  por 323  $\mu\text{m}$  en su parte más ancha, de mala estructuralidad y regular integridad.



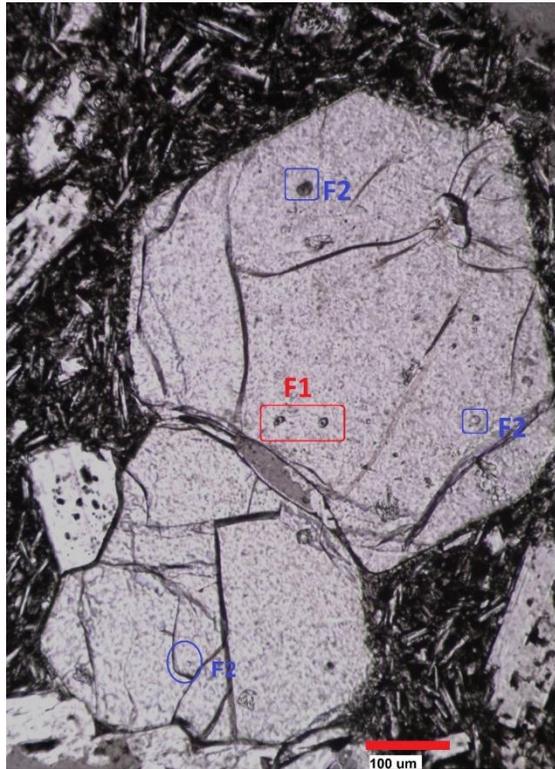
*Figura 8.24: Cristal NV11-olil, visto a nicoles paralelos.*

F1: Inclusiones vítreas homogéneas sin burbuja, de forma circular y con diámetros de entre 7 y 11  $\mu\text{m}$ . La inclusión de más abajo perteneciente a esta familia ha sido analizada.

F2: Inclusiones vítreas sin burbuja, recristalizadas, que contienen óxidos de Fe en su interior.

### 8.1.2.9 Cristal NV11-oliJ

Corresponde a un cristal de olivino, de aproximadamente 820  $\mu\text{m}$  por 556  $\mu\text{m}$  en su parte más ancha, de mala estructuralidad y regular integridad.



*Figura 8.25: Cristal NV11-oliJ, visto a nicoles paralelos.*

F1: Inclusiones vítreas homogéneas con burbuja, con un diámetro aproximado de 10  $\mu\text{m}$ . La burbuja ocupa entre un 10 y 20 % del volumen total. Se encuentran expuestas en superficie y han sido analizadas.

F2: Inclusiones vítreas homogéneas sin burbuja, de diámetro en 10  $\mu\text{m}$ . La inclusión de esta familia a la derecha en la imagen ha sido analizada.

### 8.1.2.10 Cristal NV11-oliK

Corresponde a un cristal de olivino, de aproximadamente 438  $\mu\text{m}$  por 389  $\mu\text{m}$  en su parte más ancha, de mala estructuralidad y regular integridad. Presenta crecimiento de plagioclasas en su interior.

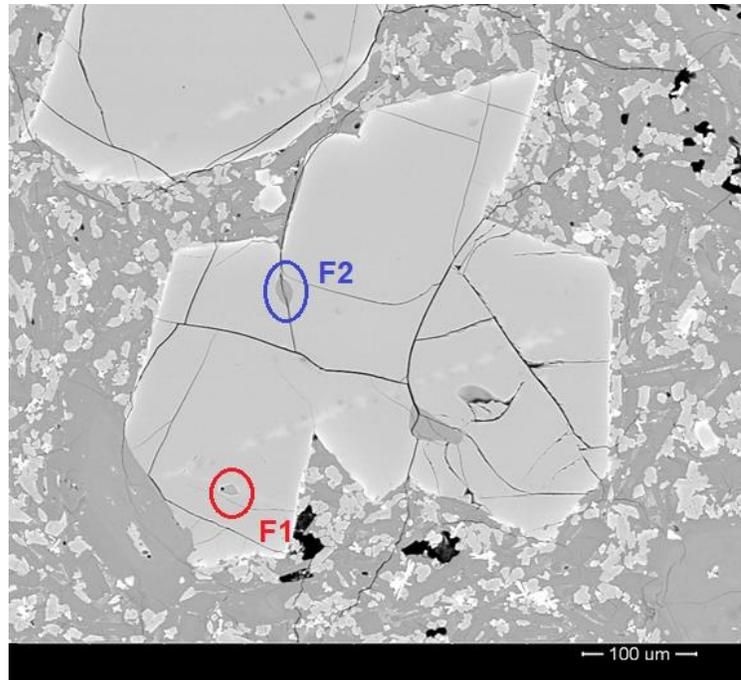


Figura 8.26: Cristal NV11-oliK, visto en SEM.

F1: Inclusión vítrea homogénea, con burbuja que ocupa un 10% de su volumen total, con un diámetro de 15  $\mu\text{m}$ . Ha sido analizada

F2: Inclusión vítrea homogénea sin burbuja, de diámetro aproximado 23  $\mu\text{m}$ . Se encuentra cortada por una fractura.

### 8.1.2.11 Cristal NV11-oliL

Corresponde a un cristal de olivino, de aproximadamente 563  $\mu\text{m}$  por 268  $\mu\text{m}$  en su parte más ancha, de mala estructuralidad y regular integridad.

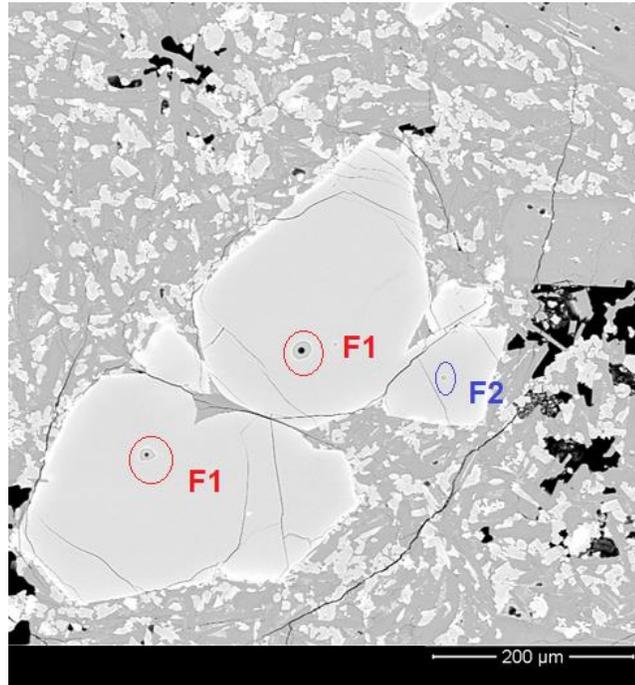


Figura 8.27: Cristal NV11-oliL, visto en SEM.

F1: Inclusiones vítreas homogéneas con burbuja, que ocupa entre un 15 y 26 %. El diámetro de las inclusiones en esta familia está entre los 16 y 22  $\mu\text{m}$ . Ambas han sido analizadas.

F2: Inclusión vítrea homogénea sin burbuja, de diámetro menor a 5  $\mu\text{m}$ .

## 8.2. ANEXO B: UBICACIÓN DE PUNTOS MEDIDOS EN EMPA

### 8.2.1. OLIVINO E INCLUSIONES EN CORTE TRANSPARENTE NV10

#### 8.2.1.1 NV10-oliA

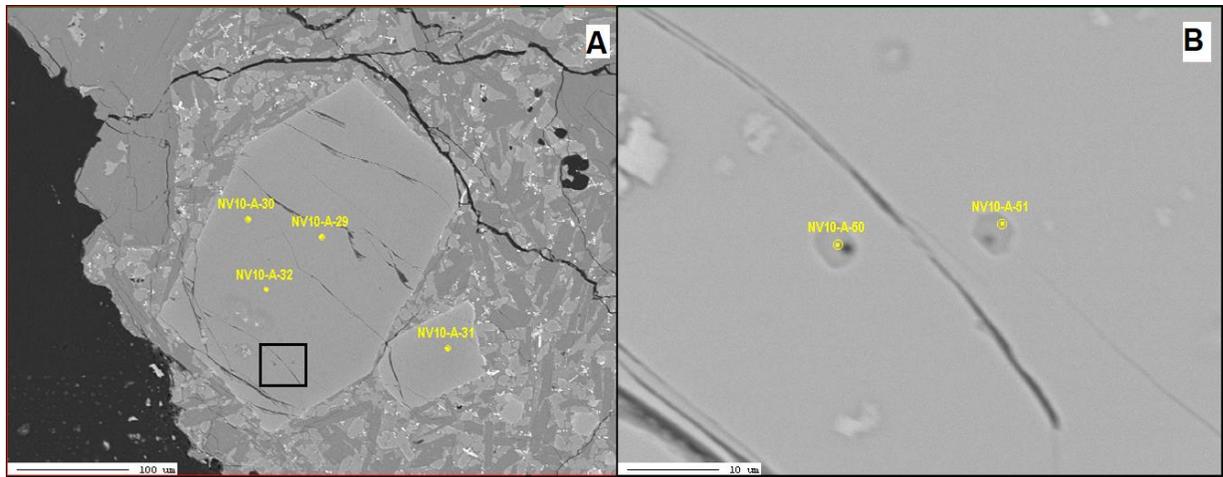


Figura 8.28: Fotomicrografía de oliA en EMPA. A) Puntos medidos en cristal. B) Zoom indicado por cuadrado de las inclusiones medidas.

#### 8.2.1.2 NV10-oliB

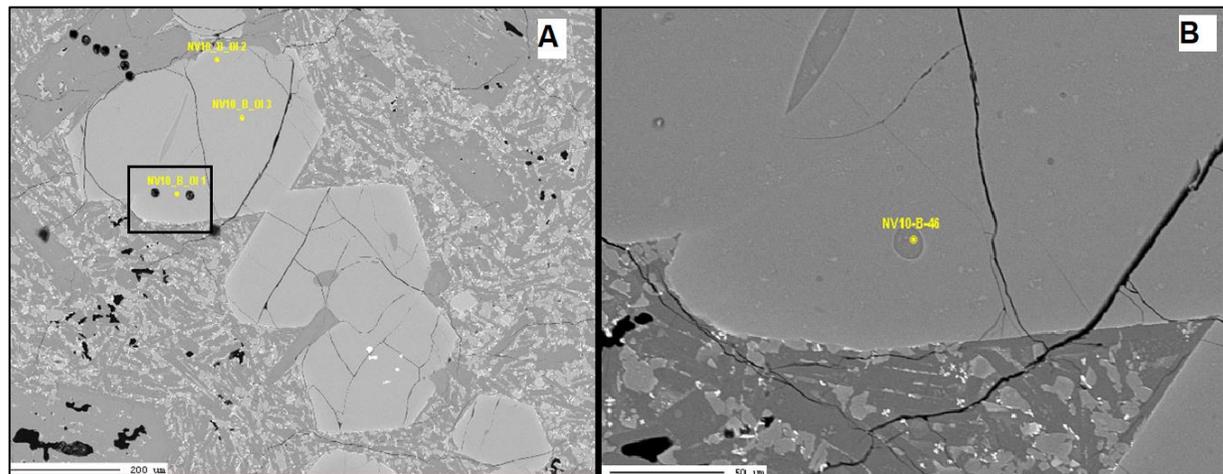
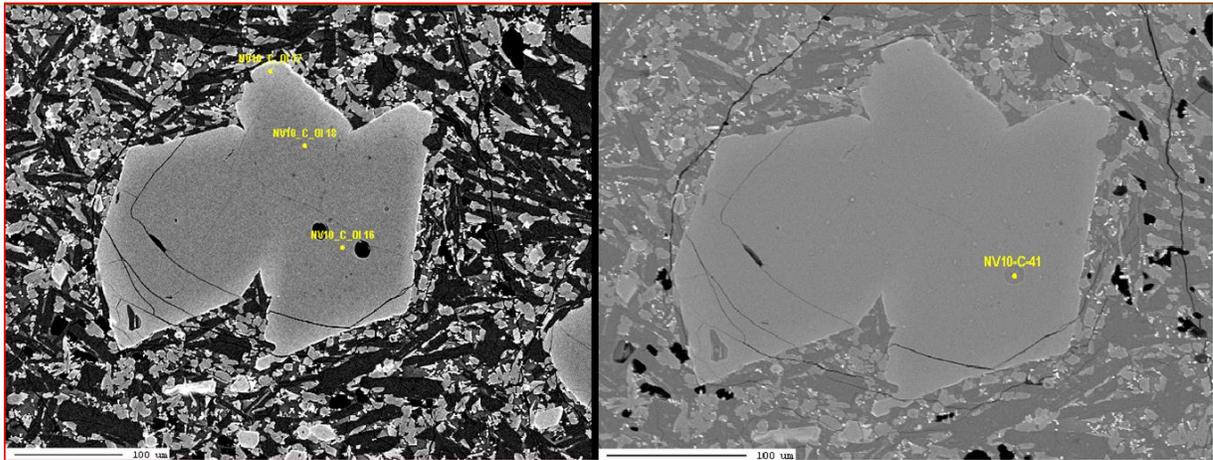


Figura 8.29: Fotomicrografía de oliB en EMPA. A) Puntos medidos en cristal. B) Zoom indicado por rectángulo de las inclusiones medidas.

### 8.2.1.3 NV10-oliC



*Figura 8.30: Fotomicrografía de oliC en EMPA. A la izquierda, untos medidos en cristal; a la derecha, la inclusión medida.*

#### 8.2.1.4 NV10-oliD

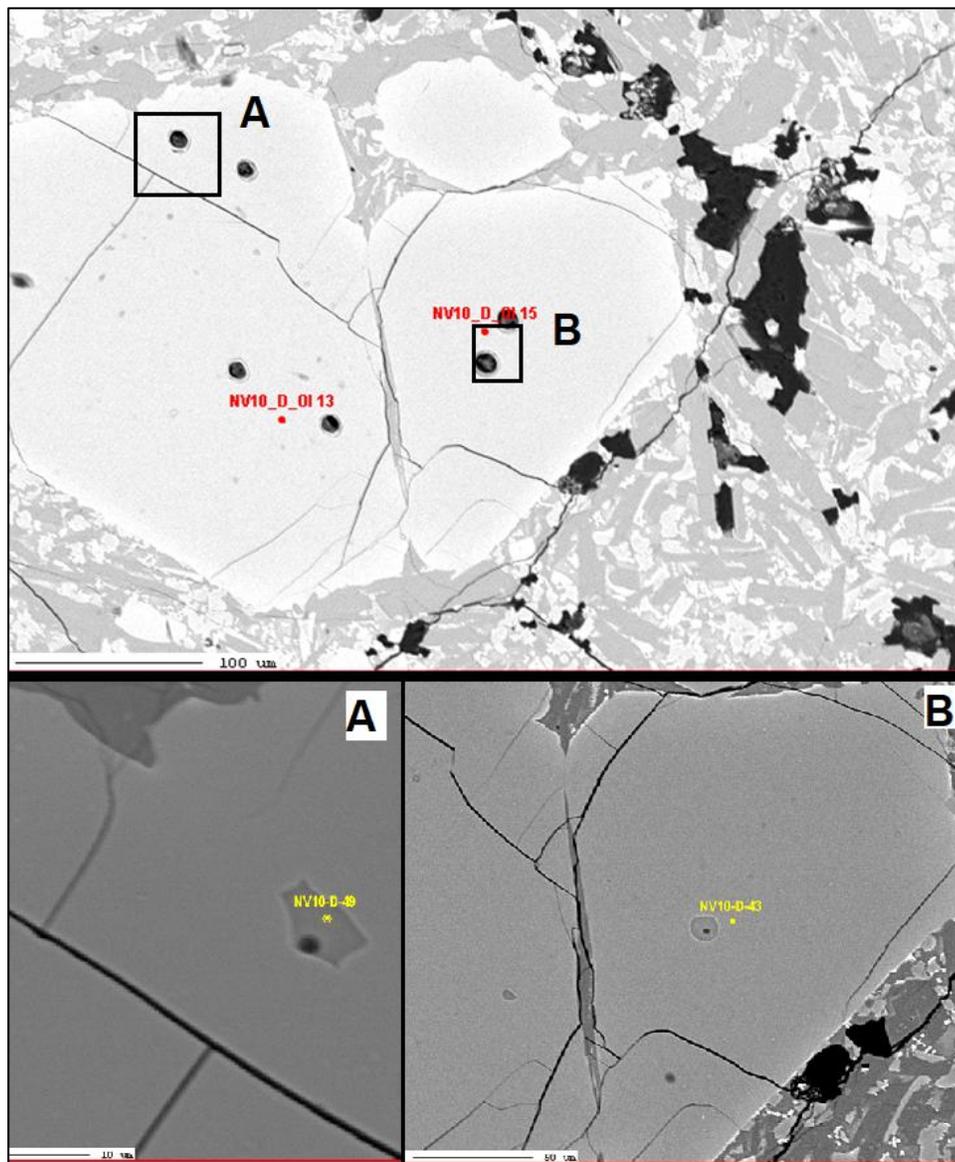


Figura 8.31: Fotomicrografía de oliD en EMPA. A) Zoom en inclusión D-49. B) Zoom en inclusión D-43

### 8.2.1.5 NV10-oliF

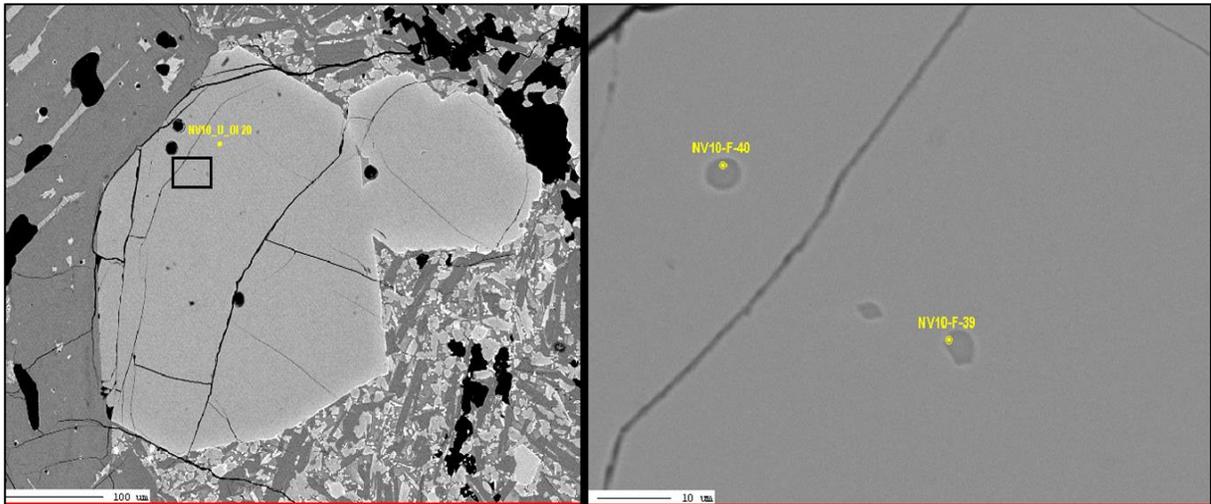


Figura 8.32: A la izquierda, fotomicrografía del cristal NV10-oliF en EMPA. A la derecha, zoom en inclusiones medidas indicado por rectángulo.

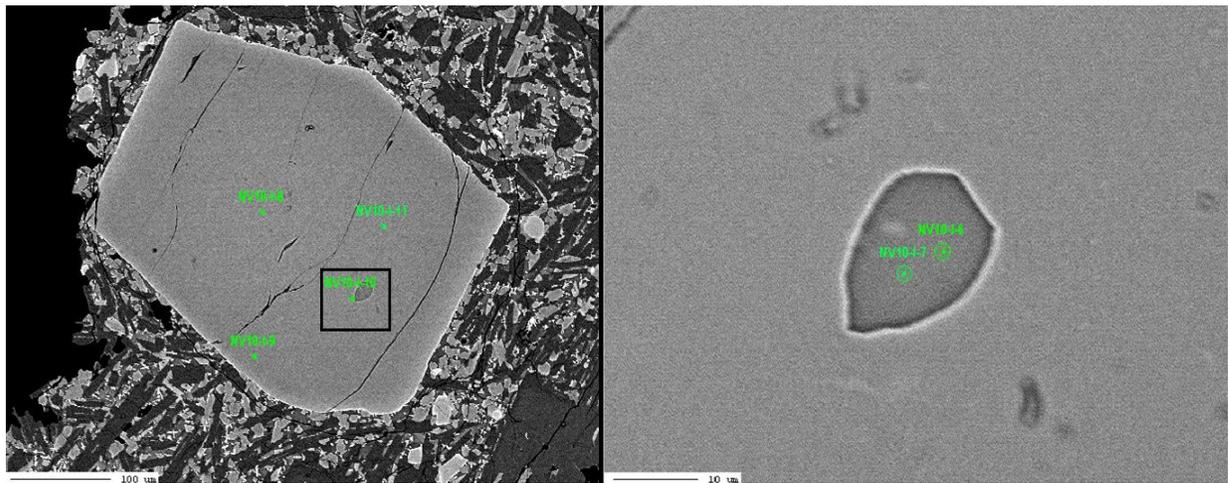


Figura 8.33: A la izquierda, fotomicrografía del cristal NV10-olil en EMPA. A la derecha, zoom en inclusiones medidas indicado por rectángulo.

