



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

# **EVOLUCIÓN GEOQUÍMICA DEL DOMO CERRO LA TORTA, EL TATIO, A TRAVÉS DE INCLUSIONES VÍTREAS**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA**

**LORETO TAMARA HERNÁNDEZ PRAT**

**PROFESORA GUÍA:  
CLAUDIA CANNATELLI**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
BENIGNO GODOY NEIRA  
DIEGO MORATA CÉSPEDES**

**SANTIAGO DE CHILE  
2017**

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE: Geóloga  
POR: Loreto Tamara Hernández Prat  
FECHA: Noviembre 2017  
PROFESOR GUÍA: Claudia Cannatelli

## **EVOLUCIÓN GEOQUÍMICA DEL DOMO CERRO LA TORTA, EL TATIO, A TRAVÉS DE INCLUSIONES VÍTREAS**

El Cerro La Torta es un domo volcánico riolítico, de 34 ka de edad, ubicado en la zona de El Tatio, al oeste de los Cerros de Tocarपुरi, en la frontera con Bolivia, a 1270 km al noreste de Santiago y 100 km al este de Calama. Abarca un área de 12 km<sup>2</sup> y un volumen de 4,7 km<sup>3</sup> a una altura de 5090 m s.n.m.

El objetivo principal de este estudio es reconstruir los procesos ígneos que ocurrieron en evolución del magma que formó el Cerro La Torta mediante inclusiones vítreas. Para esto se realizaron análisis en microsonda electrónica y ablación láser luego de un detallado trabajo de petrografía de inclusiones vítreas hospedadas en anfíbol y plagioclasa.

El domo Cerro la Torta erupcionó a partir de un magma riolítico, rico en potasio y con un 74,5% *wt* de sílice desde una fuente magmática que cristalizó a presiones de entre 114 y 185 MPa, equivalentes a profundidades entre los 90 y 2390 m. bajo el nivel del mar. La temperatura de cristalización de las distintas fases y sus respectivas inclusiones varía entre 949 y 723 °C en promedio. La fugacidad de oxígeno del fundido ( $\log r_{O_2}$ ) es -12,3, indicando un ambiente oxidante, y el porcentaje de agua del fundido, 4,9% *wt*. A pesar de los datos anteriores, las inclusiones estudiadas registran un último evento de cristalización de fases minerales debido a que un magma de 74% de sílice no puede fraccionar piroxeno, por lo que la fuente real está más profunda y menos diferencia. La gran presencia de andesina indica que este magma parental real, es andesítico.

Se establecen dos modelos de fuente magmática para La Torta. i) Fuente magmática más profunda que los 2,6 km de espesor, que en un principio (0,8 Ma) tenía composición andesítica a dacítica, erupcionando el volcán Tocarपुरi y, posteriormente, los Cerros de Tocarपुरi. ii) Fuente magmática netamente riolítica alimentada por otra más profunda y primitiva. Este magma contenía enstatita y magnesio-hornblenda que por un calentamiento provocado por otro cuerpo magmático más primitivo se disolvieron violentamente, enriqueciendo el sistema en Ni, Cr y tierras raras pesadas, quedando escasos micro-fenocristales de enstatita. Las nuevas fases de Mg.-Hbl asimilaron estos elementos tanto en su cristal como en sus inclusiones. Posteriormente, el magma fue ascendiendo y cristalizando fraccionadamente a fases minerales como cuarzo y biotita, registrando un decaimiento en la concentración de los elementos compatibles de las inclusiones de centro a borde. Luego de un periodo de residencia suficiente para formar fenocristales de hasta un cm de largo, ocurre una descompresión y recalentamiento debido a la fuente de calor aportada por el APMB, que creó las texturas de reabsorción en cuarzo y anfíbol.