### 8.2.1.6 NV10-oliK

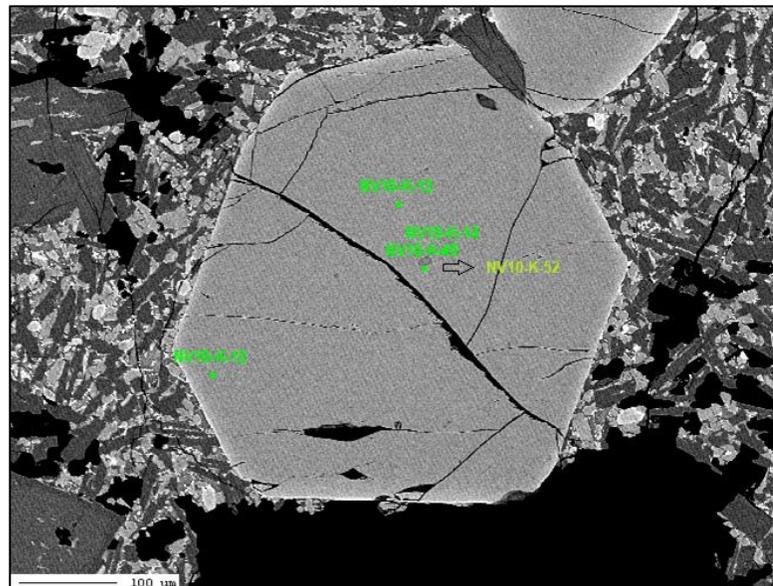


Figura 8.34: Fotomicrografía del cristal NV10-oliK. La fecha indica la posición de la inclusión K-52 en el cristal

### 8.2.1.7 NV10-oliL

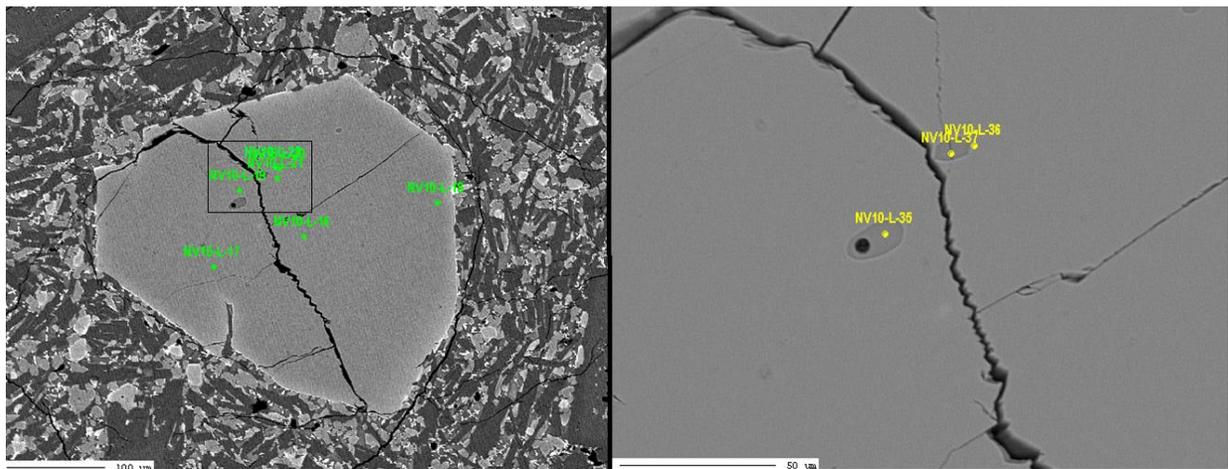


Figura 8.35: A la izquierda, fotomicrografía del cristal NV10-oliL en EMPA. A la derecha, zoom en inclusiones medidas indicado por rectángulo

### 8.2.1.8 NV10-oliO

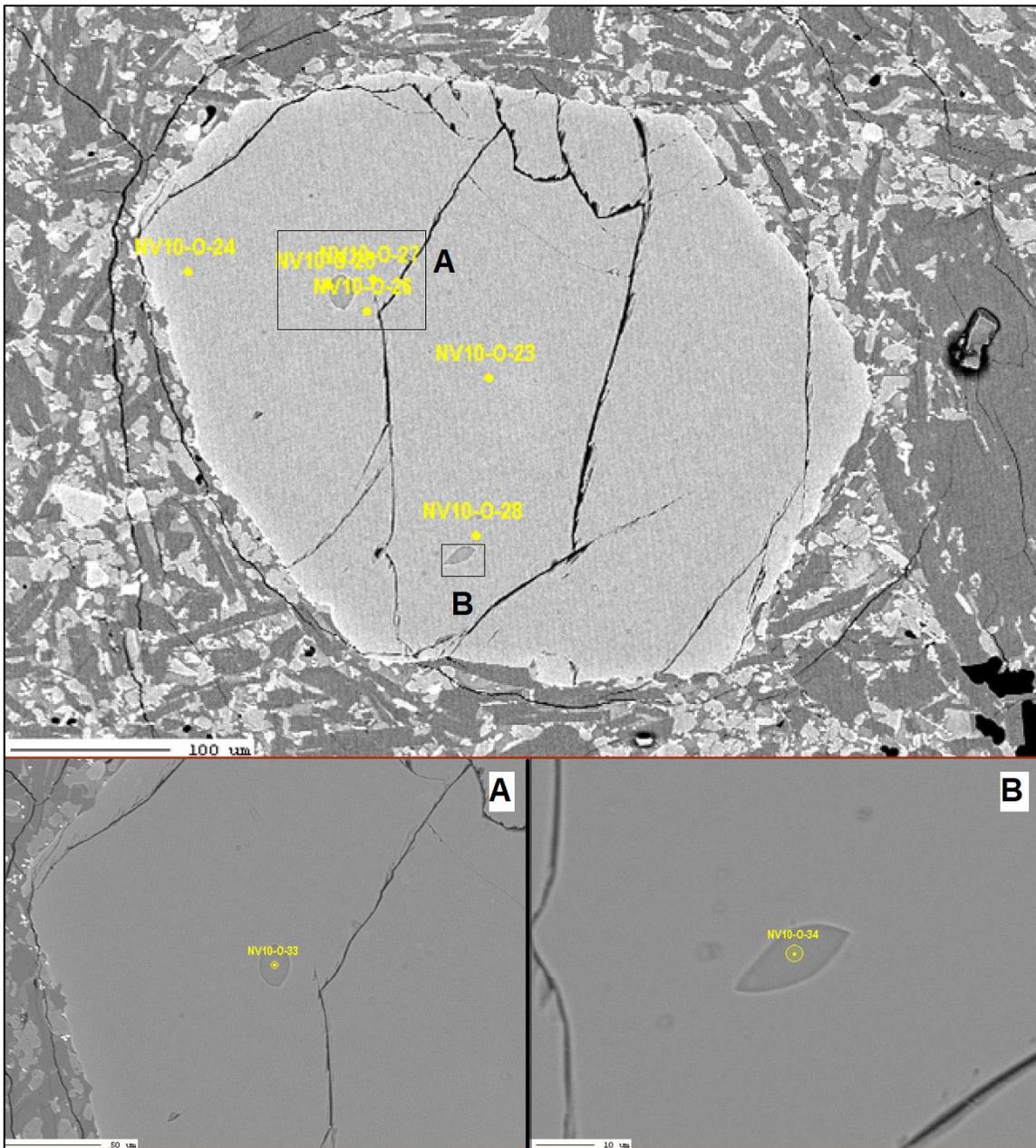


Figura 8.36: Fotomicrografía de oliO en EMPA. A) y B) representan los zooms en las inclusiones indicados en los rectángulos sobre el cristal.

### 8.2.1.9 NV10-oli-P

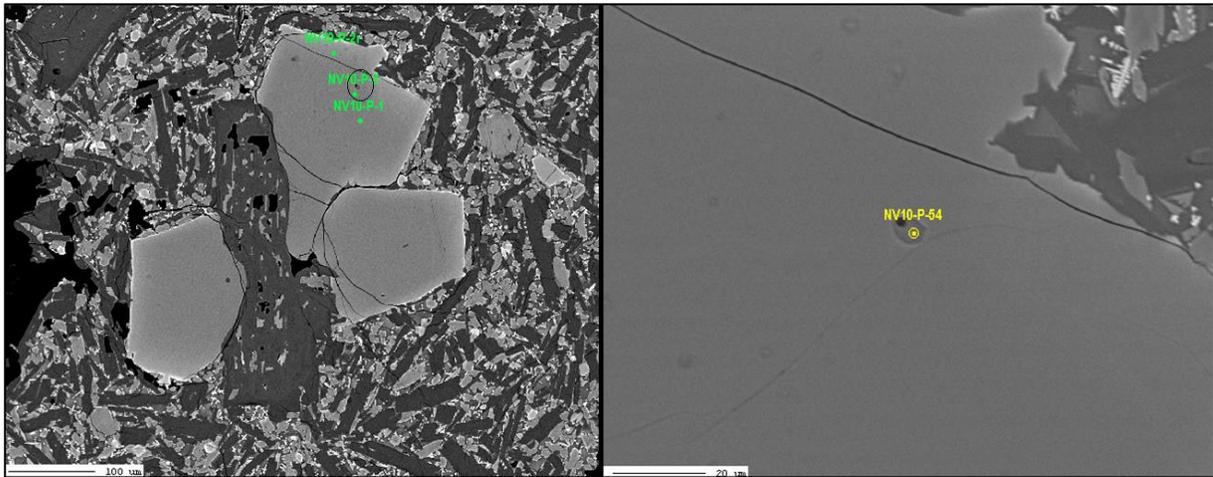


Figura 8.37: A la izquierda, fotomicrografía del cristal NV10-oliP en EMPA. A la derecha, zoom en inclusiones medidas indicado por el círculo.

### 8.2.1.10 NV10-oliR

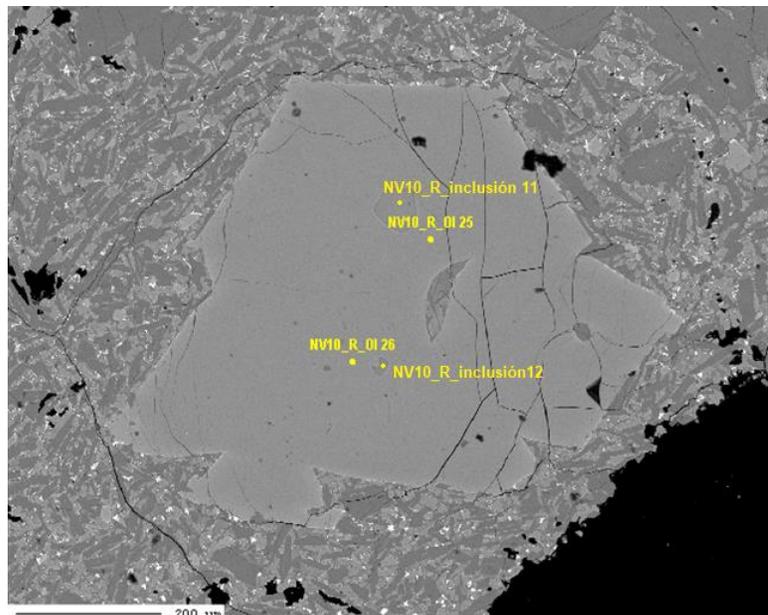


Figura 8.38: Fotomicrografía de oliR en EMPA.

### 8.2.1.11 NV10-oliS

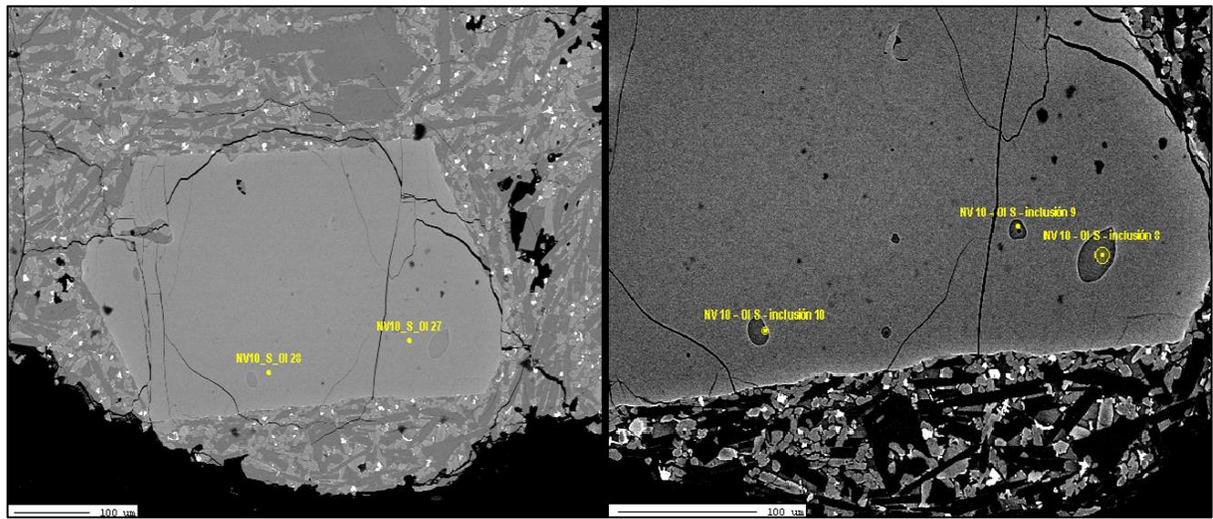


Figura 8.39: A la izquierda, fotomicrografía del cristal NV10-oliS en EMPA. A la derecha, ubicación inclusiones medidas.

### 8.2.1.12 NV10-oliU

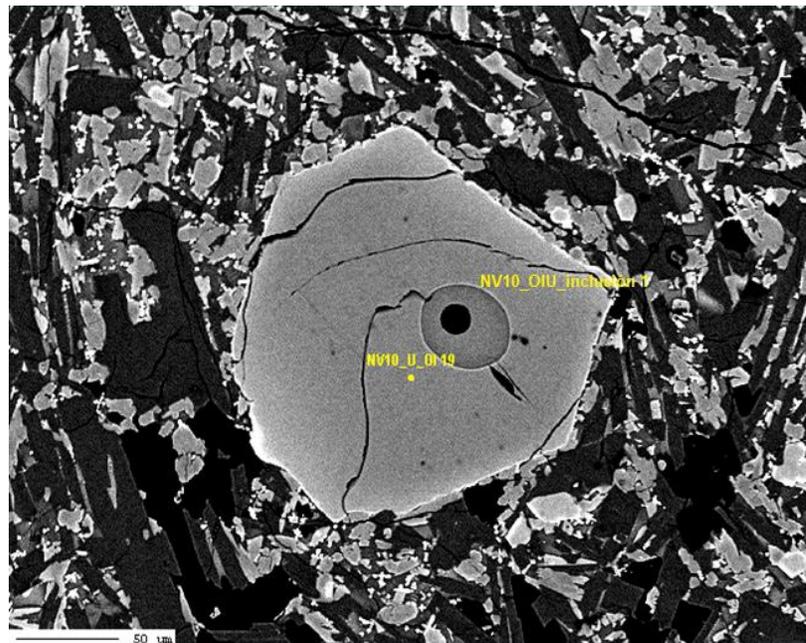


Figura 8.40: Fotomicrografía de oliU en EMPA.

### 8.2.1.13 NV10-oliQ/Q2

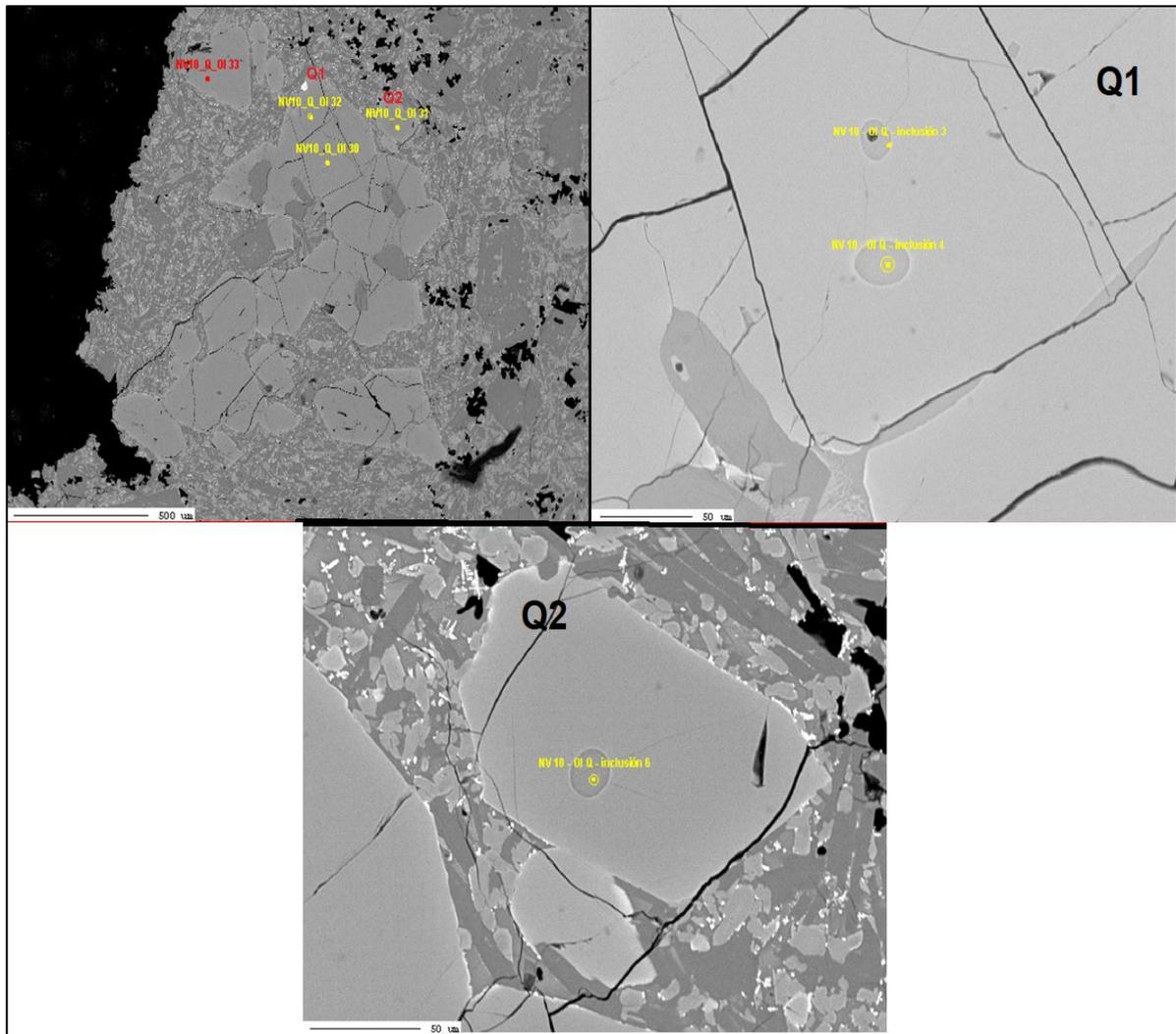


Figura 8.41: Fotomicrografías de los cristales NV10-oliQ1/Q2. Las inclusiones medidas están indicadas en cada cristal.

## 8.2.2. PLAGIOCLASAS EN CORTE TRANSPARENTE NV10

### 8.2.2.1 NV10-plgB

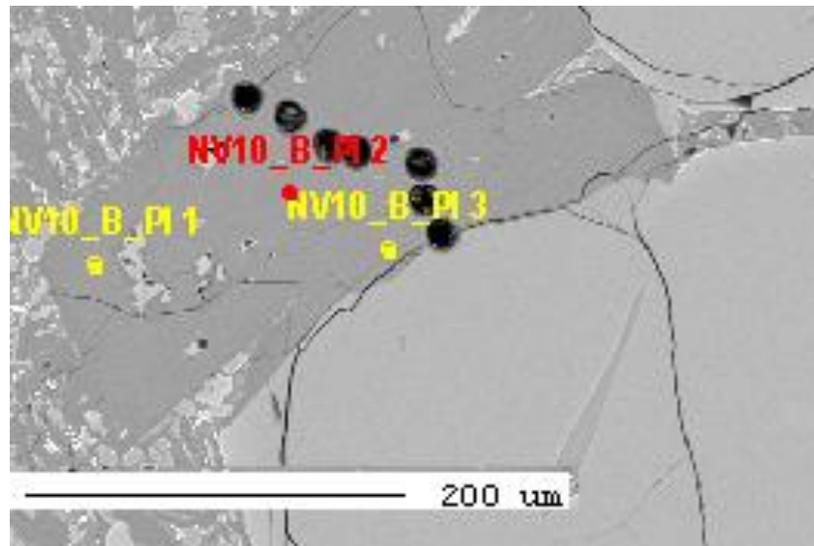


Figura 8.42: Fotomicrografía de plgB en EMPA.

### 8.2.2.2 NV10-plgC

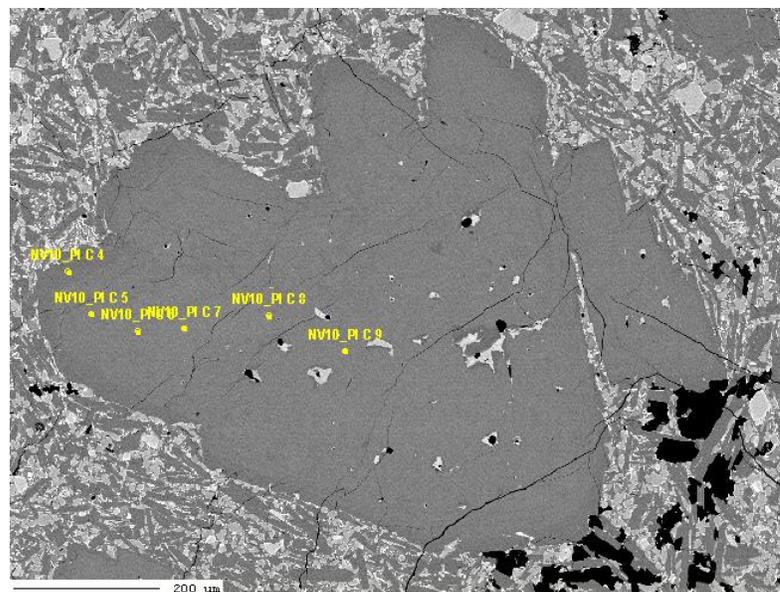


Figura 8.43: Fotomicrografía de plgC en EMPA

### 8.2.2.3 NV10-plgD

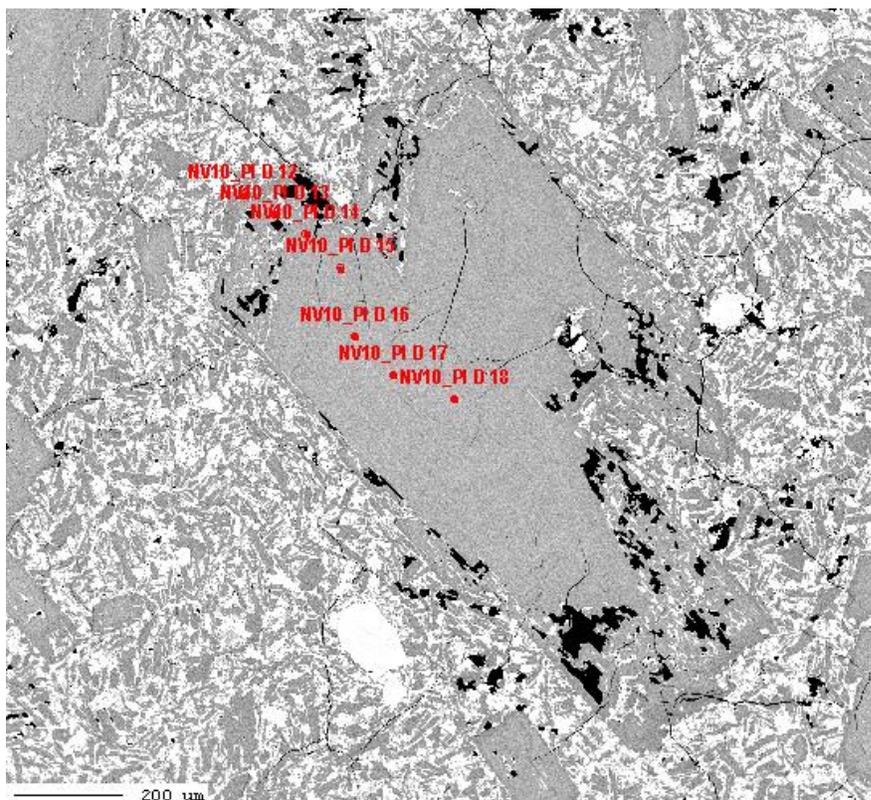


Figura 8.44: Fotomicrografía cristal NV10-plgD en EMPA

### 8.2.2.4 NV10-plgE

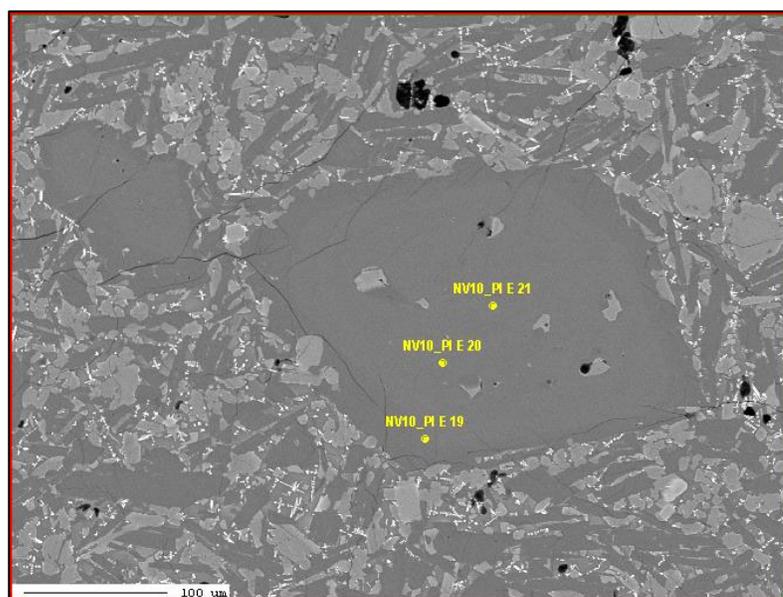


Figura 8.45: Fotomicrografía cristal NV10-plgE en EMPA

### 8.2.2.5 NV10-plgF

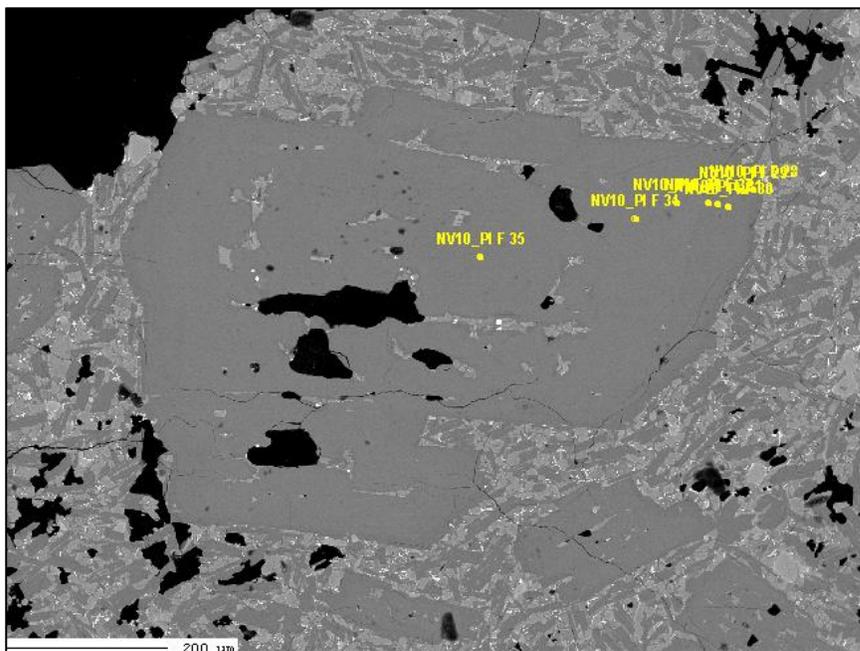


Figura 8.46: Fotomicrografía cristal NV10-plgF

### 8.2.2.6 NV10-plgH

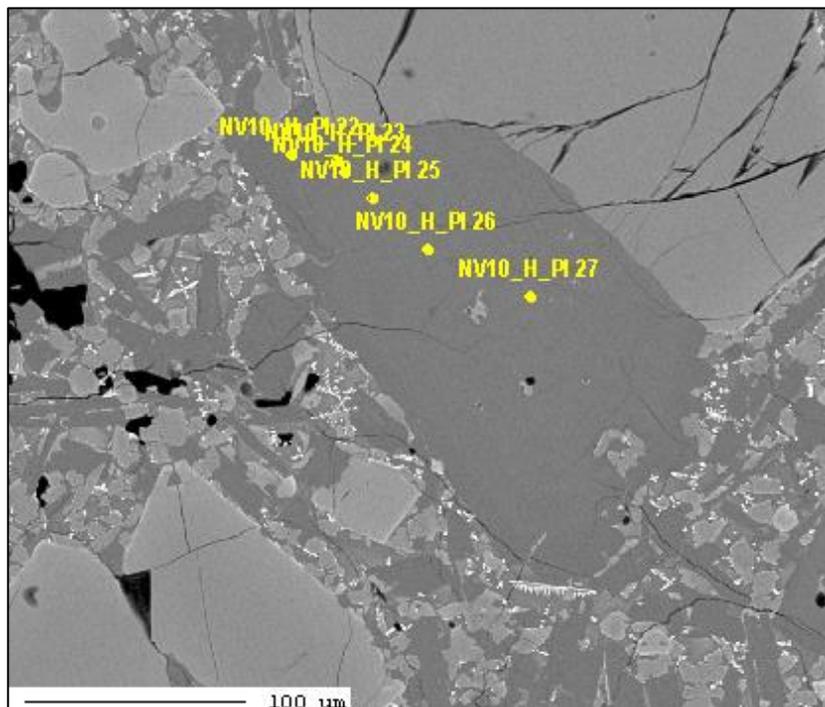


Figura 8.47: Fotomicrografía cristal NV10-plgH

### 8.2.2.7 NV10-plgQ1/Q2/Q3/Q4 y Q5

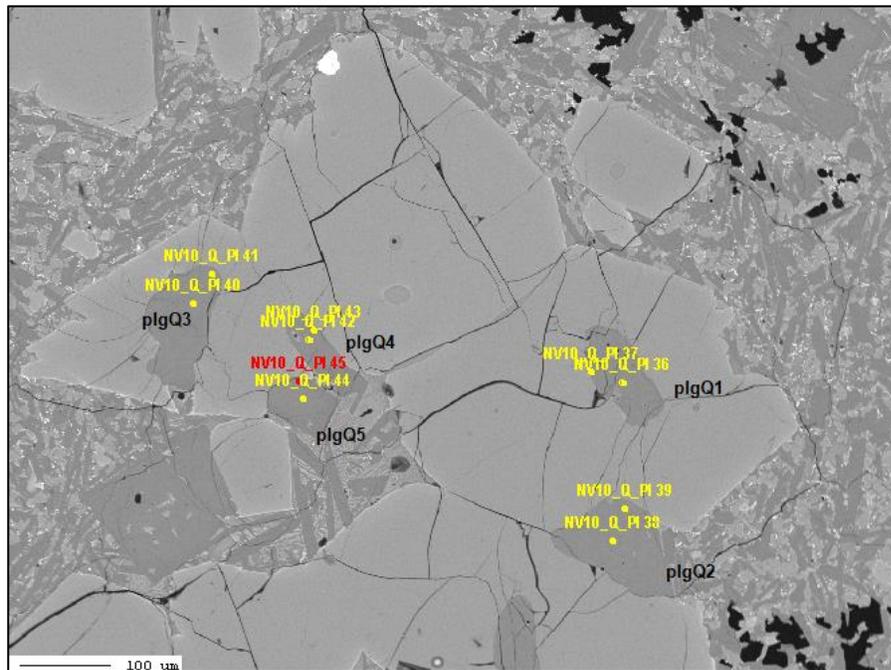


Figura 8.48: Fotomicrografía glómero Q en EMPA. En la imagen se encuentra la ubicación de cada punto medido.

### 8.2.2.8 NV10-plgMIC1/2

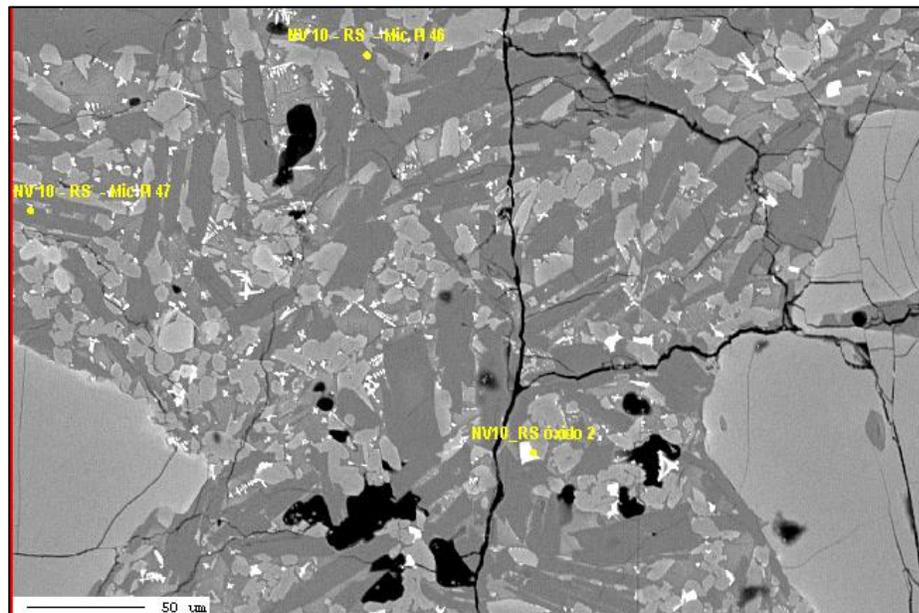


Figura 8.49: Fotomicrografía microlitos de plagioclasa NV10-plgMIC1 y MIC2

## 8.2.3. PIROXENO EN CORTE TRANSPARENTE NV10

### 8.2.3.1 NV10-pxA

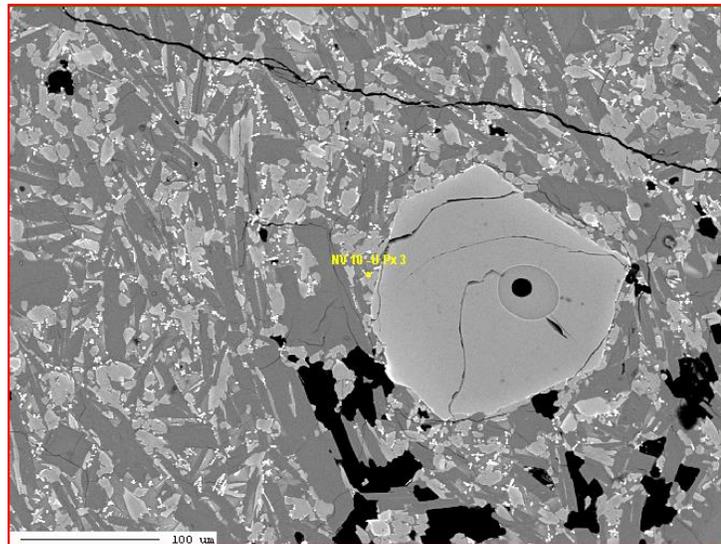


Figura 8.50: Fotomicrografía pxA (3) en EMPA

### 8.2.3.2 NV0-pxB/C

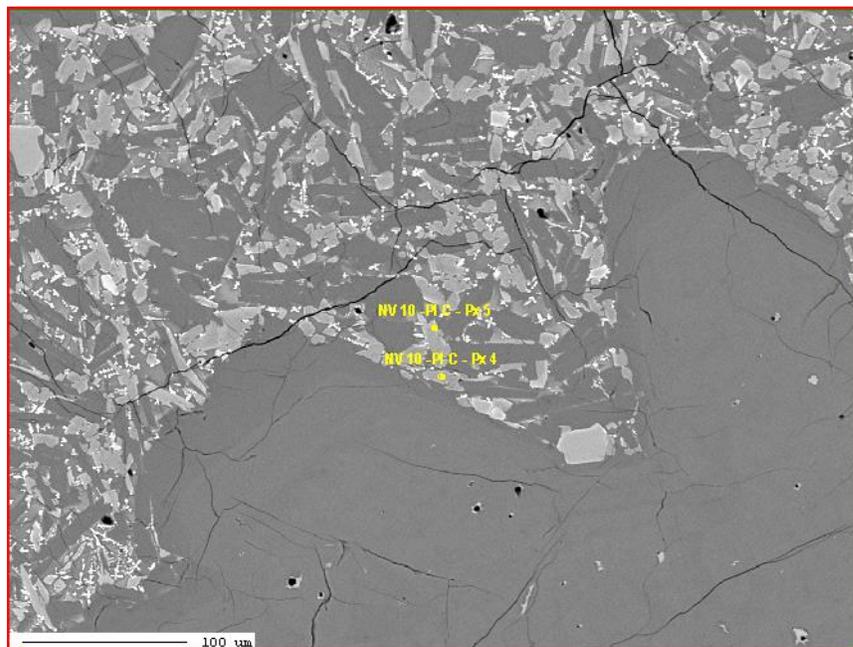
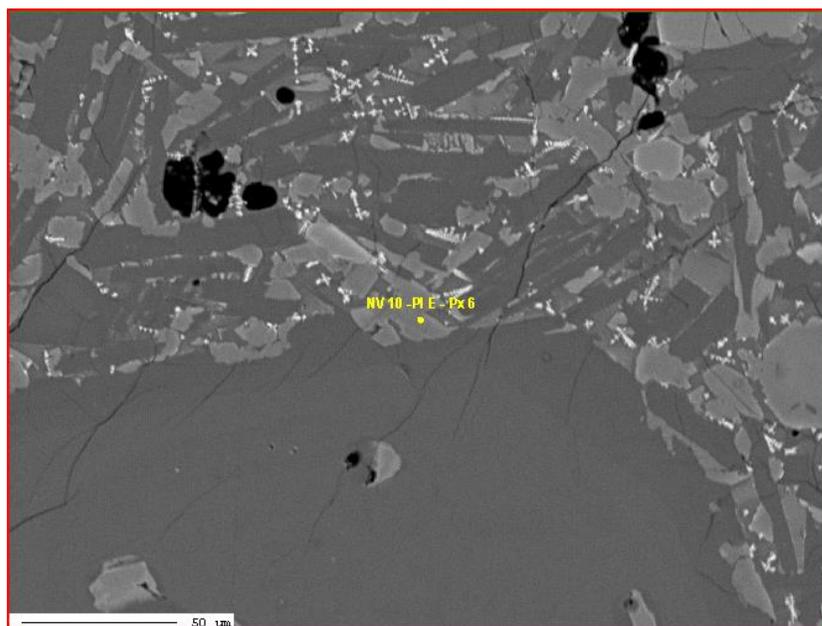


Figura 8.51: Fotomicrografía pxB (4) y pxC (5) en EMPA

### 8.2.3.3 NV10-pxD



*Figura 8.52: Fotomicrografía pxD (6) en EMPA*

## 8.2.4. TITANOMAGNETITA EN CORTE TRANSPARENTE NV10

### 8.2.4.1 NV10-oxRS-2,3,4,5,6,7 y 8.

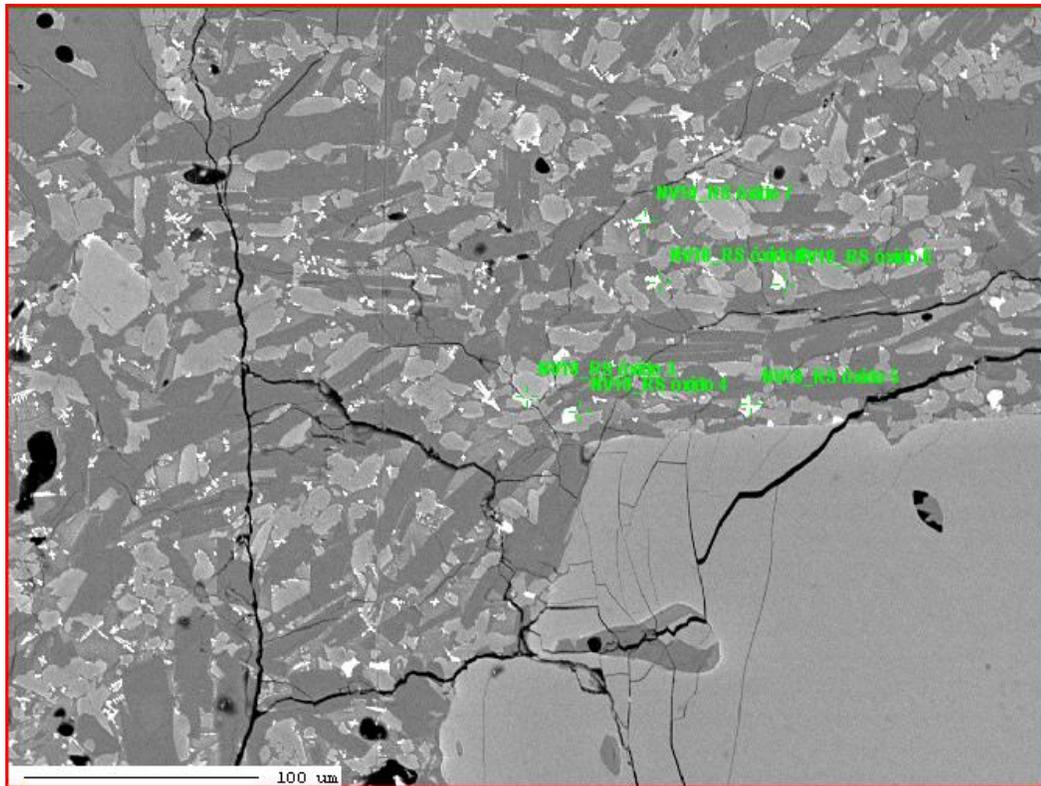


Figura 8.53: Figura 8.54: Fotomicrografía en EMPA óxidos de hierro en matriz

## 8.2.5. OLIVINO E INCLUSIONES EN CORTE TRANSPARENTE NV11

### 8.2.5.1 NV11-oliA-CX1 y 2

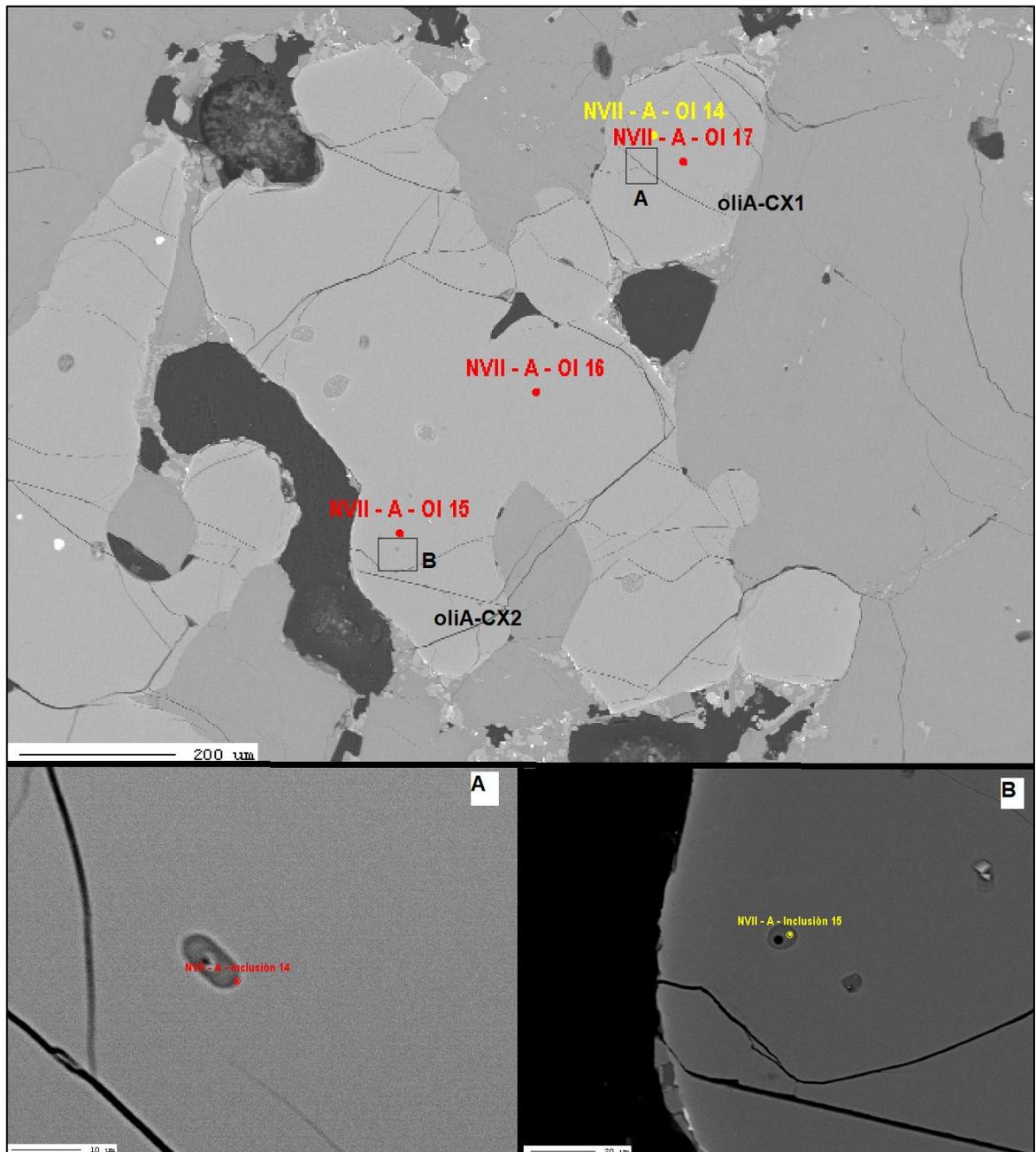


Figura 8.55: Fotomicrografía del glómero A. En ella se indican los puntos medidos en olivino para CX1 y CX2. A y B): Zoom en los rectángulos donde se encuentran las inclusiones analizadas

### 8.2.5.2 NV11-oliB

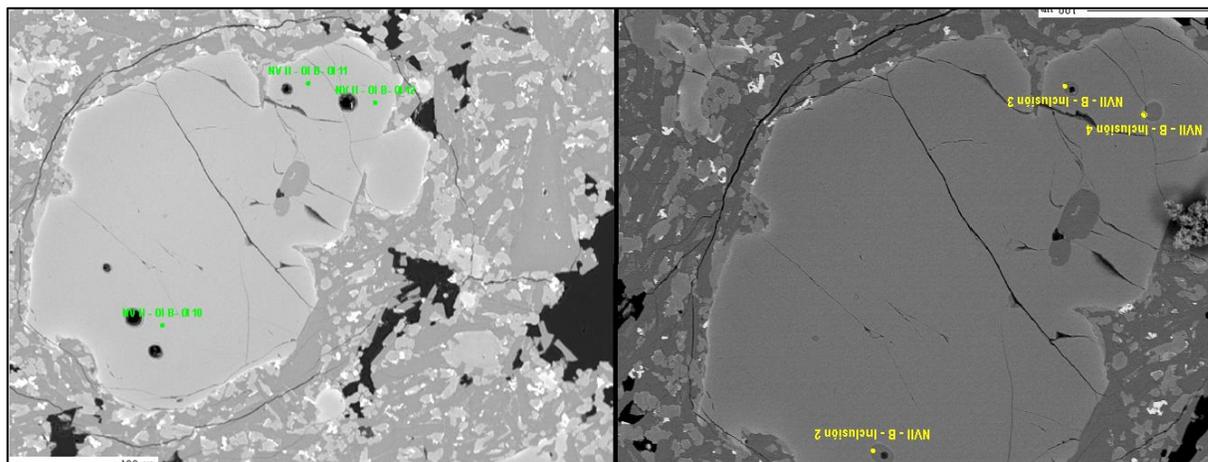


Figura 8.56: Fotomicrografía cristal NV11-oliB en EMPA. A la izquierda, ubicación de los puntos medidos en cristal; a la derecha, puntos en inclusiones.

### 8.2.5.3 NV11-oliC

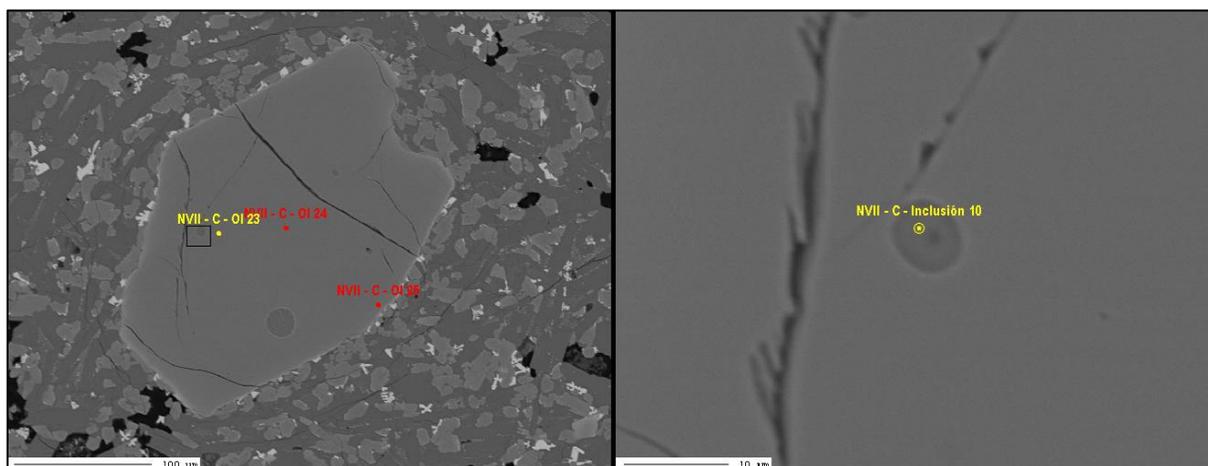


Figura 8.57: Fotomicrografía cristal NV11-oliC en EMPA. A la izquierda, ubicación de los puntos medidos en cristal; a la derecha, puntos en inclusiones según zoom en rectángulo.