*Nunca se dice “no puedo”, se dice “me cuesta”.*

*A mi familia, en especial a mi padre, quien siempre se aseguró que jugara con piedritas.*

# AGRADECIMIENTOS

Este proyecto se realizó gracias al financiamiento y apoyo del Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes (CEGA: Proyecto Fondap N° 15090013), junto con los proyectos Fondequip EQM140009, Microtermometría de inclusiones fluidas y Fondequip EQM120098, Espectrómetro de masas. Además, quiero agradecer a Mathieu, Rurik (ablación láser), a Julio y Roberto (preparación de muestras), al laboratorio LAMARX de la Universidad de Córdoba, y a Blanca y Verónica (secretarias docente y de director), por toda la ayuda recibida.

En primer lugar, quiero agradecer a los miembros de mi comisión, Dr. Diego Morata y Dr. Benigno Godoy, ¡el mejor co-guía!, y, en especial, a mi profesora guía, Dra Claudia Cannatelli. Gracias por aceptarme como su memorista y por todo el apoyo y excelente disposición cada vez que necesité su ayuda. Gracias por creer en mí.

Los que siempre han creído y creerán que puedo conquistar el mundo son mis padres, Mario e Itziar, mi hermano, Camilo, a mi abuelo José y a toda mi familia, incluyendo a los que nos siguen desde arriba. Gracias a ellos soy lo que ven, gracias a ellos soy una persona con principios y valores que no se trizan. No puedo olvidar a la Kala, nuestra poodle toy, que siempre me calentaba la cama esperando a que me acostara de madrugada.

A mis amigos de la vida, Minsi, Deisun, Natu, Daniel, Rocío y, en especial, a la Vanee, ¡mi prima postiza!, que desde 2006 que no nos hemos separado. Gracias por todas las juntas, por su compañía, amenas conversaciones y por hacer que mi vida sea bella y entretenida.

A mis Geoamigas, Naty, Less, Cote y Nati (¡apañadora de papitas!), gracias por aceptarme en este bello grupo, por los mojitos en la casa de la Cote y las papitas Teclados; por los cafés de la tarde y su hermosa amistad. A mi querido Alfonso, compañero incondicional en Geo desde sus inicios y mejor apañador para bailar; siempre estudiando, conversando y siendo su salvación en Office jajaja. A mi querido Juanito, por los buenísimos y chistosos momentos y por las buenas conversaciones y amistad. Tampoco puedo olvidar a mi Benja, gracias por tu increíble amistad y confianza, gracias por escuchar mis problemas y esperar pacientemente a que termine de hacer tormentas en un vaso de agua, gracias por ser mi mejor amigo, Pequeño Saltamontes.

Por último, pero no menos importante, quiero agradecer infinitamente a mi Amoor, a mi complemento perfecto, Daniel; llegaste a iluminar mi vida hace ya un año y medio y ya no puedo imaginarla sin ti. Gracias por tu apoyo y amor incondicional, por enseñarme a ver la vida con otros ojos, por las larguísimas conversaciones que siempre empiezan tipo 11.00 de la noche y al otro día andamos muertos de sueño. Gracias por las cosas que cocinamos, por los cafés ricos que tomamos, las Papas Tóxicas que no podemos dejar de comer y por soportar mis mañas. Además, gracias a tu familia por aceptarme como una más y sentirme tremendamente querida; gracias a tus papás, Ana María y José, y a tus hermanos Camila, Valentina, Angela y José (y a Eduardooo).

# TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. PRESENTACIÓN .....	1
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.3. OBJETIVOS .....	3
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	3
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES .....	4
2.1. SÍNTESIS BIBLIOGRÁFICA .....	4
2.2. MARCO GEOLÓGICO .....	6
2.2.1. MARCO GEOLÓGICO LOCAL.....	6
2.2.2. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL LOCAL.....	10
2.3. DOMO CERRO LA TORTA DE TOCORPURI .....	13
2.3.1. DOMOS VOLCÁNICOS SIMILARES .....	15
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	17
3.1. TRABAJO EN LABORATORIO .....	17
3.1.1. PETROGRAFÍA .....	17
3.1.2. MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM).....	18
3.1.3. ANÁLISIS EN MICROSONDA ELECTRÓNICA (EMPA) .....	18
3.1.4. ESPECTROMETRÍA DE MASAS .....	19
3.2. TRABAJO EN GABINETE.....	20
3.2.1. REDUCCIÓN DE DATOS.....	20
3.2.2. TRATAMIENTO DE DATOS.....	20
3.2.3. GEOTERMOBAROMETRÍA .....	20
CAPITULO 4. RESULTADOS.....	22
4.1. PETROGRAFÍA .....	22
4.1.1. CORTE TRANSPARENTE-PULIDO, M6.....	22
4.1.2. MONTAJE DE CRISTALES SEPARADOS, MA .....	27
4.1.3. MONTAJE DE CRISTALES SEPARADOS, MB .....	29
4.2. QUÍMICA MINERAL.....	30
4.2.1. PLAGIOCLASA.....	30