## NV11-oliD

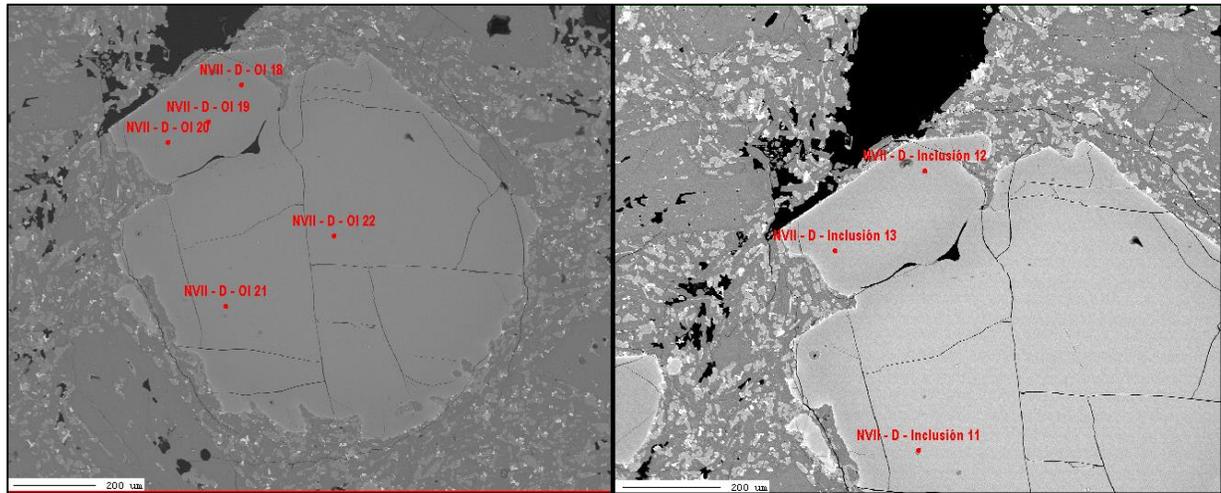


Figura 8.58: Fotomicrografía cristal NV11-oliD en EMPA. A la izquierda, ubicación de los puntos medidos en cristal; a la derecha, puntos en inclusiones.

### 8.2.5.4 NV11-oliH

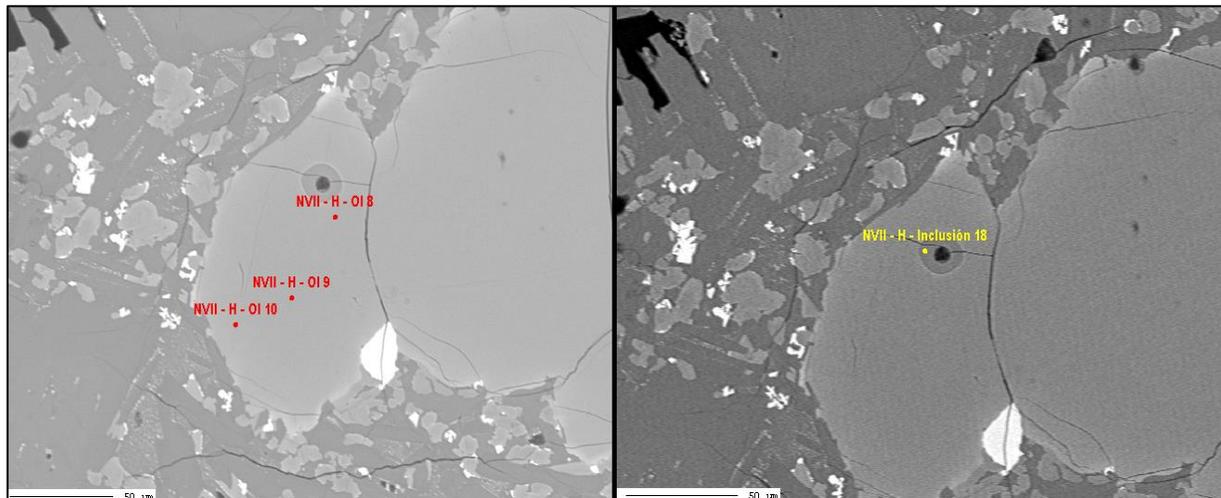


Figura 8.59: Fotomicrografía cristal NV11-oliH en EMPA. A la izquierda, ubicación de los puntos medidos en cristal; a la derecha, puntos en inclusiones.

### 8.2.5.5 NV11-olil

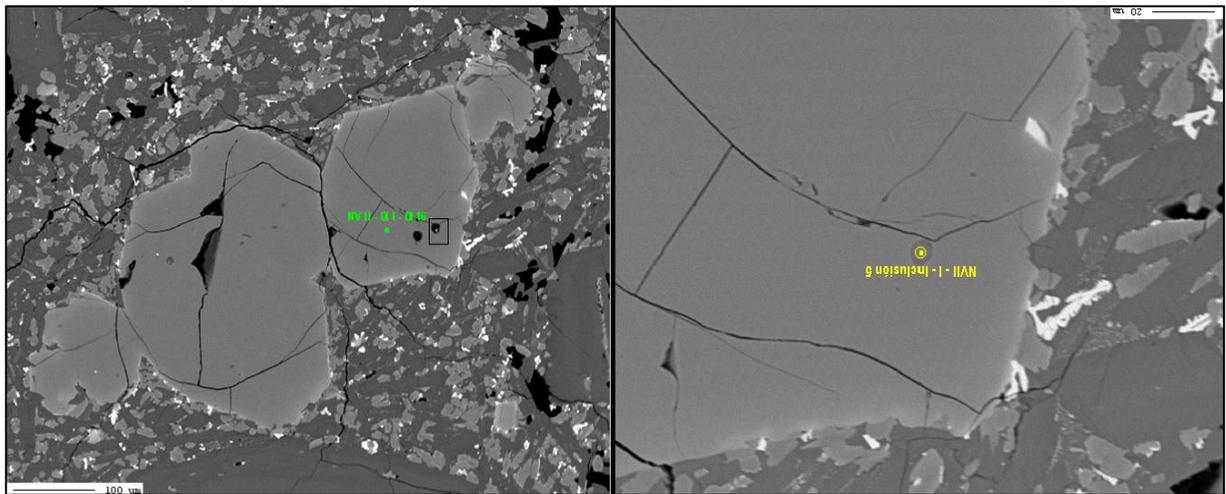


Figura 8.60: Fotomicrografía cristal NV11-olil en EMPA. A la izquierda, ubicación de los puntos medidos en cristal; a la derecha, puntos en inclusiones según el rectángulo marcado.

### 8.2.5.6 NV11-oli J

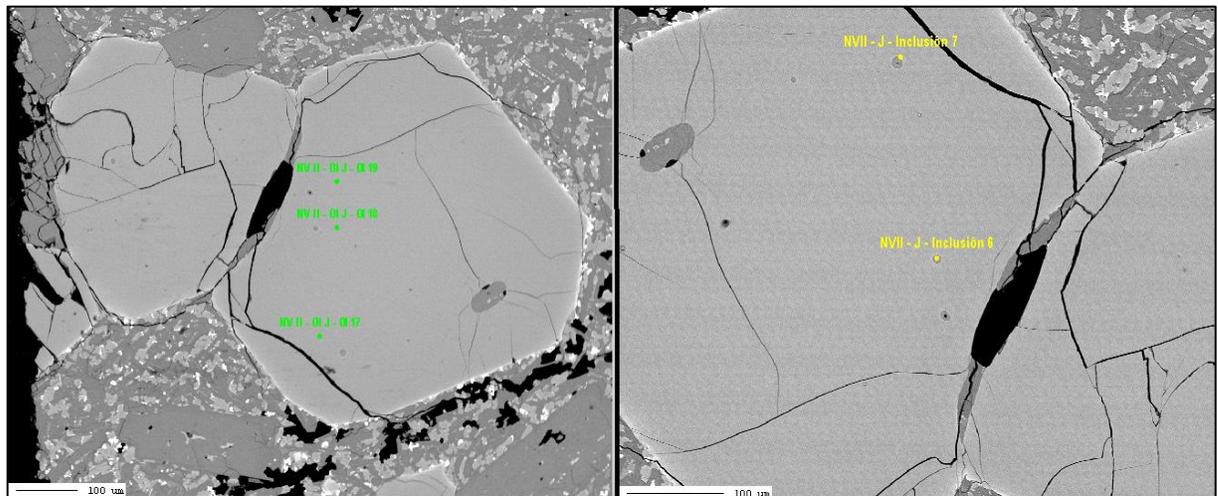


Figura 8.61: Fotomicrografía cristal NV11-oliJ en EMPA. A la izquierda, ubicación de los puntos medidos en cristal; a la derecha, puntos en inclusiones.

### 8.2.5.7 NV11-oliK

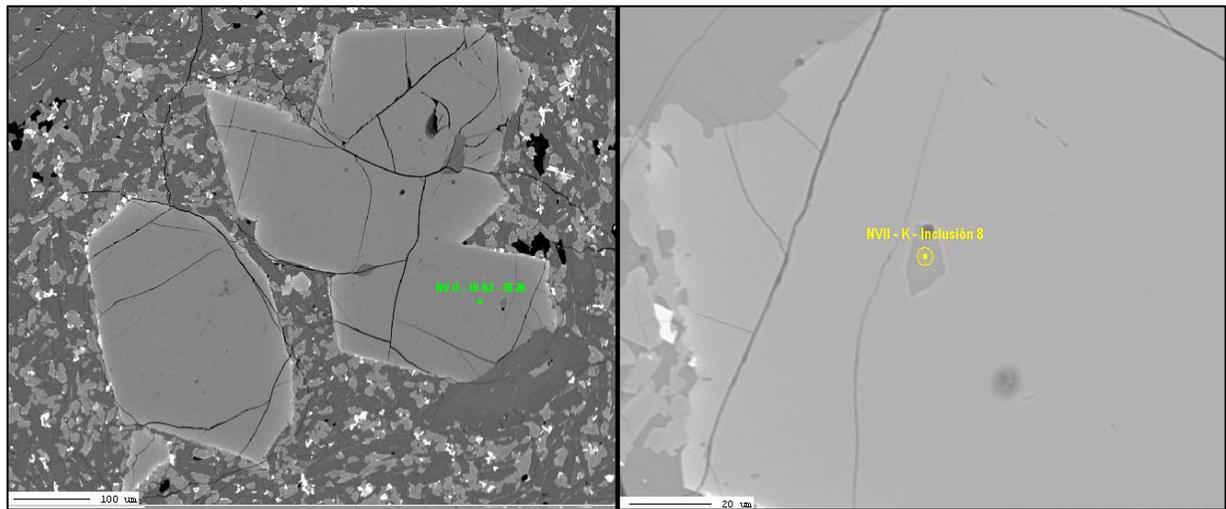


Figura 8.62: Fotomicrografía cristal NV11-oliK en EMPA. A la izquierda, ubicación de los puntos medidos en cristal; a la derecha, puntos en inclusiones.

### 8.2.5.8 NV11-oliL

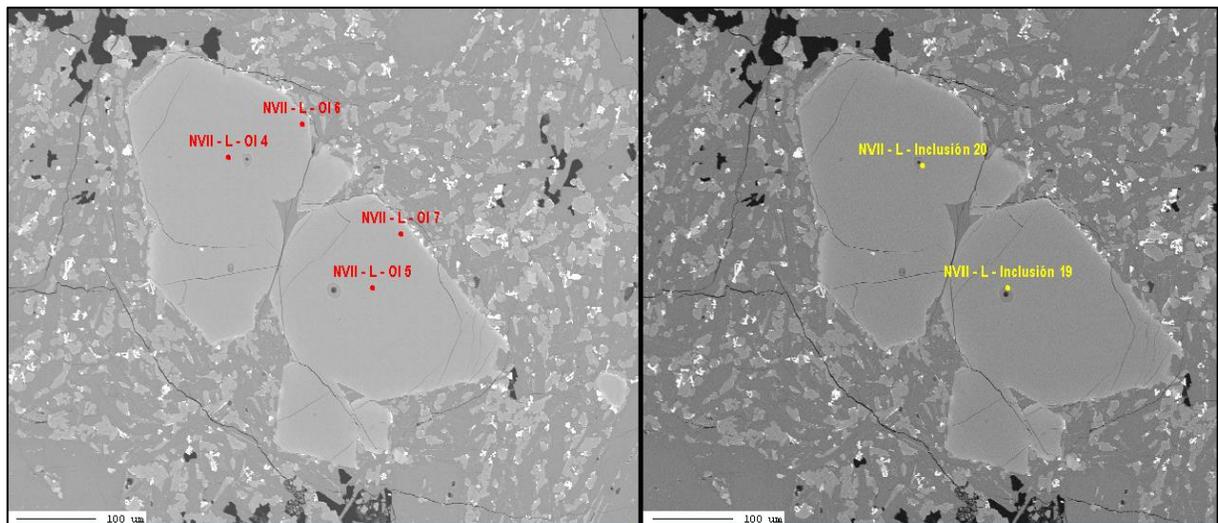


Figura 8.63: Fotomicrografía cristal NV11-oliL en EMPA. A la izquierda, ubicación de los puntos medidos en cristal; a la derecha, puntos en inclusiones

## 8.2.6. PIROXENO EN CORTE TRANSPARENTE NV11

### 8.2.6.1 NV11-pxA

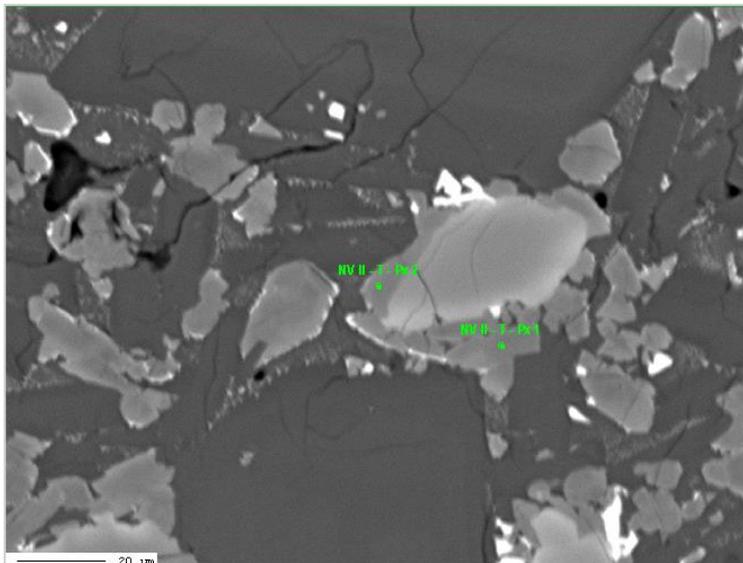


Figura 8.64: Fotomicrografía de microlito de olivino (olipxA) con borde de reacción de piroxeno (pxA) en EMPA. En la imagen corresponde pxA corresponde a “T-Px2” y olipxA a “T-Px1”. Nota: El olivino fue medido donde corresponde.

### 8.2.6.2 NV11-pxP

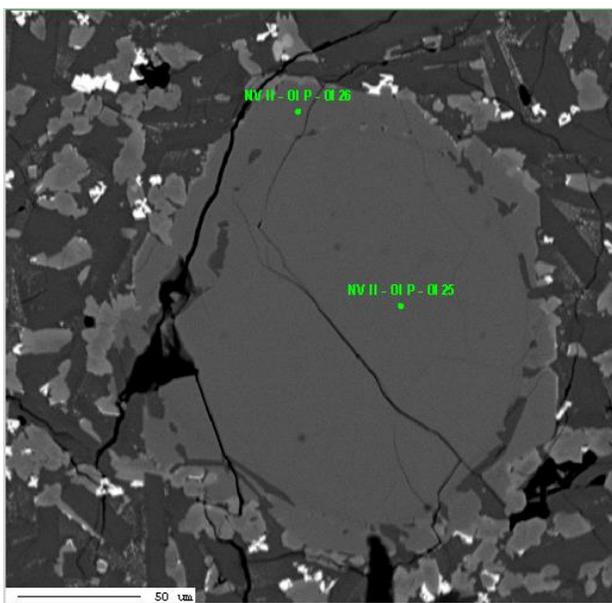


Figura 8.65: Fotomicrografía cristal NV11-pxP en EMPA.

## 8.2.7. CROMITAS EN CORTE TRANSPARENTE NV11

### 8.2.7.1 NV11-oxU 1 y 2

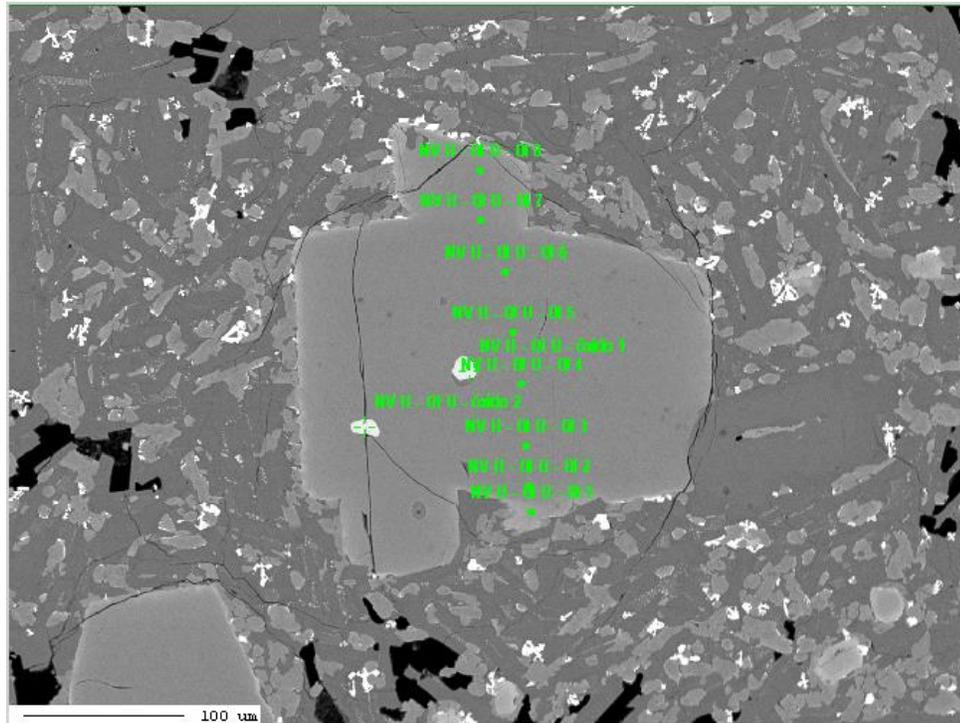


Figura 8.66: Fotomicrografía en EMPA de los óxidos NV11-oxU1 y oxU2.

### 8.3. ANEXO C: DATOS DE ELEMENTOS MAYORES, MENORES Y TRAZAS.

#### 8.3.1. MINERAL: OLIVINOS EN CORTE TRANSPARENTE NV10

Tabla 8.1: Elementos mayores y menores del cristal de olivino NV10-oliA, medidos en EMPA, con las respectivas inclusiones vítreas del cristal. "-" indica elemento no medido. La unidad de medida es % wt. de óxidos.

CRISTAL	NV10-oliA				
Puntos Cristal	A32			A29	A30
Inclusiones		A50	A51		
Tamaño (µm)		5x4	5x4		
Familia		F1	F1		
Ubicación	i	b	b	c	b
SiO <sub>2</sub>	38.35	54.63	55.00	38.62	38.61
TiO <sub>2</sub>	0.00	2.14	1.77	0.00	0.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	17.00	15.93	0.04	0.02
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	-	-	0.03	0.05
FeO	21.06	4.82	6.07	21.65	20.96
MnO	0.33	0.16	0.09	0.34	0.31
MgO	39.95	2.16	4.83	39.74	40.50
CaO	0.26	10.59	9.76	0.20	0.25
Na <sub>2</sub> O	-	3.45	3.60	-	-
K <sub>2</sub> O	-	0.92	0.89	-	-
NiO	0.00	-	-	0.11	0.07
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0.28	0.12	-	-
ZnO	0.00	-	-	0.00	0.00
SrO		0.04	0.32		
Cl	-	0.10	0.04	-	-
Total	99.98	96.30	98.42	100.73	100.77

Tabla 8.2: Elementos mayores y menores del cristal de olivino NV10-oliB y NV10-oliC, medidos en EMPA, con las respectivas inclusiones vítreas del cristal. "-" indica elemento no medido. La unidad de medida es % wt. de óxidos.