4.2.2. ANFÍBOL .....	31
4.2.3. PIROXENO.....	31
4.2.4. ÓXIDOS Fe-Ti .....	33
4.3.    GEOQUÍMICA DE INCLUSIONES VÍTREAS .....	33
4.3.1. DIAGRAMA TAS.....	33
4.3.2. DIAGRAMA K <sub>2</sub> O .....	34
4.3.3. DIAGRAMAS HARKER .....	35
4.3.4. DIAGRAMAS BIVARIANTES DE #Mg.....	41
4.3.5. DIAGRAMAS DE TIERRAS RARAS (SPIDER).....	45
CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN .....	54
5.1.    TRATAMIENTO DE DATOS .....	54
5.2.    GEOTERMOBAROMETRÍA.....	55
5.2.1. ANFÍBOL .....	55
5.2.2. INCLUSIÓN VÍTREA/VIDRIO-PLAGIOCLASA.....	59
5.2.3. PLAGIOCLASA-FELDESPATO ALCALINO .....	60
5.2.4. ANFÍBOL-PLAGIOCLASA .....	61
5.2.5. MAGNETITA-ILMENITA .....	61
5.2.6. CONDICIONES DE CRISTALIZACIÓN .....	62
5.3.    PETROLOGÍA.....	63
5.4.    MODELO DE FORMACIÓN .....	68
CAPÍTULO 6. CONCLUSIÓN .....	72
BIBLIOGRAFÍA.....	74
ANEXO A: IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE INCLUSIONES VÍTREAS	
MUESTRA M6.....	78
A.1.    PLAGIOCLASA.....	78
A.1.1. CRISTAL pA.....	78
A.1.2. CRISTAL pB.....	80
A.1.3. CRISTAL pC.....	81
A.1.4. CRISTAL pD.....	83
A.1.5. CRISTAL pE.....	84
A.1.6. CRISTAL pF.....	85
A.1.7. CRISTAL pG .....	87
A.1.8. CRISTAL pH.....	89
A.1.9. CRISTAL pl .....	90

A.1.10. CRISTAL pJ .....	96
A.1.11. CRISTAL qC.....	97
A.2.    ANFÍBOL.....	98
A.2.1. CRISTAL Aa.....	98
A.2.2. CRISTAL aB.....	100
A.2.3. CRISTAL aC.....	102
A.2.4. CRISTAL aD.....	104
A.2.5. CRISTAL aE.....	105
A.2.6. CRISTAL aF.....	107
A.2.7. CRISTAL aG .....	109
A.2.8. CRISTAL aH.....	110
A.2.9. CRISTAL al .....	112
A.2.10. CRISTAL aJ .....	114
A.3.    CUARZO .....	116
A.3.1. CRISTAL qA.....	116
A.3.2. CRISTAL qB.....	117
A.3.3. CRISTAL qC.....	118
A.3.4. CRISTAL qD.....	119
A.3.5. CRISTAL qE.....	120
A.3.6. CRISTAL qF .....	121
A.3.7. CRISTAL qG .....	122
A.3.8. CRISTAL qH.....	124
A.3.9. CRISTAL ql .....	125
A.3.10. CRISTAL qJ .....	127
ANEXO B: UBICACIÓN DE PUNTOS MEDIDOS EN EMP .....	128
B.1.    MUESTRA M6.....	129
B.1.1. PLAGIOCLASA .....	129
B.1.2. ANFÍBOL.....	133
ANEXO C: DATOS ELEMENTOS MAYORES, MENORES Y TRAZAS .....	140
C.1.    MUESTRA M6.....	141
C.1.1. MINERAL: PLAGIOCLASA (p).....	141
C.1.2. MINERAL: ANFÍBOL (a) .....	147
C.1.3. VIDRIO MASA FUNDAMENTAL (v).....	153
C.1.4. MINERAL: PIROXENO (px) .....	155