CRISTAL	NV10-oliB				NV10-oliC			
	B_OI1		B_OI3	B_OI2	C_OI16		C_OI17	C_OI18
Puntos Cristal	B-46				C-41			
Inclusiones	16x14				16x15			
Tamaño (µm)	F1				F1			
Familia	b	b	c	b	b	b	b	i
Ubicación								
SiO <sub>2</sub>	38.12	54.62	38.12	38.24	53.63	38.31	37.38	38.46
TiO <sub>2</sub>	0.03	1.61	0.00	0.06	1.58	0.04	0.06	0.01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	17.92	0.06	0.10	16.87	0.04	0.10	0.03
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	-	0.07	0.06	-	0.00	0.02	0.01
FeO	21.23	6.73	22.04	21.26	6.62	21.15	26.96	21.36
MnO	0.29	0.03	0.28	0.31	0.25	0.26	0.49	0.47
MgO	40.04	1.58	39.42	39.16	1.55	40.32	35.28	40.08
CaO	0.25	10.62	0.22	0.23	11.20	0.24	0.35	0.27
Na <sub>2</sub> O	-	3.67	-	-	3.97	-	-	-
K <sub>2</sub> O	-	0.91	-	-	0.75	-	-	-
NiO	0.09	-	0.04	0.02	-	0.13	0.00	0.05
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0.22	-	-	0.29	-	-	-
ZnO	-	-	-	-	-	-	-	-
SrO	0.00	0.00	0.00	0.03	0.17	0.00	0.09	0.00
Cl	-	0.09	-	-	0.00	-	-	-
Total	100.06	98.00	100.25	99.47	96.89	100.49	100.73	100.75

Tabla 8.3: Elementos mayores y menores del cristal de olivino NV10-oliD y NV10-oliF, medidos en EMPA, con las respectivas inclusiones vítreas del cristal. "-" indica elemento no medido. La unidad de medida es % wt. de óxidos

CRISTAL	NV10-oliD				NV10-oliF		
	D_OI15		D_OI13		U_OI20		
Puntos Cristal	D-43		D-49		F-39		F-40
Inclusiones	13X12		11X8		5x4		5x4
Tamaño (µm)	F1		F1		F1		F1
Familia	b	b	i	i	b	b	b
Ubicación							
SiO <sub>2</sub>	37.26	54.38	38.43	56.73	38.01	54.92	56.91
TiO <sub>2</sub>	0.00	2.42	0.03	1.52	0.03	1.68	1.75
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	17.68	0.04	17.51	0.02	16.99	17.47
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	-	0.02	-	0.00	-	-
FeO	21.98	6.22	21.53	5.61	21.29	5.38	4.88
MnO	0.36	0.06	0.46	0.03	0.40	0.12	0.09
MgO	39.94	1.41	40.61	1.22	40.08	2.05	1.36
CaO	0.27	11.56	0.24	11.31	0.27	10.67	10.40
Na <sub>2</sub> O	-	3.17	-	3.54	-	3.67	4.09
K <sub>2</sub> O	-	1.02	-	0.67	-	0.70	0.83
NiO	0.04	-	0.08	-	0.06	-	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0.12	-	0.21	-	0.22	0.31
ZnO	-	-	-	-	-	-	-
SrO	0.00	0.00	0.00	0.05	0.11	0.33	0.00
Cl	-	0.09	-	0.06	-	0.06	0.04
Total	99.86	98.12	101.43	98.47	100.26	96.78	98.13

Tabla 8.4: Elementos mayores y menores del cristal de olivino NV10-olil, medidos en EMPA, con las respectivas inclusiones vítreas del cristal. "-" indica elemento no medido. La unidad de medida es % wt. de óxidos

CRISTAL	NV10-olil				
	I-10	I-6	I-8	I-9	I-11
Puntos Cristal					
Inclusiones		I-6			
Tamaño (µm)		16x16			
Familia		F1			
Ubicación	b	b	c	b	i
SiO <sub>2</sub>	38.04	54.57	37.65	38.30	38.34
TiO <sub>2</sub>	0.00	2.18	0.00	0.01	0.01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	15.80	0.02	0.01	0.03
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	-	0.05	0.02	0.00
FeO	22.20	8.09	22.90	21.27	22.10
MnO	0.40	0.22	0.36	0.26	0.40
MgO	39.12	1.66	38.57	39.66	38.89
CaO	0.25	10.75	0.28	0.24	0.23
Na <sub>2</sub> O	-	3.18	-	-	-
K <sub>2</sub> O	-	1.00	-	-	-
NiO	0.13	-	0.10	0.09	0.00
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0.40	-	-	-
ZnO	0.03	-	0.07	0.07	0.00
SrO		0.02			
Cl	-	0.10	-	-	-
Total	100.16	97.97	100.00	99.92	100.01

Tabla 8.5: Elementos mayores y menores del cristal de olivino NV10-oliK, medidos en EMPA, con las respectivas inclusiones vítreas del cristal. "-" indica elemento no medido. La unidad de medida es % wt. de óxidos

CRISTAL	NV10-oliK				
Puntos Cristal	K.15		K12	K13	K14
Inclusiones		K-52			
Tamaño (µm)		16x11			
Familia		F1			
Ubicación	c	c			
SiO <sub>2</sub>	38.51	55.56	38.47	38.43	38.32
TiO <sub>2</sub>	0.00	1.84	0.04	0.05	0.05
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	15.96	0.02	0.03	0.04
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	-	0.03	0.00	0.00
FeO	21.52	7.39	20.41	21.16	21.36
MnO	0.26	0.31	0.31	0.34	0.38
MgO	39.99	1.55	40.46	40.02	39.76
CaO	0.27	11.04	0.23	0.26	0.27
Na <sub>2</sub> O	-	3.28	-	-	-
K <sub>2</sub> O	-	0.85	-	-	-
NiO	0.21	-	0.06	0.06	0.04
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0.21	-	-	-
ZnO	0.03	-	0.09	0.03	0.00
SrO		0.14			
Cl	-	0.00	-	-	-
Total	100.80	98.13	100.12	100.37	100.22

Tabla 8.6: Elementos mayores y menores del cristal de olivino NV10-oliK, medidos en EMPA, con las respectivas inclusiones vítreas del cristal. "-" indica elemento no medido. La unidad de medida es % wt. de óxidos

CRISTAL	NV10-oliL						
	L-19		L-20		L16	L17	L18
Puntos Cristal							
Inclusiones	L-35		L-36				
Tamaño (µm)	20x10		13x9				
Familia	F1		F1		c	i	b
Ubicación	i	i	i	i			
SiO <sub>2</sub>	38.10	57.79	38.53	3.34	38.50	38.41	38.41
TiO <sub>2</sub>	0.02	1.53	0.01	1.41	0.04	0.08	0.08
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	16.78	0.04	57.51	0.03	0.01	0.01
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	-	0.04	16.91	0.01	0.04	0.04
FeO	21.14	5.90	21.35	0.89	21.48	20.94	20.94
MnO	0.38	0.31	0.30	9.72	0.38	0.40	0.40
MgO	40.13	1.79	40.06	1.45	40.05	40.26	40.26
CaO	0.23	9.91	0.18	0.03	0.19	0.23	0.23
Na <sub>2</sub> O	-	3.64	-	0.08	-	-	-
K <sub>2</sub> O	-	0.84	-	0.22	-	-	-
NiO	0.05	-	0.09	5.52	0.03	0.08	0.08
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0.28	-	0.00	-	-	-
ZnO	0.00	-	0.06	-	0.00	0.01	0.01
SrO		0.00		-			
Cl	-	0.03	-	-	-	-	-
Total	100.06	98.80	100.65	97.08	100.73	100.45	100.45

Tabla 8.7: Elementos mayores y menores del cristal de olivino NV10-oliO, medidos en EMPA, con las respectivas inclusiones vítreas del cristal. "-" indica elemento no medido. La unidad de medida es % wt. de óxidos

CRISTAL	NV10-oliO					
	O25		O28		O24	O23
Puntos Cristal						
Inclusiones	O-33		O-34			
Tamaño (µm)	23x17		22x10			
Familia	F1		F1			
Ubicación	i	i	i	i	b	c
SiO <sub>2</sub>	38.63	53.63	38.49	54.57	37.93	38.65
TiO <sub>2</sub>	0.01	1.35	0.00	1.23	0.04	0.08
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	17.35	0.08	17.62	0.01	0.00
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	-	0.00	-	0.04	0.00
FeO	21.12	7.66	20.88	7.29	21.93	21.18
MnO	0.36	0.12	0.36	0.23	0.35	0.35
MgO	39.90	1.76	40.15	1.37	39.60	39.83
CaO	0.20	10.39	0.20	10.49	0.22	0.21
Na <sub>2</sub> O	-	3.80	-	3.81	-	-
K <sub>2</sub> O	-	0.48	-	0.64	-	-
NiO	0.14	-	0.09	-	0.09	0.02
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0.19	-	0.16	-	-
ZnO	0.04	-	0.00	-	0.08	0.10
SrO		0.08		0.12		
Cl	-	0.35	-	0.09	-	-
Total	100.43	97.15	100.26	97.61	100.29	100.43

Tabla 8.8: Elementos mayores y menores del cristal de olivino NV10-oliP, medidos en EMPA, con las respectivas inclusiones vítreas del cristal. "-" indica elemento no medido. La unidad de medida es % wt. de óxidos

CRISTAL	NV10-oliP				
	P-3	P-4		P-1	P-2r
Puntos Cristal					
Inclusiones			P54		
Tamaño (µm)			5x4		
Familia			F1		
Ubicación	b	b	b	c	b
SiO <sub>2</sub>	37.41	37.26	57.19	37.75	37.96
TiO <sub>2</sub>	0.00	0.00	1.77	0.00	0.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.06	0.05	17.90	0.01	0.03
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.05	0.01	-	0.01	0.05
FeO	20.99	21.39	5.55	20.71	23.56
MnO	0.36	0.35	0.10	0.32	0.41
MgO	40.15	40.01	1.39	40.05	38.18
CaO	0.17	0.19	10.57	0.21	0.24
Na <sub>2</sub> O	-	-	3.72	-	-
K <sub>2</sub> O	-	-	0.76	-	-
NiO	0.14	0.15	-	0.06	0.13
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	-	0.22	-	-
ZnO	0.00	0.04	-	0.07	0.10
SrO	-	-	0.00	-	-
Cl	-	-	0.06	-	-
Total	99.32	99.45	99.22	99.18	100.65

Tabla 8.9: Elementos mayores y menores del cristal de olivino NV10-oliG, medidos en EMPA, con las respectivas inclusiones vítreas del cristal. "-" indica elemento no medido. La unidad de medida es % wt. de óxidos

CRISTAL	NV10-oliG (PERFIL ZONACION)					
Puntos Cristal	G_OI 7	G_OI 8	G_OI 9	G_OI 10	G_OI 11	G_OI 12
Inclusiones						
Tamaño (µm)						
Familia						
Ubicación	b	b	i	c	i	b
SiO <sub>2</sub>	37.44	38.07	38.02	38.66	38.75	38.51
TiO <sub>2</sub>	0.00	0.04	0.05	0.00	0.02	0.01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.15	0.09	0.06	0.00	0.01	0.05
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.02	0.00	0.04	0.03	0.02
FeO	24.90	21.97	21.15	21.35	21.50	21.07
MnO	0.32	0.30	0.40	0.34	0.46	0.41
MgO	37.24	39.84	39.72	40.43	39.55	40.60
CaO	0.30	0.23	0.27	0.25	0.30	0.27
Na <sub>2</sub> O	-	-	-	-	-	-
K <sub>2</sub> O	-	-	-	-	-	-
NiO	0.00	0.11	0.07	0.02	0.05	0.06
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	-	-	-	-	-
ZnO	-	-	-	-	-	-
SrO	0.00	0.00	0.00	0.03	0.06	0.00
Cl	-	-	-	-	-	-
Total	100.36	100.67	99.74	101.12	100.74	101.01

Tabla 8.10: Elementos mayores y menores del cristal de olivino NV10-oliR y NV10-oliU, medidos en EMPA, con las respectivas inclusiones vítreas del cristal. "-" indica elemento no medido. La unidad de medida es % wt. de óxidos

CRISTAL	NV10-oliR				NV10-oliU	
Puntos Cristal	R_OI25		R_OI26		U_OI19	
Inclusiones	R-11		R-12		U-1	
Tamaño (µm)	61x49		27x19		47x40	
Familia	F1		F2		F1	
Ubicación	b	b	c	c	c	c
SiO <sub>2</sub>	38.23	50.07	37.97	53.08	37.90	53.68
TiO <sub>2</sub>	0.02	2.10	0.03	1.98	0.00	1.87
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.03	16.26	0.07	18.07	0.11	17.76
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.06	-	0.05	-	0.00	-
FeO	21.86	8.97	21.32	7.84	21.20	9.23
MnO	0.37	0.19	0.40	0.28	0.30	0.15
MgO	40.16	2.70	39.95	1.94	40.52	2.54
CaO	0.28	9.86	0.18	8.10	0.21	10.83
Na <sub>2</sub> O	-	3.85	-	4.21	-	3.49
K <sub>2</sub> O	-	0.86	-	1.29	-	0.58
NiO	0.00	-	0.09	-	0.05	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0.11	-	0.17	-	0.17
ZnO	-	-	-	-	-	-
SrO	0.04	-	0.01	-	0.09	-
Cl	-	0.06	-	0.04	-	0.05
Total	101.05	95.03	100.06	97.00	100.38	100.34

Tabla 8.11: Elementos mayores y menores del cristal de olivino NV10-oliS, medidos en EMPA, con las respectivas inclusiones vítreas del cristal. "-" indica elemento no medido. La unidad de medida es % wt. de óxidos

CRISTAL	NV10-oliS				
	S_OI27			S_OI28	
Puntos Cristal					
Inclusiones	S-8		S-9	S-10	
Tamaño (µm)	40x26		20x14	22x16	
Familia	F1		F2	F1	
Ubicación	b	b	b	b	b
SiO <sub>2</sub>	38.12	52.31	55.21	38.42	52.12
TiO <sub>2</sub>	0.06	1.15	1.65	0.00	1.99
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	17.33	17.63	0.06	18.30
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.03	-	-	0.01	-
FeO	21.91	8.29	6.03	21.59	7.37
MnO	0.42	0.14	0.10	0.27	0.06
MgO	40.32	2.21	2.01	40.35	2.15
CaO	0.22	10.53	10.02	0.22	10.10
Na <sub>2</sub> O	-	3.78	3.94	-	4.17
K <sub>2</sub> O	-	1.11	1.01	-	0.81
NiO	0.04	-	-	0.13	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0.12	0.15	-	0.06
ZnO	-	-	-	-	-
SrO	0.02	-	-	0.00	-
Cl	-	0.04	0.04	-	0.06
Total	101.17	97.00	97.79	101.05	97.19

Tabla 8.12: Elementos mayores y menores del cristal de olivino NV10-oliR y NV10-oliU, medidos en EMPA, con las respectivas inclusiones vítreas del cristal. "-" indica elemento no medido. La unidad de medida es % wt. de óxidos

CRISTAL	NV10-oliQ1			NV10-oliQ2		
Puntos Cristal	Q_OI30		Q-32	Q_OI31		
Inclusiones	Q-3 Q-4			Q-6		
Tamaño (µm)	30x22 20x18			18x20		
Familia	F1 F2			F1		
Ubicación	c	c	c	b	b	b
SiO <sub>2</sub>	38.44	53.53	53.64	38.62	38.58	3.89
TiO <sub>2</sub>	0.08	2.31	2.11	0.07	0.00	2.23
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.04	17.01	16.48	0.04	0.07	54.41
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.06	-	-	0.00	0.01	17.55
FeO	21.51	6.81	8.29	21.40	21.63	0.8014
MnO	0.39	0.12	0.20	0.39	0.36	10.51
MgO	40.39	2.20	2.18	40.77	40.50	1.496
CaO	0.31	10.45	10.51	0.19	0.25	0.1909
Na <sub>2</sub> O	-	3.81	3.63	-	-	0.0451
K <sub>2</sub> O	-	0.55	0.62	-	-	0.2176
NiO	0.05	-	-	0.19	0.11	6.63
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0.33	0.12	-	-	-
ZnO	-	-	-	-	-	-
SrO	0.00	-	-	0.00	0.00	-
Cl	-	0.03	0.06	-	-	-
Total	101.27	97.15	97.84	101.67	101.50	97.971

Tabla 8.13: Elementos trazas del cristal de olivino NV10-oliA, medidos en LA-ICP-MS, junto a sus respectivas inclusiones. "-" indica elemento bajo el límite de detección. Unidad medida en ppm.

Puntos		A-32		
Inclusiones			A-50	A-51
Li		0	-	-
Sc		120	-	-
V		39	15	14
Cr		180	-	240
Co		270	257	250
Ni		1060	650	720
Cu	C	47	11	-
Zn	R	860	210	300
Ga	I	-	-	-
Rb	S	-	18	0.3
Sr	T	31	48	0
Y	A	1.7	-	-
Zr	L	4	7	0
Nb	N	2.2	0	-
Cd	V	0.17	0.05	0.05
Sn	1	-	38	-
Cs	0	-	-	14
Ba		35	-	-
La	O	-	-	-
Ce	L	5.1	0	2.2
Pr	I	2.1	0	1
Nd		7	21	0
Sm	A	0	0	32
Eu		-	-	-
Gd		-	-	-
Tb		-	-	-
Dy		-	0	0
Ho		0	0	1.3
Er		4	0	0
Tm		0	0	-
Yb		0	0	0
Lu		0	0	0
Hf		0	-	-
Ta		0	-	-
Pt		-	-	-
Pb		-	-	2
Th		0	0	0
U		8	0	0

Tabla 8.14: Elementos trazas del cristal de olivino NV10-oliB, medidos en LA-ICP-MS, junto a sus respectivas inclusiones. Además, se adjunta información de cristal de plagioclasa NV10-p1B. "-" indica elemento bajo el límite de detección. Unidad medida en ppm.

Puntos		B_O11			P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7		
Inclusiones			B-46										
Li	C R I S T A L	54	690	P E R F I L	140	137	105	70	121	44	95		
Sc		6.4	68		8.9	0.9	17.7	5.4	3	-	1.4		
V		6.5	343		13.6	5.3	9.5	4.5	3.9	2.1	4.3		
Cr		121	258		30	-	-	-	12	7	-		
Co		157	33		27.3	0.6	-	0.2	0.3	1.2	2.7		
Ni		545	46		67	0	0	0	1.2	0	0		
Cu		8	140		9.6	0.1	5.4	4.5	1.5	0.3	7.1		
Zn		174	60		26	7	12	8.1	-	8	0.7		
Ga		-	28		12	17.2	14	14.4	13.7	18.2	19.5		
Rb		0.26	16.6		1.1	0.8	-	2	0.4	0.3	1.2		
Sr		0	520		601	539	574	555	554	622	641		
Y		0	31		0	0	0	0	0	0	0		
Zr		0	96		0	0	0	0	0	0	0		
Nb		0	1.3		0	0	0	0	0	0	0		
Cd		-	-		-	-	-	-	-	-	-		
Sn		N V 1 0  O L I B	-		7.1	C R I S T A L	-	-	-	-	-	-	-
Cs			0.38		0.26		0.13	0.06	0.2	0.02	-	-	-
Ba			0		288		33	28.7	26.7	35	36	22	25
La			0		13.4		0	0.11	0	0.45	0.32	0.3	0.12
Ce			0		28.3		1.34	0.24	1.41	0.81	0.35	1.18	1.52
Pr	0		3	0	0		0	0	0	0	0		
Nd	0		14.1	0	0		0	0	0	0	0		
Sm	0		9.9	0	0		0	0	0	0	0		
Eu	0		1.3	0	0		0	0	0	0	0		
Gd	0		7	0	0		0	0	0	0	0		
Tb	0		1.1	0	0		0	0	0	0	0		
Dy	0		9.4	0.7	0		0	0	0	0	0		
Ho	0		1.01	0	0		0	0	0	0	0		
Er	0		3.3	0	0		0	0	0	0	0		
Tm	0		0	0	0		0	0	0	0	0		
Yb	0		13.7	0	0		0	0	0	0	0		
Lu	0		0.23	0	0		0	0	0	0	0		
Hf	0		3.6	0	0		0	0	0	0	0		
Ta	0		0.2	0	0		0	0	0	0	0		
Pt	-		-	-	-		-	-	-	-	-		
Pb	0.29	5.2	0.5	0	0	0	1.4	0	0.4				
Th	0	0.85	0	0	0	0	0	0	0				
U	0	0.64	0	0	0	0	0	0	0				

Tabla 8.15: Elementos trazas del cristal de olivino NV10-oliC y oliD, medidos en LA-ICP-MS, junto a sus respectivas inclusiones. Además, se adjunta información de cristal de plagioclasa NV10-pIB. "-" indica elemento bajo el límite de detección. Unidad medida en ppm.

Puntos		C_OI16			D_OI15		D_OI13	
Inclusiones			C-41			D-43		D-49
Li		30	140		120	100	190	90
Sc		26.5	77		23	58	4	30
V		11.2	570		8.2	400	4	194
Cr		196	430		169	260	205	410
Co		160	81		159	125	151	175
Ni		730	200		622	540	700	490
Cu		13.8	117		3.9	28	18	22
Zn	C	210	190	C	215	150	230	102
Ga	R	-	42	R	-	22	-	17
Rb	I	1.6	32	I	-	23.4	-	8.3
Sr	S	0	600	S	0	580	0	360
Y	T	0	35	T	0	34	0	22
Zr	A	0	138	A	0	142	0	70
Nb	L	0	1.9	L	0	5.4	0	6
Cd	N	-	-	N	-	-	-	-
Sn	V	0.4	3.5	V	-	-	-	5
Cs	1	-	0.7	1	-	0.6	-	1.4
Ba	0	0	297	0	0	270	0	230
La		0	13.4		0	11	0	8.7
Ce	O	0	42	O	0	40	0	32
Pr	L	0	5.4	L	0	4.5	0	1.9
Nd	I	0	29	I	0	4.4	0	11
Sm		0	27		0	0	0	7
Eu	C	0	0	D	0	2.9	0	0
Gd		0	16		0	5	0	0
Tb		0	0		0	0	0	0
Dy		0	0		0	24	0	6
Ho		0	0		0	3.9	0	0
Er		0	4.8		0	0	0	0
Tm		0	2.8		0	3.8	0	0
Yb		0	16		0	11	0	0
Lu		0	1.7		0	1.3	0	1.2
Hf		0	0		0	3.2	0	0
Ta		0	0		0	0	0	0
Pt		-	-		-	-	-	-
Pb		0	6.1		0	1.2	0	2.1
Th		0	4		0	0	0	0.8
U		0	1.5		0	1.2	0	0

Tabla 8.16: Elementos trazas del cristal de olivino NV10-oliF y NV10-oliG, medidos en LA-ICP-MS, junto a sus respectivas inclusiones. Además, se adjunta información de cristal de plagioclasa NV10-pIB. "-" indica elemento bajo el límite de detección. Unidad medida en ppm.

Puntos			P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
Inclusiones	F-40									
Li	-		23	39	-	36	36	6	22	10
Sc	15		6.8	9.8	10.6	14.2	16.9	8.3	8.8	10.1
V	211		4.6	4.6	6.9	8.1	9	10.4	6.8	7.6
Cr	770		147	153	174	193	134	155	129	168
Co	211		178	200	190	177	194	158	184	192
Ni	850		621	606	611	658	573	586	634	700
Cu	230		6.5	3.5	9	6.5	10.1	6.4	2.5	7.5
Zn	80		243	218	178	145	230	188	194	246
Ga	20	C	0.5	2.1	0.4	-	2	0.3	0.4	0.7
Rb	20	R	-	-	-	-	-	0.4	0.5	0.09
Sr	340	S	0	0	0	0	0	0	0	0
Y	21	Y	0	0	0	0	0	0	0	0
Zr	67	Z	0	0	0	0	0	0	0	0
Nb	0	N	0	0	0	0	0	0	0	0
Cd	-	C	-	-	-	-	-	-	-	-
Sn	6	S	-	-	-	-	-	-	-	-
Cs	-	C	0.14	0.51	0.05	0.15	0.16	0.45	0	0.3
Ba	35	B	0	0	0	0	0	0	0	0
La	6.3	L	0	0	0	0	0	0	0	0
Ce	20	C	0	0	0	0	0	0	0	0
Pr	0	P	0	0	0	0	0	0	0	0
Nd	34	N	0	0	0	0	0	0	0	0
Sm	0	S	0	0	0	0	0	0	0	0
Eu	0	E	0	0	0	0	0	0	0	0
Gd	0	G	0	0	0	0	0	0	0	0
Tb	0	T	0	0	0	0	0	0	0	0
Dy	0	D	0	0	0	0	0	0	0	0
Ho	0	H	0	0	0	0	0	0	0	0
Er	0	E	0	0	0	0	0	0	0	0
Tm	0	T	0	0	0	0	0	0	0	0
Yb	0	Y	0	0	0	0	0	0	0	0
Lu	0	L	0	0	0	0	0	0	0	0
Hf	12	H	0	0	0	0	0	0	0	0
Ta	0	T	0	0	0	0	0	0	0	0
Pt	-	P	-	-	-	-	-	-	-	-
Pb	0	P	0	0	0.33	0	0	0	0	0.3
Th	0	T	0	0	0	0	0	0	0	0
U	0	U	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 8.17: Elementos trazas del cristal de olivino NV10-oliI, NV10-oliK y NV10-oliL, medidos en LA-ICP-MS, junto a sus respectivas inclusiones. Además, se adjunta información de cristal de plagioclasa NV10-pIB. "-" indica elemento bajo el límite de detección. Unidad medida en ppm.

Puntos	I-10		K-15		L19
Inclusiones	I-6		K-52		
Li	2.6	17	7.4	13.9	3.8
Sc	17.4	42	15.2	26.8	62
V	5.1	54	8.9	128	2520
Cr	120	83	125	155	174
Co	197	245	200	205	-
Ni	640	810	616	595	0.6
Cu	4.9	21	4.2	35	52
Zn	199	292	189	194	-
Ga	-	2.7	-	4	0
Rb	-	1.5	-	-	-
Sr	0	18	0.17	128	-
Y	0	3	0.11	8.9	-
Zr	-	11	0.14	30	-
Nb	0	1	0.05	0.48	-
Cd	-	-	-	-	-
Sn	0	-	0.07	2	-
Cs	0.27	0.47	-	0.54	-
Ba	0	24	0	84	0
La	0	0.9	0	2.2	-
Ce	-	2.2	0	10.7	0
Pr	0	0	0.058	1.16	0
Nd	-	0	0	4.9	-
Sm	-	-	0	1	0
Eu	0	-	0	0.37	-
Gd	0	0.4	0	1.4	0
Tb	0	0	-	0.1	-
Dy	-	-	0	0.77	-
Ho	0	0	0	0.23	-
Er	0	0	-	0.59	-
Tm	-	0	0	0.15	-
Yb	0	0	-	0.09	9
Lu	0	0	0	0.31	-
Hf	0	-	0	0.27	0
Ta	0	0	-	0.06	0
Pt	0	26	0	0	-
Pb	0.69	2.1	0.02	3.1	-
Th	0	0.13	0	0.37	-
U	0	0	0	0.3	-

Tabla 8.18: Elementos trazas del cristal de olivino NV10-oliO y NV10-oliP, medidos en LA-ICP-MS, junto a sus respectivas inclusiones. Además, se adjunta información de cristal de plagioclasa NV10-pIB. "-" indica elemento bajo el límite de detección. Unidad medida en ppm.