C.1.5. MINERAL: ÓXIDOS Fe-Ti (O).....	156
C.1.6. MINERAL: APATITO (Ap) .....	158
C.1.7. MINERAL: PIRROTINA (Po).....	160
C.1.8. MINERAL: CIRCÓN (Zn) .....	160
C.2. MUESTRA MA .....	162
ANEXO D: GEOTERMOBAROMETRÍA .....	166
ANEXO E: ERRORES ASOCIADOS A LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN .....	170
E.1. MICROSONDA ELECTRÓNICA .....	170
E.2 ESPECTRÓMETRO DE MASAS DE ABLACIÓN LÁSER.....	171



# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros utilizados para el análisis de las muestras mediante EMPA. .....	18
Tabla 2. Parámetros usados para el análisis de las muestras mediante LA-ICP-MS. .....	19
Tabla 3. 80 isótopos medidos a partir de 58 elementos químicos cuantificados.	19
Tabla 4. Isótopos elegidos para crear resultados finales. .....	20
Tabla 5. Inclusiones eliminadas en cada diagrama bivariante, en inclusiones vítreas y vidrio por ser “outlayer”. .....	54
Tabla 6. Resultados termobarómetro Ridolfi et al. (2010). En azul se indican los valores menores y en rojo, los mayores. “invalid” indica que el dato es inválido y Prof, profundidad en la corteza continental. .....	56
Tabla 7. Resultados termobarómetro Ridolfi y Renzulli (2012). En azul se indican los valores menores y en rojo, los mayores. “invalid” indica que el dato es inválido. ....	59
Tabla 8. Resultados geotermómetro Putirka (2008). En azul se indican los valores menores y en rojo, los mayores. La primera columna de temperatura (ecuación 23 en Putirka (2008)), posee un error de $\pm 43^{\circ}\text{C}$ y la tercera columna (ecuación 24a en Putirka (2008)), correspondiente a una regresión global, mejora el error a $\pm 36^{\circ}\text{C}$ . La segunda columna, corresponde a la temperatura de cristalización de plagioclasa cuando el magma se satura en esta fase. ....	60
Tabla 9. Resultados geotermómetro Putirka (2008). En azul se indican los valores menores y en rojo, los mayores. La ecuación 27b (Putirka (2008)) está calibrada según 41 observaciones experimentales, con un error de $\pm 30^{\circ}\text{C}$ . .....	61
Tabla 10. Resultados de interés a partir de los datos de la tabla 28 en el Anexo D. .....	61
Tabla 11. Resultados geotermómetro Lepage (2003). ....	62
Tabla 12. Elementos mayores y menores del cristal de plagioclasa pB, de M6, medidos en microsonda electrónica, junto con sus respectivas inclusiones. “-” indica elemento no medido. Unidad de medida: %wt de óxidos. .....	141
Tabla 13. Elementos trazas del cristal de plagioclasas pB, de M6, medidos en LA-ICP-MS, junto con sus respectivas inclusiones. “-” indica elemento bajo el límite de detección. Unidad de medida: ppm. .....	142
Tabla 14. Elementos mayores y menores del cristal de plagioclasa pE, de M6, medidos en microsonda electrónica, junto con sus respectivas inclusiones. “-” indica elemento no medido. Unidad de medida: %wt de óxidos. .....	143
Tabla 15. Elementos trazas del cristal de plagioclasa pE, de M6, medidos en LA-ICP-MS, junto con sus respectivas inclusiones. “-” indica elemento bajo el límite de detección. Unidad de medida: ppm. .....	144
Tabla 16. Elementos mayores y menores del cristal de plagioclasa pE, de M6, medidos en microsonda electrónica, junto con sus respectivas inclusiones. “-” indica elemento no medido. Unidad de medida: %wt de óxidos. .....	145