Puntos		O-25				P-4	
Inclusiones			O-33	O-34		P-53	P-54
Li		2.7	4.7	11.1		6	24
Sc		10.9	37.5	46		10	21
V		5.7	416	350		6.3	-
Cr		112	66	55		290	236
Co		164	14.4	44.2		234	267
Ni		633	10.3	82		900	1060
Cu		3.6	400	290		-	-
Zn		237	89	156		360	370
Ga	C	-	22.3	20.7	C	3.5	0.3
Rb	R	0.03	13.2	13.6	R	-	-
Sr	I	0	566	432	I	0.29	2.1
Y	S	-	26	28.5	S	0	0.9
Zr	T	-	92	73	T	-	0.7
Nb	A	0	3.6	2.2	A	0.37	0
Cd	L	0	0.043	0.07	L	-	-
Sn	N	-	12	11	N	-	-
Cs	V	0.29	4.7	0.7	V	2.3	-
Ba	1	0	254	185	1	-	-
La	0	0	12.2	6	0	0	0
Ce	O	0	29	17.9	O	-	0
Pr		-	4.4	3.3		-	-
Nd		-	18.1	11.8		-	0
Sm		-	4.9	1.4		0	0
Eu		-	1.05	0.46		0	0
Gd		-	3.4	9.2		0	0
Tb		-	0.56	0.54		-	-
Dy		0	4.1	3.2		-	0
Ho		0	1.53	1.05		0	0
Er		-	2.1	2.8		0	-
Tm		0	0.2	0.53		-	0
Yb		-	3.1	1.9		0	0
Lu		-	0.2	-		0	0
Hf		-	2.5	1.5		0	0
Ta		-	0.06	-		0	-
Pt		-	-	-		0	0
Pb		-	59	32		-	1.7
Th		0	2	2.1		0	0
U		0	0.62	0.56		0	0

### 8.3.2. MINERAL: PLAGIOCLASA EN CORTE TRANSPARENTE NV10

Tabla 8.19: Elementos mayores y menores de los cristales de plagioclasa NV10-plgB/C/D y E, medidos en EMPA. "-" indica elemento no medido. La unidad de medida es % wt. de óxidos.

Crystal	Punto EMPA	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	BaO	SrO	Total
NV10-plgB	NV10_B_PI 1	51.56	0.28	29.60	0.71	0.00	0.21	13.63	3.73	0.14	0.02	0.12	0.01	100.02
NV10-plgB	NV10_B_PI 2	48.44	0.00	31.57	0.82	0.06	0.12	15.59	2.73	0.07	0.03	0.00	0.07	99.51
NV10-plgB	NV10_B_PI 3	47.10	0.03	32.44	0.79	0.00	0.22	16.32	2.28	0.07	0.03	0.50	0.06	99.85
NV10-plgC	NV10_PI C 4	52.87	0.25	28.71	1.02	0.00	0.21	12.75	4.36	0.14	0.06	0.37	0.07	100.82
NV10-plgC	NV10_PI C 5	47.84	0.00	32.13	0.75	0.03	0.14	16.51	2.20	0.07	0.00	0.00	0.19	99.86
NV10-plgC	NV10_PI C 6	46.35	0.16	32.99	0.61	0.05	0.09	17.28	1.77	0.06	0.00	0.00	0.04	99.40
NV10-plgC	NV10_PI C 7	45.89	0.00	33.22	0.56	0.05	0.12	17.82	1.36	0.05	0.05	0.00	0.09	99.20
NV10-plgC	NV10_PI C 8	46.78	0.00	32.83	0.69	0.00	0.14	17.19	1.81	0.05	0.03	0.13	0.13	99.78
NV10-plgC	NV10_PI C 9	46.92	0.28	32.75	0.56	0.15	0.10	17.22	1.86	0.03	0.00	0.00	0.00	99.87
NV10-plgF	NV10_F_PI 10	48.75	0.12	31.42	1.10	0.06	0.26	15.35	2.83	0.06	0.00	0.13	0.11	100.20
NV10-plgF	NV10_F_PI 11	47.36	0.00	32.47	0.71	0.00	0.20	16.77	2.17	0.06	0.04	0.00	0.03	99.80
NV10-plgD	NV10_PI D 12	53.21	0.00	28.55	1.08	0.08	0.22	12.46	4.49	0.17	0.00	0.31	0.08	100.64
NV10-plgD	NV10_PI D 13	49.42	0.09	30.94	0.78	0.08	0.18	15.25	2.85	0.12	0.00	0.25	0.05	100.01
NV10-plgD	NV10_PI D 14	46.97	0.31	31.91	0.69	0.00	0.14	16.25	2.01	0.05	0.01	0.00	0.05	98.39
NV10-plgD	NV10_PI D 15	46.13	0.22	33.13	0.77	0.02	0.09	17.23	1.76	0.06	0.04	0.13	0.00	99.58
NV10-plgD	NV10_PI D 16	46.35	0.13	33.24	0.62	0.00	0.08	17.92	1.53	0.04	0.01	0.00	0.00	99.92
NV10-plgD	NV10_PI D 17	46.58	0.06	33.22	0.74	0.05	0.08	17.36	1.58	0.05	0.01	0.13	0.00	99.86
NV10-plgD	NV10_PI D 18	46.32	0.09	33.76	0.53	0.05	0.11	17.79	1.58	0.05	0.04	0.00	0.00	100.33
NV10-plgE	NV10_PI E 19	52.55	0.13	29.28	0.86	0.00	0.24	13.22	3.91	0.12	0.00	0.25	0.14	100.70
NV10-plgE	NV10_PI E 20	47.99	0.25	32.19	0.60	0.10	0.11	16.06	2.24	0.08	0.02	0.00	0.05	99.69
NV10-plgE	NV10_PI E 21	47.58	0.16	32.54	0.74	0.00	0.12	16.72	2.01	0.05	0.00	0.00	0.09	100.00

Tabla 8.20: Elementos mayores y menores de los cristales de plagioclasa NV10-plgH/F/Q1/Q2/Q3/Q4/Q5 y los microlitos MIC1 y MIC2, medidos en EMPA. "-" indica elemento no medido. La unidad de medida es % wt. de óxidos.

Cristal	Punto EMPA	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	BaO	SrO	Total
NV10-plgH	NV10_H_PI 22	52.75	0.19	28.68	1.08	0.00	0.25	12.60	3.92	0.16	0.00	0.25	0.00	99.88
NV10-plgH	NV10_H_PI 23	48.33	0.00	31.64	0.86	0.02	0.18	16.05	2.47	0.06	0.05	0.31	0.00	99.99
NV10-plgH	NV10_H_PI 24	49.17	0.06	31.22	0.89	0.00	0.16	15.28	2.62	0.07	0.01	0.06	0.00	99.54
NV10-plgH	NV10_H_PI 25	48.15	0.00	32.10	0.94	0.00	0.13	16.09	2.19	0.05	0.00	0.00	0.03	99.69
NV10-plgH	NV10_H_PI 26	47.37	0.41	32.51	0.90	0.02	0.16	16.16	2.10	0.07	0.00	0.00	0.22	99.90
NV10-plgH	NV10_H_PI 27	47.21	0.19	32.89	0.88	0.00	0.07	17.10	2.02	0.04	0.00	0.00	0.00	100.40
NV10-plgF	NV10_PI F 28	52.79	0.19	28.54	0.66	0.04	0.22	12.43	4.46	0.20	0.02	0.38	0.02	99.95
NV10-plgF	NV10_PI F 29	47.70	0.00	32.47	0.74	0.00	0.11	16.44	2.04	0.05	0.04	1.06	0.00	100.66
NV10-plgF	NV10_PI F 30	48.93	0.16	31.49	0.78	0.05	0.17	15.64	2.78	0.08	0.01	0.19	0.04	100.31
NV10-plgF	NV10_PI F 31	47.40	0.00	32.49	0.47	0.00	0.15	16.33	2.11	0.08	0.01	0.13	0.03	99.20
NV10-plgF	NV10_PI F 32	47.13	0.00	33.00	0.60	0.00	0.08	16.74	1.97	0.05	0.05	0.31	0.00	99.94
NV10-plgF	NV10_PI F 33	45.00	0.00	34.23	0.42	0.00	0.07	18.62	1.04	0.00	0.00	0.00	0.12	99.51
NV10-plgF	NV10_PI F 34	45.70	0.19	33.30	0.50	0.01	0.09	17.99	1.35	0.03	0.01	0.00	0.10	99.27
NV10-plgF	NV10_PI F 35	46.46	0.09	33.33	0.56	0.00	0.09	17.54	1.76	0.01	0.03	0.00	0.13	100.01
NV10-plgQ1	NV10_Q_PI 36	48.57	0.03	32.17	0.86	0.04	0.19	16.16	2.46	0.08	0.03	0.13	0.04	100.76
NV10-plgQ1	NV10_Q_PI 37	47.91	0.25	31.98	0.67	0.09	0.26	16.07	2.09	0.06	0.00	0.00	0.00	99.38
NV10-plgQ2	NV10_Q_PI 38	47.59	0.00	32.65	0.87	0.04	0.23	16.71	2.10	0.06	0.03	0.06	0.15	100.50
NV10-plgQ2	NV10_Q_PI 39	48.68	0.06	31.67	0.78	0.00	0.30	15.85	2.26	0.03	0.00	0.13	0.10	99.85
NV10-plgQ3	NV10_Q_PI 40	46.80	0.00	32.16	0.99	0.01	0.21	16.62	2.09	0.03	0.04	0.00	0.04	98.99
NV10-plgQ3	NV10_Q_PI 41	48.08	0.00	32.35	1.02	0.00	0.27	16.96	2.02	0.05	0.00	0.06	0.04	100.85
NV10-plgQ4	NV10_Q_PI 42	48.48	0.03	31.06	1.06	0.03	0.28	15.57	2.68	0.07	0.05	0.00	0.08	99.40
NV10-plgQ4	NV10_Q_PI 43	48.21	0.00	32.37	1.18	0.02	0.32	16.24	2.37	0.06	0.00	0.00	0.08	100.86
NV10-plgQ5	NV10_Q_PI 44	49.30	0.28	31.66	0.88	0.00	0.27	15.82	2.59	0.08	0.04	0.00	0.07	100.99
NV10-plgQ5	NV10_Q_PI 45	47.24	0.00	32.12	1.16	0.09	0.33	16.19	2.28	0.05	0.00	0.06	0.00	99.53
NV10-plgMIC1	RS - Mic PI 46	52.87	0.43	29.37	0.94	0.04	0.25	12.36	3.78	0.18	0.00	-	-	100.21
NV10-plgMIC2	RS - Mic PI 47	55.84	0.00	28.19	1.15	0.05	0.24	11.20	4.87	0.24	0.01	-	-	101.79

### 8.3.3. MINERAL: PIROXENO EN CORTE TRANSPARENTE NV10

Tabla 8.21: Composición piroxeno en corte transparente NV10. La unidad de medida es % wt. de óxidos.

Cristal	Punto EMPA	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	ZnO	Total
NV10-pxA	NV 10 -U Px 3	51.64	1.20	2.96	0.13	13.74	0.30	18.27	12.46	0.28	0.00	0.14	101.11
NV10-pxB	NV 10 -PI C - Px 4	53.06	0.75	2.61	0.20	11.09	0.36	16.44	16.97	0.35	0.02	0.03	101.88
NV10-pxC	NV 10 -PI C - Px 5	52.26	0.55	1.70	0.02	17.10	0.41	20.01	7.75	0.15	0.02	0.03	100.00
NV10-pxD	NV 10 -PI E - Px 6	53.24	0.50	1.97	0.15	11.92	0.35	18.53	13.74	0.24	0.00	0.00	100.63

### 8.3.4. MINERAL: CROMITA Y TITANOMAGNETITA EN CORTE TRANSPARENTE NV10

Tabla 8.22: Composición cromita y titanomagnetita en corte transparente NV10. La unidad de medida es % wt. de óxidos.

Cristal	Punto EMPA	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	ZnO	NiO	Total
NV10-oxB	NV10_B_Ox 1	0.48	2.97	11.83	25.13	48.88	0.41	7.99	0.00	0.00	0.14	97.83
NV10-oxRS2	NV10_RS óxido 2	0.61	10.64	2.45	0.37	79.49	0.32	1.44	0.32	0.00	0.02	95.65
NV10-oxRS3	NV10_RS óxido 3	1.06	11.10	3.72	0.02	78.44	0.19	1.41	0.33	0.00	0.00	96.27
NV10-oxRS4	NV10_RS óxido 4	0.71	10.60	2.60	0.61	78.47	0.30	1.45	0.33	0.23	0.00	95.30
NV10-oxRS5	NV10_RS óxido 5	0.91	11.38	2.41	0.11	80.35	0.37	1.46	0.29	0.00	0.04	97.31
NV10-oxRS6	NV10_RS óxido 6	0.75	11.39	2.71	0.18	78.59	0.37	1.49	0.27	0.24	0.05	96.06
NV10-oxRS7	NV10_RS óxido 7	16.86	7.83	4.24	0.03	61.21	0.28	1.08	0.92	0.25	0.00	92.70
NV10-oxRS8	NV10_RS óxido 8	1.25	9.41	2.91	0.34	78.38	0.32	1.42	0.50	0.08	0.02	94.63

### 8.3.5. MINERAL: VIDRIO DE LA MATRIZ EN CORTE TRANSPARENTE NV10

*Tabla 8.23: Composición vidrio de la matriz en corte transparente NV10. La unidad de medida es % wt. de óxidos.*

Dato	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cl	Total
Vidrio matriz	61.05	2.30	13.81	8.95	0.17	0.62	4.16	5.37	1.48	0.39	0.19	98.49

### 8.3.6. MINERAL: OLIVINO EN CORTE TRANSPARENTE NV11

Tabla 8.24: Elementos mayores y menores del cristal de olivino NV11-oliA, medidos en EMPA, con las respectivas inclusiones vítreas del cristal. "-" indica elemento no medido. La unidad de medida es % wt. de óxidos

CRISTAL	NV11-oliA					
Puntos Cristal	OI14		OI15		OI16	OI7
Inclusiones	Incl14		Incl15			
Tamaño (µm)	10x5		10x9			
Familia	F1		F1			
Ubicación	b	b	c	b	c	b
SiO <sub>2</sub>	38.28	56.25	38.76	61.88	38.55	38.75
TiO <sub>2</sub>	0.00	2.43	0.00	1.38	0.05	0.03
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.06	18.50	0.02	18.01	0.00	0.04
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	-	0.01	-	0.04	0.00
FeO	21.29	3.07	21.26	3.19	21.39	21.46
MnO	0.30	0.07	0.41	0.06	0.34	0.28
MgO	40.31	0.79	40.21	0.85	40.17	40.03
CaO	0.20	12.40	0.23	10.09	0.17	0.23
Na <sub>2</sub> O	-	4.01	-	4.59	-	-
K <sub>2</sub> O	-	0.90	-	1.15	-	-
NiO	0.13	-	0.10	-	0.06	0.10
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0.34	-	0.09	-	-
ZnO	0.00	-	0.05	-	0.03	0.00
SrO	-	0.01	-	0.30	-	-
Cl	-	0.09	-	0.07	-	-
Total	100.59	98.86	101.04	101.67	100.80	100.93

Tabla 8.25: Elementos mayores y menores del cristal de olivino NV11-oliB, medidos en EMPA, con las respectivas inclusiones vítreas del cristal. "-" indica elemento no medido. La unidad de medida es % wt. de óxidos

CRISTAL	NV11-oliB					
	B_OI10		B_OI11		B_OI12	
Puntos Cristal						
Inclusiones	Incl2		Incl3		Incl4	
Tamaño (µm)	21x16		14x12		16x14	
Familia	F1		F1		F1	
Ubicación	b	b	b	b	b	b
SiO <sub>2</sub>	38.68	56.70	38.54	56.35	38.77	55.78
TiO <sub>2</sub>	0.05	1.61	0.05	1.47	0.02	1.68
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	18.22	0.04	18.98	0.01	18.79
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	-	0.03	-	0.04	-
FeO	21.84	4.25	21.30	3.69	21.00	4.23
MnO	0.34	0.12	0.31	0.00	0.27	0.08
MgO	40.20	1.08	40.91	0.94	40.78	0.92
CaO	0.26	10.81	0.21	12.03	0.25	11.29
Na <sub>2</sub> O	-	4.11	-	3.82	-	3.84
K <sub>2</sub> O	-	1.14	-	0.79	-	0.95
NiO	0.08	-	0.06	-	0.07	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0.37	-	0.35	-	0.37
ZnO	-	-	-	-	-	-
SrO	-	0.09	-	0.03	-	0.00
Cl	-	0.06	-	0.02	-	0.08
Total	101.58	98.57	101.45	98.47	101.26	98.01

Tabla 8.26: Elementos mayores y menores del cristal de olivino NV11-oliC, medidos en EMPA, con las respectivas inclusiones vítreas del cristal. "-" indica elemento no medido. La unidad de medida es % wt. de óxidos

CRISTAL	NV11-oliC			
	OI23		OI24	O25
Puntos Cristal				
Inclusiones		Incl10		
Tamaño (µm)		8x7		
Familia		F1		
Ubicación	b	b	c	b
SiO <sub>2</sub>	38.45	54.69	38.53	38.58
TiO <sub>2</sub>	0.00	1.82	0.03	0.07
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.05	20.26	0.03	0.06
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	-	0.00	0.00
FeO	21.17	4.01	21.15	21.94
MnO	0.35	0.00	0.35	0.30
MgO	40.56	1.26	38.93	39.53
CaO	0.22	12.71	0.24	0.19
Na <sub>2</sub> O	-	2.98	-	-
K <sub>2</sub> O	-	0.49	-	-
NiO	0.08	-	0.10	0.10
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0.32	-	-
ZnO	0.06	-	0.03	0.04
SrO		0.19		
Cl	-	0.07	-	-
Total	100.97	98.81	99.39	100.82

Tabla 8.27: Elementos mayores y menores del cristal de olivino NV11-oliD, medidos en EMPA, con las respectivas inclusiones vítreas del cristal. "-" indica elemento no medido. La unidad de medida es % wt. de óxidos

CRISTAL	NV11-oliD							
Puntos Cristal	OI18		OI19	OI20		OI21		OI22
Inclusiones	Incl12			Incl13		Incl11		
Tamaño (µm)	10x9			9x8		10x9		
Familia	F1			F1		F1		
Ubicación	b	b	b	b	b	b	b	b
SiO <sub>2</sub>	38.01	57.23	38.06	38.23	54.51	38.00	60.01	37.50
TiO <sub>2</sub>	0.04	1.84	0.05	0.06	1.72	0.01	1.97	0.02
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	19.50	0.05	0.03	17.61	0.03	17.69	0.04
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	-	0.00	0.04	-	0.03	-	0.03
FeO	22.71	3.64	24.59	22.80	4.96	25.74	3.99	26.39
MnO	0.41	0.11	0.49	0.40	0.16	0.46	0.03	0.50
MgO	39.19	0.92	37.79	39.40	4.34	37.06	0.69	35.97
CaO	0.23	12.08	0.27	0.22	10.58	0.20	11.40	0.22
Na <sub>2</sub> O	-	3.80	-	-	3.64	-	1.89	-
K <sub>2</sub> O	-	1.06	-	-	0.71	-	1.18	-
NiO	0.08	-	0.05	0.12	-	0.09	-	0.09
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0.22	-	-	0.63	-	0.37	-
ZnO	0.03	-	0.00	0.05	-	0.17	-	0.06
SrO	-	0.08	-	-	0.15	-	0.07	-
Cl	-	0.06	-	-	0.05	-	0.06	-
Total	100.73	100.54	101.35	101.36	99.06	101.78	99.34	100.82

Tabla 8.28: Elementos mayores y menores del cristal de olivino NV11-oliE, medidos en EMPA, con las respectivas inclusiones vítreas del cristal. "-" indica elemento no medido. La unidad de medida es % wt. de óxidos

CRISTAL	NVII-oliE			
	OI1		OI2	OI3
Puntos Cristal				
Inclusiones		Incl1		
Tamaño (µm)		17x16		
Familia		F1		
Ubicación	b	b	c	b
SiO <sub>2</sub>	38.70	60.47	38.09	38.39
TiO <sub>2</sub>	0.00	1.22	0.00	0.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.03	21.31	0.01	0.01
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	-	0.02	0.00
FeO	21.77	3.62	22.81	22.00
MnO	0.40	0.00	0.35	0.34
MgO	40.03	0.77	39.71	40.02
CaO	0.19	5.76	0.29	0.21
Na <sub>2</sub> O	-	4.99	-	-
K <sub>2</sub> O	-	1.12	-	-
NiO	0.05	-	0.11	0.00
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0.41	-	-
ZnO	0.05	-	0.03	0.09
SrO	-	0.23	-	-
Cl	-	0.11	-	-
Total	101.23	100.02	101.41	101.07

Tabla 8.29: Elementos mayores y menores del cristal de olivino NV11-oliH y NV11-olil, medidos en EMPA, con las respectivas inclusiones vítreas del cristal. "-" indica elemento no medido. La unidad de medida es % wt. de óxidos

CRISTAL	NV11-oliH			NV11-olil		
Puntos cristal	OI8		OI9	OI10	I_OI16	
Inclusiones		Incl18				Incl5
Tamaño (µm)		21x16				7x7
Familia		F1				F1
Ubicación	b	b	b	b	b	b
SiO <sub>2</sub>	38.18	57.44	37.97	38.06	38.89	57.75
TiO <sub>2</sub>	0.07	1.84	0.00	0.00	0.04	1.69
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.07	18.11	0.02	0.05	0.05	18.91
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.04	-	0.00	0.01	0.03	-
FeO	21.20	4.06	20.84	24.62	21.00	3.28
MnO	0.25	0.02	0.33	0.34	0.34	0.03
MgO	40.13	1.00	40.30	37.33	41.10	1.05
CaO	0.22	10.83	0.21	0.18	0.19	11.73
Na <sub>2</sub> O	-	3.94	-	-	-	3.87
K <sub>2</sub> O	-	0.87	-	-	-	0.89
NiO	0.07	-	0.09	0.00	0.04	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0.19	-	-	-	0.44
ZnO	0.16	-	0.16	0.00	-	-
SrO	-	0.00	-	-	-	0.36
Cl	-	0.08	-	-	-	0.05
Total	100.39	98.38	99.92	100.60	101.67	100.05

Tabla 8.30: Elementos mayores y menores del cristal de olivino NV11-oliJ y NV11-oliK, medidos en EMPA, con las respectivas inclusiones vítreas del cristal. "-" indica elemento no medido. La unidad de medida es % wt. de óxidos

CRISTAL	NV11-J				NV11-K	
	OIJ_18		OIJ_17		OIJ_19	OIK2_20
Puntos cristal						
Inclusiones	Incl6		Incl7			Incl8
Tamaño (µm)	9x8		12x11			11x11
Familia	F1		F1			F1
Ubicación	c	c	b	b	c	b b
SiO <sub>2</sub>	38.23	57.05	38.36	57.11	38.81	38.62 59.06
TiO <sub>2</sub>	0.00	2.08	0.00	2.03	0.07	0.00 1.54
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.08	17.82	0.04	19.14	0.04	0.06 18.36
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	-	0.00	-		0.01
FeO	22.36	3.46	22.22	3.71	22.02	20.89 3.48
MnO	0.39	0.04	0.32	0.15	0.40	0.37 0.09
MgO	39.94	0.87	40.02	0.99	40.22	40.61 0.94
CaO	0.19	11.73	0.21	11.09	0.21	0.22 10.49
Na <sub>2</sub> O	-	4.06	-	3.86	-	- 4.27
K <sub>2</sub> O	-	1.01	-	0.96	-	- 0.92
NiO	0.01	-	0.03	-	0.10	0.09 -
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0.15	-	0.41	-	- 0.43
ZnO	-	-	-	-	-	- -
SrO	-	0.06	-	0.00	-	- 0.00
Cl	-	0.12	-	0.09	-	- 0.06
Total	101.21	98.46	101.20	99.53	101.92	100.91 99.65

Tabla 8.31: Elementos mayores y menores del cristal de olivino NV11-oliL, medidos en EMPA, con las respectivas inclusiones vítreas del cristal. "-" indica elemento no medido. La unidad de medida es % wt. de óxidos

CRISTAL	NV11-L					
Puntos Cristal	OI4		OI5		OI6	OI7
Inclusiones	Incl20		Incl19			
Tamaño (µm)	16x14		20x18			
Familia	F1		F1			
Ubicación	c	c	c	c	b	b
SiO <sub>2</sub>	38.50	57.40	38.38	59.06	38.29	37.95
TiO <sub>2</sub>	0.03	2.09	0.04	1.54	0.00	0.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	18.47	0.05	18.36	0.02	0.05
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	-	0.02	-	0.00	0.00
FeO	20.99	4.24	21.03	3.48	22.58	21.51
MnO	0.33	0.00	0.34	0.09	0.34	0.41
MgO	40.39	0.90	40.48	0.94	39.16	39.96
CaO	0.14	10.71	0.23	10.49	0.18	0.23
Na <sub>2</sub> O	-	4.19	-	4.27	-	-
K <sub>2</sub> O	-	1.18	-	0.92	-	-
NiO	0.08	-	0.02	-	0.08	0.19
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0.29	-	0.43	-	-
ZnO	0.06	-	0.11	-	0.00	0.08
SrO	-	0.00	-	0.00	-	-
Cl	-	0.05	-	0.06	-	-
Total	100.53	99.52	100.70	99.65	100.64	100.38

Tabla 8.32: Elementos mayores y menores de los cristales de olivino NV11-oliU y NV11-oliY, medidos en EMPA, con las respectivas inclusiones vítreas del cristal. "-" indica elemento no medido. La unidad de medida es % wt. de óxidos

Cristal	Nombre Microsonda	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	NiO	CaO	Total
NV11-oliU	NV II - OI U - OI 2	38.68	0.03	0.05	0.01	21.45	0.35	40.40	0.05	0.21	101.34
NV11-oliU	NV II - OI U - OI 3	38.69	0.03	0.02	0.00	21.29	0.39	40.91	0.06	0.19	101.58
NV11-oliU	NV II - OI U - OI 4	38.65	0.00	0.05	0.07	20.85	0.27	40.48	0.09	0.21	100.67
NV11-oliU	NV II - OI U - OI 5	38.43	0.00	0.00	0.06	20.97	0.33	40.89	0.07	0.19	100.94
NV11-oliU	NV II - OI U - OI 6	38.58	0.00	0.04	0.00	20.74	0.31	40.88	0.05	0.21	100.82
NV11-oliU	NV II - OI U - OI 7	38.52	0.00	0.03	0.00	22.38	0.39	39.66	0.04	0.22	101.24
NV11-oliU	NV II - OI U - OI 8	38.34	0.00	0.03	0.04	23.02	0.36	39.03	0.06	0.23	101.18
nv11-oliY	NV II - OI Y - OI 27	36.96	0.00	0.07	0.02	28.57	0.37	34.43	0.02	0.22	100.71
nv11-oliY	NV II - OI Y - OI 28	38.90	0.00	0.02	0.00	20.84	0.32	40.83	0.07	0.17	101.15
nv11-oliY	NV II - OI Y - OI 29	37.84	0.00	0.06	0.05	21.41	0.41	40.20	0.09	0.22	100.29

Tabla 8.33: Elementos trazas del cristal de olivino NV11-oliA y NV11-oliB, medidos en LA-ICP-MS, junto a sus respectivas inclusiones. "-" indica elemento bajo el límite de detección. Unidad medida en ppm.

Puntos		OI14		OI15		B_OI10			
Inclusiones			Incl14		Incl15		Incl2	Incl3	Incl4
Li	C R I S T A L  N V 1 1  O L I A	27	-	10.7	7	1.1	0.5	12.7	9.7
Sc		47	62	-	-	18.1	36.6	66	54.5
V		8	222	3.3	240	7.1	315	371	369
Cr		90	216	83	-	129	95	66	66
Co		206	103	196	116	179	15.9	24	11.9
Ni		840	260	640	170	519	17	34	48
Cu		-	140	6	-	3.4	42	49	186
Zn		280	130	110	160	151	81	12	60
Ga		-	-	-	-	-	18.3	20.8	26.6
Rb		-	7	-	41	-	21.3	20	22.2
Sr		0	270	0	433	0	515	573	588
Y		-	18	0	1.6	0	37	40	41.3
Zr		0	72	0	42	0	139	111	140
Nb		0	5.5	0	0	0	1.6	2.1	3.1
Cd		0	0	0	-	-	-	-	-
Sn		-	-	-	-	2	4.8	-	-
Cs		4.7	-	3.4	-	-	-	-	-
Ba		0	74	0	110	0	320	258	310
La		0	1.5	0	9.1	0	17.1	18.8	14.8
Ce		0	20	0	11.5	0	24.5	34	30
Pr		0	1.4	0	0	0	7.8	4.1	4.4
Nd		0	0	0	0	0	24	20	12.1
Sm		0	0	0	0	0	0.8	0	3.8
Eu		0	2.1	0	0	0	1	0	2.3
Gd		0	12	0	0	0	1.3	5	10
Tb		0	1.8	0	2	0	1.23	0.41	0.86
Dy		0	6	0	5	0	2.4	2.9	9
Ho		0	3.4	0	0	0	1.16	0.8	0.83
Er		0	0	0	0	0	3.9	6.3	1.4
Tm		0	0	0	0	0	1.5	0	0.59
Yb		0	6	0	0	0	0	3.9	1.8
Lu		0	0	0	0	0	0	0	1.7
Hf	0	0	0	7	0	5.4	2.3	3.1	
Ta	0	0	0	0	0	0	0.7	0	
Pt	-	-	-	-	-	-	-	-	
Pb	-	4	0.3	8	0.36	8.5	6.9	4.4	
Th	0	1.4	0	0	0	3	0.8	3	
U	0	0	0	0	0	0.64	1.1	0.75	

Tabla 8.34 Elementos trazas del cristal de olivino NV11-oliD, NV11-oliE y NV11-oliG, medidos en LA-ICP-MS, junto a sus respectivas inclusiones. "-" indica elemento bajo el límite de detección. Unidad medida en ppm.

Puntos		OI21	Incl11	Incl12	Incl13		OI1	Incl 1
Inclusiones								
Li		-	-	10	-		-	11
Sc		19	53	110	-		15.3	2.2
V		7.1	280	570	240		7.4	79
Cr		38	0	70	0		130	6
Co		201	107	109	450		175	160
Ni		760	480	970	1350		579	670
Cu		9.6	65	160	80		1.7	41
Zn		183	62	220	600		143	270
Ga		0.1	38	14.2	11		1.3	2.6
Rb		-	18	28	-		0.6	9.1
Sr		0	245	380	160		0	320
Y		0	29	53	18		0	11.7
Zr		0	113	108	31		0	55
Nb		0	0	0	0		0	6.1
Cd		-	-	-	-		-	-
Sn		-	-	-	49		-	-
Cs		-	-	14	-		0.44	-
Ba		0	90	450	0		0	120
La		0	8.2	10	0		0	4.5
Ce		0	16	23	11		0	11
Pr		0	0.8	2	5		0	1.5
Nd		0	9	0	0		0	0
Sm		0	13	9	0		0	0
Eu		0	3.2	0	0		0	0
Gd		0	0	0	0		0	0
Tb		0	0	0	0		0	0.8
Dy		0	14	4.3	0		0	0
Ho		0	1.6	0	0		0	0
Er		0	5	0	0		0	0
Tm		0	0	0	0		0	0
Yb		0	0	0	0		0	0
Lu		0	0	0	0		0	0
Hf		0	0	0	30		0	2.9
Ta		0	0	0	0		0	0
Pt		-	-	-	-		-	-
Pb		-	2	20	50		0.88	1.9
Th		0	1.2	0	0		0	1.8
U		0	4.9	0	0		0	0

Tabla 8.35: Elementos trazas del cristal de olivino NV11-olil y NV11-olilL, medidos en LA-ICP-MS, junto a sus respectivas inclusiones. "-" indica elemento bajo el límite de detección. Unidad medida en ppm.

Puntos		I_OI16			OI5		OI4	
Inclusiones		Incl5			Incl19		Incl20	
Li	C R I S T A L  N V 1 1  O L I L	54	50	C R I S T A L  N V 1 1  O L I L	6.6	10.2	4.3	13
Sc		-	105		17.7	52	3	60
V		12.8	240		5.8	396	10.9	310
Cr		120	102		126	34	84	100
Co		183	250		179	11.2	197	35
Ni		720	960		635	60	682	119
Cu		10	130		3.1	110	4.7	21
Zn		220	780		132	20	145	32
Ga		0.5	22		-	25.9	2.6	18
Rb		-	38		-	20.2	-	14.5
Sr		0	470		0	613	0	490
Y		0	35.8		0	48.2	0.48	39
Zr		0	101		0	134	0	108
Nb		0	0		0	3.8	0	0
Cd		-	-		-	-	-	-
Sn		-	11		0.1	3.9	7.2	4
Cs		-	-		1.51	-	0.3	-
Ba		0	82.9		0	386	0	310
La		0	8		0	15.4	0	9.4
Ce		0	12.7		0	35.6	0	31
Pr	0	1.4	0	6.2	0	2.7		
Nd	0	74	0	22.7	0	22		
Sm	0	0	0	3.4	0	5.6		
Eu	0	0	0	2.3	0	0		
Gd	0	0	0	0	0	13		
Tb	0	0	0	1.31	0	0		
Dy	0	0	0	16.6	0	0		
Ho	0	0	0	1.3	0	0.9		
Er	0	0	0	3.6	0	3.7		
Tm	0	0	0	0	0	0		
Yb	0	16	0	2.6	0	0		
Lu	0	0	0	1.9	0	0		
Hf	0	0	0	1.7	0	4.5		
Ta	0	4.1	0	0	0	0		
Pt	-	-	-	-	-	-		
Pb	0	9	0.34	8.6	2.1	-		
Th	0	0	0	2.1	0	0		
U	0	0	0	0.3	0	1.4		

### 8.3.7. MINERAL: PIROXENO EN CORTE TRANSPARENTE NV11

Tabla 8.36: Elementos mayores y menores de los cristales de piroxeno NV11-pxA y olivino NV11-Oli-pxA, medidos en EMPA. "-" indica elemento no medido. La unidad de medida es % wt. de óxidos

Cristal	Nombre Microsonda	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	ZnO	Total
NV11-pxA	NV II - T - Px 1	52.29	0.50	1.57	0.04	14.95	0.40	20.57	9.18	0.15	0.03	0.00	99.68
NV11-pxB	NV II - T - Px 2	37.17	0.00	0.30	0.04	29.86	0.41	30.96	0.56	0.04	0.02	0.00	99.35

Tabla 8.37: Elementos mayores y menores de del cristal de piroxeno NV11-pxP, medidos en EMPA. "-" indica elemento no medido. La unidad de medida es % wt. de óxidos

Cristal	Nombre Microsonda	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	NiO	Total
NV11-pxP	NV II - OI P - OI 25	54.40	0.25	1.06	0.10	16.16	0.43	26.67	2.14	0.00	101.23
NV11-pxP	NV II - OI P - OI 26	54.57	0.29	0.76	0.04	16.20	0.45	26.09	2.29	0.00	100.68

### 8.3.8. MINERAL: CROMITA EN CORTE TRANSPARENTE NV11

Tabla 8.38: Elementos mayores y menores de del cristal de cromita NV11-oxU1 y NV11-oxU2, medidos en EMPA. "-" indica elemento no medido. La unidad de medida es % wt. de óxidos

Cristal	Nombre Microsonda	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	NiO	ZnO	Total
NV11-oxU1	NV II - OI U - óxido 1	0.33	3.45	10.54	25.87	51.10	0.23	7.60	0.00	0.10	0.08	99.31
NV11-oxU2	NV II - OI U - óxido 2	0.40	4.45	10.68	24.34	50.41	0.29	7.40	0.01	0.12	0.10	98.19

## 8.4. ANEXO D: FÓRMULAS ESTRUCTURALES

### 8.4.1. CORTE NV10

#### 8.4.1.1 Olivino

Tabla 8.39: Fórmula estructural para cristales de olivino analizados. Para la normalización se han considerado 4 oxígenos.

Cristal	Punto EMPA	Si	Ti	Al	Cr	Fe(ii)	Mn	Mg	Ni	Ca	Total
NV10-oliA	NV10-A-29	1,00	0	0	0	0,47	0,01	1,53	0,00	0,01	3,01
NV10-oliA	NV10-A-30	0,99	0	0	0	0,45	0,01	1,55	0,00	0,01	3,01
NV10-oliA	NV10-A-32	0,99	0	0	0	0,46	0,01	1,55	0,00	0,01	3,01
NV10-oliB	NV10_B_OI 1	0,99	0	0	0	0,46	0,01	1,55	0,00	0,01	3,02
NV10-oliB	NV10_B_OI 2	1,00	0	0	0	0,46	0,01	1,52	0,00	0,01	3,00
NV10-oliB	NV10_B_OI 3	0,99	0	0	0	0,48	0,01	1,53	0,00	0,01	3,01
NV10-oliB	NV10_C_OI 16	0,99	0	0	0	0,46	0,01	1,55	0,00	0,01	3,02
NV10-oliC	NV10_C_OI 17	0,99	0	0	0	0,60	0,01	1,40	0,00	0,01	3,01
NV10-oliC	NV10_C_OI 18	0,99	0	0	0	0,46	0,01	1,54	0,00	0,01	3,01
NV10-oliD	NV10_D_OI 13	0,99	0	0	0	0,46	0,01	1,55	0,00	0,01	3,02
NV10-oliD	NV10_D_OI 15	0,98	0	0	0	0,48	0,01	1,56	0,00	0,01	3,03
NV10-oliB	NV10_U_OI 20	0,99	0	0	0	0,46	0,01	1,55	0,00	0,01	3,02
NV10-oliI	NV10-I-8	0,99	0	0	0	0,50	0,01	1,51	0,00	0,01	3,02
NV10-oliI	NV10-I-9	1,00	0	0	0	0,46	0,01	1,54	0,00	0,01	3,01
NV10-oliI	NV10-I-10	0,99	0	0	0	0,48	0,01	1,52	0,00	0,01	3,02
NV10-oliI	NV10-I-11	1,00	0	0	0	0,48	0,01	1,51	0,00	0,01	3,01
NV10-oliK	NV10-K-12	0,99	0	0	0	0,44	0,01	1,56	0,00	0,01	3,01
NV10-oliK	NV10-K-13	0,99	0	0	0	0,46	0,01	1,54	0,00	0,01	3,01
NV10-oliK	NV10-K-14	0,99	0	0	0	0,46	0,01	1,54	0,00	0,01	3,01
NV10-oliK	NV10-K-15	0,99	0	0	0	0,46	0,01	1,54	0,00	0,01	3,01
NV10-oliL	NV10-L-16	0,99	0	0	0	0,46	0,01	1,54	0,00	0,01	3,01
NV10-oliL	NV10-L-18	0,99	0	0	0	0,45	0,01	1,55	0,00	0,01	3,01
NV10-oliL	NV10-L-18	0,99	0	0	0	0,45	0,01	1,55	0,00	0,01	3,01
NV10-oliL	NV10-L-19	0,99	0	0	0	0,46	0,01	1,55	0,00	0,01	3,02
NV10-oliL	NV10-L-20	0,99	0	0	0	0,46	0,01	1,54	0,00	0,00	3,01
NV10-oliO	NV10-O-23	1,00	0	0	0	0,46	0,01	1,53	0,00	0,01	3,01
NV10-oliO	NV10-O-24	0,99	0	0	0	0,48	0,01	1,54	0,00	0,01	3,02
NV10-oliO	NV10-O-25	1,00	0	0	0	0,46	0,01	1,54	0,00	0,01	3,01
NV10-oliO	NV10-O-28	0,99	0	0	0	0,45	0,01	1,55	0,00	0,01	3,01
NV10-oliP	NV10-P-1	0,99	0	0	0	0,45	0,01	1,56	0,00	0,01	3,02
NV10-oliP	NV10-P-2r	0,99	0	0	0	0,51	0,01	1,49	0,00	0,01	3,01
NV10-oliP	NV10-P-3	0,98	0	0	0	0,46	0,01	1,57	0,00	0,00	3,02

NV10-oliP	NV10-P-4	0,98	0	0	0	0,47	0,01	1,56	0,00	0,01	3,03
NV10-oliG	NV10_G_OI 7	0,99	0	0	0	0,55	0,01	1,46	0,00	0,01	3,02
NV10-oliG	NV10_G_OI 8	0,99	0	0	0	0,48	0,01	1,54	0,00	0,01	3,02
NV10-oliG	NV10_G_OI 9	0,99	0	0	0	0,46	0,01	1,54	0,00	0,01	3,02
NV10-oliG	NV10_G_OI 10	0,99	0	0	0	0,46	0,01	1,55	0,00	0,01	3,01
NV10-oliG	NV10_G_OI 11	1,00	0	0	0	0,46	0,01	1,52	0,00	0,01	3,01
NV10-oliG	NV10_G_OI 12	0,99	0	0	0	0,45	0,01	1,56	0,00	0,01	3,02
NV10-oliR	NV10_R_OI 25	0,99	0	0	0	0,47	0,01	1,54	0,00	0,01	3,02
NV10-oliR	NV10_R_OI 26	0,99	0	0	0	0,46	0,01	1,55	0,00	0,00	3,02
NV10-oliU	NV10_U_OI 19	0,98	0	0	0	0,46	0,01	1,56	0,00	0,01	3,02
NV10-oliS	NV10_S_OI 27	0,98	0	0	0	0,47	0,01	1,55	0,00	0,01	3,02
NV10-oliS	NV10_S_OI 28	0,99	0	0	0	0,46	0,01	1,55	0,00	0,01	3,02
NV10-oliQ	NV10_Q_OI 30	0,99	0	0	0	0,46	0,01	1,55	0,00	0,01	3,02
NV10-oliQ	NV10_Q_OI 31	0,99	0	0	0	0,46	0,01	1,55	0,00	0,01	3,02
NV10-oliQ	NV10_Q_OI 32	0,99	0	0	0	0,46	0,01	1,55	0,00	0,01	3,02

#### 8.4.1.2 Plagioclasa

Tabla 8.40: Fórmula estructural para cristales de plagioclasa analizados. Para la normalización se han considerado 8 oxígenos.

Cristal	Punto EMPA	Si	Ti	Al	Fe(ii)	Ca	Na	K	Total
NV10-plgB	NV10_B_PI 1	2,36	0,01	1,60	0,03	0,67	0,33	0,01	5,00
NV10-plgB	NV10_B_PI 2	2,24	0,00	1,72	0,03	0,77	0,25	0,00	5,02
NV10-plgB	NV10_B_PI 3	2,19	0,00	1,78	0,03	0,81	0,21	0,00	5,02
NV10-plgC	NV10_PI C 4	2,41	0,01	1,54	0,04	0,62	0,38	0,01	5,01
NV10-plgC	NV10_PI C 5	2,21	0,00	1,75	0,03	0,82	0,20	0,00	5,01
NV10-plgC	NV10_PI C 6	2,16	0,01	1,81	0,02	0,86	0,16	0,00	5,02
NV10-plgC	NV10_PI C 7	2,14	0,00	1,83	0,02	0,89	0,12	0,00	5,01
NV10-plgC	NV10_PI C 8	2,17	0,00	1,80	0,03	0,85	0,16	0,00	5,01
NV10-plgC	NV10_PI C 9	2,17	0,01	1,79	0,02	0,85	0,17	0,00	5,01
NV10-plgF	NV10_F_PI 10	2,25	0,00	1,71	0,04	0,76	0,25	0,00	5,02
NV10-plgF	NV10_F_PI 11	2,19	0,00	1,77	0,03	0,83	0,19	0,00	5,02
NV10-plgD	NV10_PI D 12	2,42	0,00	1,53	0,04	0,61	0,40	0,01	5,01
NV10-plgD	NV10_PI D 13	2,28	0,00	1,68	0,03	0,75	0,25	0,01	5,01
NV10-plgD	NV10_PI D 14	2,20	0,01	1,76	0,03	0,82	0,18	0,00	5,00
NV10-plgD	NV10_PI D 15	2,15	0,01	1,82	0,03	0,86	0,16	0,00	5,02
NV10-plgD	NV10_PI D 16	1,10	0,01	1,17	0,03	0,82	0,37	0,01	3,49
NV10-plgD	NV10_PI D 17	2,16	0,00	1,81	0,03	0,86	0,14	0,00	5,01
NV10-plgD	NV10_PI D 18	2,14	0,00	1,83	0,02	0,88	0,14	0,00	5,02
NV10-plgE	NV10_PI E 19	2,39	0,00	1,57	0,03	0,64	0,34	0,01	5,00
NV10-plgE	NV10_PI E 20	2,22	0,01	1,75	0,02	0,79	0,20	0,00	5,00
NV10-plgE	NV10_PI E 21	2,19	0,01	1,77	0,03	0,83	0,18	0,00	5,01
NV10-plgH	NV10_H_PI 22	2,41	0,01	1,55	0,04	0,62	0,35	0,01	4,98
NV10-plgH	NV10_H_PI 23	2,24	0,00	1,72	0,03	0,80	0,22	0,00	5,01

NV10-plgH	NV10_H_PI 24	2,27	0,00	1,70	0,03	0,76	0,23	0,00	5,00
NV10-plgH	NV10_H_PI 25	2,22	0,00	1,75	0,04	0,80	0,20	0,00	5,00
NV10-plgH	NV10_H_PI 26	2,19	0,01	1,77	0,03	0,80	0,19	0,00	5,01
NV10-plgH	NV10_H_PI 27	2,17	0,01	1,78	0,03	0,84	0,18	0,00	5,02
NV10-plgF	NV10_PI F 28	2,42	0,01	1,54	0,03	0,61	0,40	0,01	5,01
NV10-plgF	NV10_PI F 29	2,21	0,00	1,77	0,03	0,81	0,18	0,00	5,00
NV10-plgF	NV10_PI F 30	2,25	0,01	1,71	0,03	0,77	0,25	0,00	5,02
NV10-plgF	NV10_PI F 31	2,20	0,00	1,78	0,02	0,81	0,19	0,00	5,01
NV10-plgF	NV10_PI F 32	2,18	0,00	1,80	0,02	0,83	0,18	0,00	5,01
NV10-plgF	NV10_PI F 33	2,10	0,00	1,88	0,02	0,93	0,09	0,00	5,01
NV10-plgF	NV10_PI F 34	2,13	0,01	1,83	0,02	0,90	0,12	0,00	5,01
NV10-plgF	NV10_PI F 35	2,15	0,00	1,82	0,02	0,87	0,16	0,00	5,02
NV10-plgQ1	NV10_Q_PI 36	2,23	0,00	1,74	0,03	0,79	0,22	0,00	5,02
NV10-plgQ1	NV10_Q_PI 37	2,22	0,01	1,75	0,03	0,80	0,19	0,00	4,99
NV10-plgQ2	NV10_Q_PI 38	2,19	0,00	1,77	0,03	0,82	0,19	0,00	5,02
NV10-plgQ2	NV10_Q_PI 39	2,25	0,00	1,72	0,03	0,78	0,20	0,00	4,99
NV10-plgQ3	NV10_Q_PI 40	2,19	0,00	1,77	0,04	0,83	0,19	0,00	5,02
NV10-plgQ3	NV10_Q_PI 41	2,21	0,00	1,75	0,04	0,83	0,18	0,00	5,01
NV10-plgQ4	NV10_Q_PI 42	2,25	0,00	1,70	0,04	0,78	0,24	0,00	5,02
NV10-plgQ4	NV10_Q_PI 43	2,21	0,00	1,75	0,05	0,80	0,21	0,00	5,02
NV10-plgQ5	NV10_Q_PI 44	2,25	0,01	1,70	0,03	0,77	0,23	0,00	5,00
NV10-plgQ5	NV10_Q_PI 45	2,20	0,00	1,76	0,05	0,81	0,21	0,00	5,02
NV10-plgMIC1	RS - Mic PI 46	2,40	0,01	1,57	0,04	0,60	0,33	0,01	4,97
NV10-plgMIC2	RS - Mic PI 47	2,49	0,00	1,48	0,04	0,54	0,42	0,01	4,99

#### 8.4.1.3 Piroxeno

*Tabla 8.41: Fórmula estructural para cristales de piroxeno analizados. Para la normalización se han considerado 6 oxígenos.*

Cristal	Punto EMPA	Si	Ti	Al	Cr	Fe(ii)	Mn	Mg	Ca	Na	K	Total
NV10-pxA	NV 10 -U Px 3	1,90	0,03	0,13	0,00	0,42	0,01	1,00	0,49	0,02	0,00	4,01
NV10-pxB	NV 10 -PI C - Px 4	1,93	0,02	0,11	0,01	0,34	0,01	0,89	0,66	0,02	0,00	4,00
NV10-pxC	NV 10 -PI C - Px 5	1,94	0,02	0,07	0,00	0,53	0,01	1,11	0,31	0,01	0,00	4,01
NV10-pxD	NV 10 -PI E - Px 6	1,95	0,01	0,09	0,00	0,37	0,01	1,01	0,54	0,02	0,00	4,00

#### 8.4.1.4 Óxidos de Fe-Ti/Cr.

Tabla 8.42: Fórmula estructural para cristales de cromita y titanomagnetita analizados. Para la normalización se han considerado 4 oxígenos.

Cristal	Punto EMPA	Si	Ti	Al	Cr	V	Fe(ii)	Mn	Mg	Ca	Zn	Total
NV10-oxB	NV10_B_Ox 1	0,02	0,08	0,51	0,73	0,00	1,50	0,01	0,44	0,00	0,00	3,28
NV10-oxRS2	NV10_RS óxido 2	0,03	0,35	0,13	0,01	0,00	2,91	0,01	0,09	0,02	0,00	3,55
NV10-oxRS3	NV10_RS óxido 3	0,05	0,36	0,19	0,00	0,00	2,80	0,01	0,09	0,02	0,00	3,50
NV10-oxRS4	NV10_RS óxido 4	0,03	0,35	0,13	0,02	0,00	2,88	0,01	0,09	0,02	0,01	3,54
NV10-oxRS5	NV10_RS óxido 5	0,04	0,37	0,12	0,00	0,00	2,88	0,01	0,09	0,01	0,00	3,53
NV10-oxRS6	NV10_RS óxido 6	0,03	0,37	0,14	0,01	0,00	2,85	0,01	0,10	0,01	0,00	3,52
NV10-oxRS7	NV10_RS óxido 7	0,63	0,22	0,19	0,00	0,00	1,91	0,01	0,06	0,04	0,01	3,06
NV10-oxRS8	NV10_RS óxido 8	0,06	0,31	0,15	0,01	0,00	2,89	0,01	0,09	0,02	0,00	3,55

#### 8.4.2. CORTE NV11

##### 8.4.2.1 Olivino:

Tabla 8.43: Fórmula estructural para cristales de olivino analizados. Para la normalización se han considerado 4 oxígenos.

Cristal	Punto EMPA	Si	Ti	Al	Cr	Fe(ii)	Mn	Mg	Ni	Ca	Total
NV11-oliA	NVII - A - OI 14	0,99	0	0	0	0,46	0,01	1,55	0,00	0,01	3,02
NV11-oliA	NVII - A - OI 15	1,00	0	0	0	0,46	0,01	1,54	0,00	0,01	3,01
NV11-oliA	NVII - A - OI 16	0,99	0	0	0	0,46	0,01	1,54	0,00	0,00	3,01
NV11-oliA	NVII - A - OI 17	1,00	0	0	0	0,46	0,01	1,53	0,00	0,01	3,01
NV11-oliB	NV II - OI B- OI 10	0,99	0	0	0	0,47	0,01	1,54	0,00	0,01	3,01
NV11-oliB	NV II - OI B- OI 11	0,99	0	0	0	0,46	0,01	1,56	0,00	0,01	3,02
NV11-oliB	NV II - OI B- OI 12	0,99	0	0	0	0,45	0,01	1,56	0,00	0,01	3,01
NV11-oliC	NVII - C - OI 23	0,99	0	0	0	0,46	0,01	1,55	0,00	0,01	3,02
NV11-oliC	NVII - C - OI 24	1,01	0	0	0	0,46	0,01	1,51	0,00	0,01	3,00
NV11-oliC	NVII - C - OI 25	1,00	0	0	0	0,47	0,01	1,52	0,00	0,01	3,01
NV11-oliD	NVII - D - OI 18	0,99	0	0	0	0,49	0,01	1,52	0,00	0,01	3,02
NV11-oliD	NVII - D - OI 19	0,99	0	0	0	0,54	0,01	1,47	0,00	0,01	3,01
NV11-oliD	NVII - D - OI 20	0,99	0	0	0	0,49	0,01	1,52	0,00	0,01	3,02
NV11-oliD	NVII - D - OI 21	0,99	0	0	0	0,56	0,01	1,44	0,00	0,01	3,01
NV11-oliD	NVII - D - OI 22	0,99	0	0	0	0,58	0,01	1,42	0,00	0,01	3,01
NV11-oliE	NVII - E - OI 1	0,99	0	0	0	0,47	0,01	1,53	0,00	0,01	3,01
NV11-oliE	NVII - E - OI 2	0,98	0	0	0	0,49	0,01	1,53	0,00	0,01	3,02
NV11-oliE	NVII - E - OI 3	0,99	0	0	0	0,47	0,01	1,54	0,00	0,01	3,02
NV11-oliH	NVII - H - OI 8	0,99	0	0	0	0,46	0,01	1,55	0,00	0,01	3,01

NV11-oliH	NVII - H - OI 9	0,99	0	0	0	0,45	0,01	1,56	0,00	0,01	3,02
NV11-oliH	NVII - H - OI 10	1,00	0	0	0	0,54	0,01	1,46	0,00	0,01	3,01
NV11-oliI	NV II - OI I - OI 16	0,99	0	0	0	0,45	0,01	1,56	0,00	0,01	3,01
NV11-oliJ	NV II - OI J - OI 17	0,99	0	0	0	0,48	0,01	1,54	0,00	0,01	3,02
NV11-oliJ	NV II - OI J - OI 18	0,99	0	0	0	0,48	0,01	1,53	0,00	0,01	3,02
NV11-oliJ	NV II - OI J - OI 19	0,99	0	0	0	0,47	0,01	1,53	0,00	0,01	3,01
NV11-oliK2	NV II - OI K2 - OI 20	0,49	0	0	0	0,48	0,01	1,53	0,00	0,01	2,52
NV11-oliL	NVII - L - OI 4	0,99	0	0	0	0,45	0,01	1,55	0,00	0,00	3,01
NV11-oliL	NVII - L - OI 5	0,99	0	0	0	0,45	0,01	1,56	0,00	0,01	3,02
NV11-oliL	NVII - L - OI 6	0,99	0	0	0	0,49	0,01	1,51	0,00	0,01	3,01
NV11-oliL	NVII - L - OI 7	0,99	0	0	0	0,47	0,01	1,55	0,00	0,01	3,02
NV11-oliU	NV II - OI U - OI 2	0,99	0	0	0	0,46	0,01	1,54	0,00	0,01	3,01
NV11-oliU	NV II - OI U - OI 3	0,99	0	0	0	0,45	0,01	1,56	0,00	0,01	3,02
NV11-oliU	NV II - OI U - OI 4	0,99	0	0	0	0,45	0,01	1,55	0,00	0,01	3,01
NV11-oliU	NV II - OI U - OI 5	0,99	0	0	0	0,45	0,01	1,57	0,00	0,01	3,02
NV11-oliU	NV II - OI U - OI 6	0,99	0	0	0	0,45	0,01	1,56	0,00	0,01	3,01
NV11-oliU	NV II - OI U - OI 7	0,99	0	0	0	0,48	0,01	1,52	0,00	0,01	3,01
NV11-oliU	NV II - OI U - OI 8	0,99	0	0	0	0,50	0,01	1,51	0,00	0,01	3,01
NV11-oliY	NV II - OI Y - OI 27	0,99	0	0	0	0,64	0,01	1,37	0,00	0,01	3,02
NV11-oliY	NV II - OI Y - OI 28	0,99	0	0	0	0,45	0,01	1,56	0,00	0,00	3,01
NV11-oliY	NV II - OI Y - OI 29	0,98	0	0	0	0,46	0,01	1,56	0,00	0,01	3,02

#### 8.4.2.2 Piroxeno

Cristal	Punto EMPA	Si	Ti	Al	Cr	Fe(ii)	Mn	Mg	Ca	Na	K	Total
NV11-pxA	NV II - T - Px 1	1,94	0,01	0,07	0,00	0,46	0,01	1,14	0,37	0,01	0,00	4,02
NV11-pxP	NV II - OI P - OI 25	1,95	0,01	0,04	0,00	0,48	0,01	1,43	0,08	0,01	0,00	4,02
NV11-pxP	NV II - OI P - OI 26	1,97	0,01	0,03	0,00	0,49	0,01	1,40	0,09	0,01	0,00	4,01

#### 8.4.2.3 Óxidos de Fe-Ti/Cr

Cristal	Punto EMPA	Si	Ti	Al	Cr	V	Fe(ii)	Mn	Mg	Ca	Zn	Total
NV11-oxU1	NV II - OI U - óxido 1	0,01	0,09	0,45	0,75	0,00	1,56	0,01	0,41	0,00	0,00	3,29
NV11-oxU2	NV II - OI U - óxido 2	0,01	0,12	0,46	0,71	0,00	1,55	0,01	0,41	0,00	0,00	3,28

## 8.5. ANEXO E: RECÁLCULO DE LA COMPOSICIÓN DE INCLUSIONES VÍTREAS CON EL USO DE PETROLOG.

### 8.5.1. INCLUSIONES VÍTREAS HOSPEDADAS EN OLIVINO: CORTES NV10 Y NV11.

Tabla 8.44: Recálculo de la composición de inclusiones vítreas con Petrolog. La unidad de medida es % wt. de óxidos.

Inclusión	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeOt	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SrO	Cl	Total
NV10-I-6 rec	53.28	2.13	14.19	7.96	0.21	3.97	10.52	3.12	1.06	0.42	0	0	96.86
NV10-O-33 rec	53.15	1.29	16.5	7.86	0.11	4.17	9.88	3.61	0.45	0.18	0	0	97.2
NV10-O-34 rec	53.87	1.16	16.63	7.44	0.22	4.1	9.9	3.6	0.6	0.15	0	0	97.66
NV10-L-35 rec	57.3	1.49	16.27	5.92	0.3	3.28	9.61	3.53	0.82	0.27	0	0	98.77
NV10-L-37 rec	56.95	1.4	16.31	5.63	0.21	3.15	9.37	3.22	0.86	0.03	0	0	97.13
NV10-F-39 rec	54.81	1.65	16.68	5.53	0.12	3.01	10.48	3.6	0.68	0.22	0	0	96.78
NV10-F-40 rec	56.54	1.71	17.03	4.88	0.08	2.63	10.14	3.99	0.81	0.31	0	0	98.12
NV10-C-41 rec	53.2	1.52	16.2	6.63	0.25	3.57	10.76	3.81	0.72	0.28	0	0	96.93
NV10-D-43 rec	53.94	2.33	17.04	6.23	0.06	3.23	11.14	3.06	0.98	0.11	0	0	98.11
NV10-B-46 rec	54.1	1.54	17.18	6.74	0.03	3.62	10.18	3.52	0.87	0.21	0	0	98.01
NV10-D-49 rec	56.12	1.45	16.79	5.78	0.03	3.21	10.84	3.39	0.64	0.2	0	0	98.47
NV10-A-50 rec	54.57	2.12	16.85	4.83	0.16	2.65	10.5	3.42	0.91	0.28	0	0	96.27
NV10-A-51 rec	55.68	1.84	16.55	5.99	0.1	3.21	10.14	3.74	0.92	0.13	0	0	98.29
NV10-K-52 rec	54.89	1.75	15.17	7.39	0.3	4.02	10.49	3.12	0.8	0.2	0	0	98.14
NV10-P-54 rec	56.6	1.71	17.24	5.73	0.1	3.11	10.18	3.58	0.73	0.21	0	0	99.19
NV 10 -U inclusión 1 rec	52.72	1.75	16.66	9.39	0.14	5.1	10.16	3.27	0.54	0.16	0	0	99.88
NV 10 - OI Q - inclusión 3 rec	53.12	2.24	16.47	6.92	0.12	3.62	10.12	3.69	0.53	0.32	0	0	97.15
NV 10 - OI Q - inclusión 4 rec	53.06	2.01	15.71	8.3	0.19	4.37	10.02	3.46	0.59	0.12	0	0	97.83
NV 10 - OI Q - inclusión 6 rec	54.07	1.46	17.08	6.64	0.21	3.52	10.23	3.79	0.78	0.19	0	0	97.95
NV 10 - OI S - inclusión 8 rec	51.74	1.09	16.5	8.47	0.13	4.32	10.03	3.6	1.06	0.11	0	0	97.04
NV 10 - OI S - inclusión 9 rec	54.81	1.61	17.15	6.21	0.1	3.19	9.75	3.83	0.98	0.15	0	0	97.78
NV 10 - OI S - inclusión 10 rec	51.69	1.92	17.61	7.55	0.06	3.81	9.72	4.01	0.78	0.06	0	0	97.2
NV 10 - OI R - inclusión 11 rec	49.63	2.01	15.55	9.17	0.18	4.53	9.43	3.68	0.82	0.1	0	0	95.12
NV 10 - OI R - inclusión 12 rec	52.58	1.9	17.32	7.85	0.27	3.9	7.77	4.04	1.24	0.16	0	0	97.02
NVII - E - Inclusión 1 rec	60.14	1.2	20.85	3.95	0	1.81	5.64	4.88	1.1	0.41	0	0	99.96
NVII - B - Inclusión 2 rec	56.36	1.57	17.77	4.39	0.12	2.34	10.54	4.01	1.11	0.36	0	0	98.56
NVII - B - Inclusión 3 rec	55.98	1.43	18.49	3.81	0	2.22	11.72	3.72	0.77	0.34	0	0	98.48
NVII - B - Inclusión 4 rec	55.37	1.63	18.22	4.32	0.07	2.46	10.95	3.72	0.92	0.36	0	0	98.02
NVII - I - Inclusión 5 rec	57.58	1.66	18.56	3.46	0.03	2.06	11.51	3.8	0.87	0.43	0	0	99.97

NVII - J - Inclusión 6 rec	56.82	2.04	17.48	3.55	0.04	1.88	11.51	3.98	0.99	0.15	0	0	98.45
NVII - J - Inclusión rec	56.86	1.99	18.78	3.72	0.14	2	10.88	3.79	0.94	0.4	0	0	99.5
NVII - K - Inclusión rec	58.75	1.51	18	3.49	0.08	2.01	10.28	4.19	0.91	0.43	0	0	99.63
NVII - C - Inclusión 10 rec	54.55	1.79	19.87	4.01	0	2.39	12.46	2.92	0.49	0.31	0	0	98.79
NVII - D - Inclusión 11 rec	59.65	1.93	17.29	4	0.03	1.93	11.14	1.85	1.15	0.37	0	0	99.33
NVII - D - Inclusión 12 rec	56.69	1.8	19.04	3.66	0.11	1.92	11.79	3.71	1.04	0.21	0	0	99.96
NVII - D - Inclusión 13 rec	55.08	1.79	18.29	4.96	0.17	2.51	10.99	3.78	0.74	0.65	0	0	98.97
NVII - A - Inclusión 14 rec	55.97	2.38	18.12	3.21	0.07	1.82	12.15	3.93	0.88	0.34	0	0	98.85
NVII - A - Inclusión 15 rec	60.62	1.33	17.38	3.35	0.06	1.85	9.74	4.43	1.11	0.09	0	0	99.97
NVII - H - Inclusión 18 rec	57.09	1.8	17.67	4.09	0.02	2.28	10.57	3.84	0.85	0.19	0	0	98.38
NVII - L - Inclusión 19 rec	56.61	1.77	18.09	3.93	0.08	2.21	10.84	4.08	0.84	0.43	0	0	98.87
NVII - L - Inclusión 20 rec	57	2.03	17.97	4.25	0	2.31	10.42	4.08	1.15	0.28	0	0	99.49

La tabla 8.45 entrega un resumen de la variación porcentual de la composición de las inclusiones recalculadas mediante Petrolog, respecto de la medida con la microsonda electrónica. En general, las variaciones para todos los óxidos, excepto el MgO, son menores al 3,26 wt% en valor absoluto. En cuanto al MgO, se observa que la composición recalculada varía en un 85,58 wt% respecto de la medida en EMPA.

Tabla 8.45: Porcentaje de variación de las inclusiones recalculadas respecto a sus concentraciones medidos en EMPA

Na <sub>2</sub> O	MgO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O
-2.89 %	85.58 %	-0.71 %	-2.87 %	-2.86 %
TiO <sub>2</sub>	CaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	FeO <sub>t</sub>
-2.86 %	-2.89 %	-2.50 %	-3.26 %	1.58 %

Por lo tanto, se observa cierta similitud entre la composición teórica entregada por Petrolog y la medida por la microsonda, y los grandes cambios, son en términos del MgO.

Petrolog basa sus recálculos en la difusión iónica que ocurriría entre el vidrio atrapado en la inclusión y el mineral que la hospeda. Esto se vería reflejado principalmente por el intercambio iónico de Mg desde la inclusión hacia el olivino, y de Fe hacia la inclusión. Respecto a todos los óxidos a excepción del MgO, la similitud entre los valores medidos y recalculados indicaría que las inclusiones no han sido atrapadas por mucho tiempo, ya que de haber sido así, el intercambio iónico debería haber sido mayor hasta alcanzar el equilibrio.

La gran variación positiva encontrada para el MgO en las inclusiones es indicativo de que teóricamente el olivino debería estar enriquecido en forsterita, sin embargo, esto no es así, ya que se observa cierta homogeneidad entre su composición y los puntos medidos en otras partes más alejadas de las inclusiones. Por lo tanto, el intercambio iónico entre Fe y Mg no habría sido muy eficiente, probablemente por el poco tiempo que tuvo el sistema para alcanzar

la nueva condición de equilibrio huésped-inclusión. Esto lleva a plantearse qué pasó con el MgO que no se difundió hacia el olivino y que debería haberse medido con la microsonda.

Sin embargo, el recálculo ha de considerarse válido ya que como se muestra en la figura 4.9 (diagrama Harker para el MgO), el contenido de este óxido aumenta tal cual se esperaría, y sigue una tendencia más clara, vista como una menor dispersión de los datos. Lo mismo se confirma en la figura 4.11 (diagrama Fenner para el FeO), donde se observa que el recálculo de las inclusiones sigue una tendencia más clara y con menor dispersión

## 8.6. ANEXO F: COMPOSICIÓN ROCA TOTAL

Tabla 8.46: Datos de la composición de la roca total utilizados. Fuente: GEOROC

Dato	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeOt	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Total
1	54.51	1.56	14.16	11.59	0.2	4.75	8.97	3.04	1.06	0.12	99.96
2	53.29	1.29	16.69	9.26	0.17	3.38	9.5	3.63	0.81	0	98.02
3	53.64	1.29	16.01	10.01	0.2	5.27	9.04	3.7	0.79	0	99.96
4	55.78	1.6	15.47	8.37	0.15	4.71	8.67	4.02	0.94	0.1	99.82
5	53.84	1.33	16.03	10.15	0.17	5.23	9.1	3.27	0.84	0	99.96
6	53.45	1.26	16.03	10.17	0.17	4.93	9.38	3.7	0.73	0	99.81
7	52.3	1.13	17.73	8.76	0.17	5.39	10.33	3.4	0.5	0	99.72
8	51.31	1.16	18.14	9.01	0.13	5.38	10.64	3.31	0.5	0.16	99.74
9	53.23	1.32	16.26	10.42	0.18	4.83	9.72	2.97	0.83	0.08	99.84
10	54.03	1.18	16.02	11.05	0.19	4.57	8.6	3.57	0.77	0	99.97
11	55.88	1.63	14.4	10.65	0.24	4.37	7.62	3.98	0.99	0.15	99.89
12	53.58	1.31	16.39	9.97	0.15	4.7	9.22	3.94	0.76	0	100
13	57.32	1.28	13.59	10.79	0.21	4.45	7.91	3.28	0.98	0	99.82
14	53.03	1.2	16.35	10.36	0.19	4.86	9.68	3.43	0.7	0	99.8
15	52.02	1.23	15.36	11.15	0.2	5.29	9.67	4.33	0.74	0	99.98
16	54	1.31	15.83	10.26	0.16	5.39	9.12	3.07	0.82	0	99.97
17	52.93	1.3	16.24	10.37	0.18	4.69	9.7	3.61	0.79	0	99.8
18	53.27	1.2	16.6	10.26	0.19	4.34	8.65	4.32	0.71	0.1	99.64
19	52.5	1.06	15.24	11.61	0.22	5.04	10.07	3.34	0.56	0	99.64
20	51.52	1.01	15.47	12.08	0.23	5.12	10.48	3.17	0.46	0	99.55
21	53.93	1.22	15.35	11.2	0.2	4.7	9.68	2.8	0.77	0	99.86
22	55.51	1.57	14.06	11.12	0.24	4.23	8.9	3.31	0.85	0.11	99.9
23	53.62	1.23	16.16	10.01	0.17	5.04	9.19	3.66	0.76	0.1	99.96
24	52.73	1.25	16.63	10.23	0.19	4.66	9.58	3.79	0.79	0	99.85
Promedio	53.64	1.29	15.84	10.37	0.19	4.8	9.31	3.53	0.77	0.04	99.77

## 8.7. ANEXO G: ERRORES ASOCIADOS A LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN.

### 8.7.1. MICROSONDA ELECTRÓNICA

*Tabla 8.47: Error asociado al análisis de elementos mediante microsonda electrónica (EMPA), estimado a partir del error entregado por cada punto medido en las inclusiones vítreas.*

<b>Elemento</b>	<b>Error (%)</b>
Si	0,52
Ti	5,37
Al	0,70
Fe	2,23
Mn	49,39
Mg	3,20
Ca	1,16
Na	2,44
K	4,20
P	23,45
Sr	93,65
Cl	22,94

## 8.7.2. ESPECTRÓMETRO DE MASAS DE ABLACIÓN LÁSER

Tabla 8.48: Error asociado al análisis de elementos mediante LA-ICP-MS, estimado a partir del error reportado por Jochum et al. (2011) para el estándar Nist SRM 610

Elemento	Error (%)	Elemento	Error (%)
Sc	5	Sm	9
V	4	Eu	3
Co	6	Gd	9
Ga	3	Tb	5
Rb	7	Dy	10
Sr	8	Ho	10
Y	6	Er	10
Zr	7	Tm	5
Nb	10	Yb	6
Sn	8	Lu	5
Cs	2	Hf	9
Ba	2	Ta	5
La	8	Pb	10
Ce	6	Th	8
Pr	4	U	10
Nd	5	Cu	7