Tabla 17. Elementos trazas del cristal de plagioclasa pE, de M6, medidos en LA-ICP-MS, junto con sus respectivas inclusiones. “-” indica elemento bajo el límite de detección. Unidad de medida: ppm. ....	146
Tabla 18. Elementos mayores y menores de los cristales de anfíbol, aA, aB y aC, de M6 medidos en microsonda electrónica, junto con sus respectivas inclusiones. “-” indica elemento no medido. Unidad de medida: %wt de óxidos.....	147
Tabla 19. Elementos trazas de los cristales de anfíbol, aA, aB, aC, de M6, medidos en LA-ICP-MS, junto con sus respectivas inclusiones. “-” indica elemento bajo el límite de detección. Unidad de medida: ppm. ....	148
Tabla 20. Elementos mayores y menores de los cristales de anfíbol, aF, aG y aH, de M6 medidos en microsonda electrónica, junto con sus respectivas inclusiones. “-” indica elemento no medido. Unidad de medida: %wt de óxidos.....	149
Tabla 21. Elementos trazas de los cristales de anfíbol, aF, aG, aH, de M6, medidos en LA-ICP-MS, junto con sus respectivas inclusiones. “-” indica elemento bajo el límite de detección. Unidad de medida: ppm. ....	150
Tabla 22. Elementos mayores y menores de los cristales de anfíbol, aJ y borde de reacción de px, de M6 medidos en microsonda electrónica, junto con sus respectivas inclusiones. “-” indica elemento no medido. Unidad de medida: %wt de óxidos. ....	151
Tabla 23. Elementos trazas de los cristales de anfíbol, aJ y borde de reacción de px, de M6, medidos en LA-ICP-MS, junto con sus respectivas inclusiones. “-” indica elemento bajo el límite de detección. Unidad de medida: ppm. ....	152
Tabla 24. Elementos mayores y menores de vidrio de masa fundamental de M6 medidos en microsonda electrónica. Unidad de medida: %wt de óxidos. ....	153
Tabla 25. Elementos trazas de vidrio de masa fundamental de M6, medidos en LA-ICP-MS, junto con sus respectivas inclusiones. “-” indica elemento bajo el límite de detección. Unidad de medida: ppm. ....	154
Tabla 26. Elementos mayores y menores de los cristales de piroxeno de M6 medidos en microsonda electrónica. “-” indica elemento no medido.....	155
Tabla 27. Elementos trazas del piroxeno de M6, medidos en LA-ICP-MS, junto con sus respectivas inclusiones. “-” indica elemento bajo el límite de detección. Unidad de medida: ppm.....	156
Tabla 28. Elementos mayores y menores de los cristales óxidos Fe-Ti de M6, en su mayoría magnetitas, medidos en microsonda electrónica. Unidad de medida: %wt de óxidos. El signo de interrogación (?) indica que no se encontró la posición del óxido dentro del cristal. ....	156
Tabla 29. Elementos trazas de óxidos Fe-Ti de M6, medidos en LA-ICP-MS, junto con sus respectivas inclusiones. “-” indica elemento bajo el límite de detección. Unidad de medida: ppm.....	157
Tabla 30. Elementos mayores y menores de los cristales de apatito de M6 medidos en microsonda electrónica. Unidad de medida: %wt de óxidos.....	158
Tabla 31. Elementos trazas de apatitos de M6, medidos en LA-ICP-MS, junto con sus respectivas inclusiones. “-” indica elemento bajo el límite de detección. Unidad de medida: ppm.....	159
Tabla 32. Elementos mayores y menores de un cristal de pirrotina de M6 medido en microsonda electrónica. Unidad de medida: %wt de óxidos.....	160

Tabla 33. Elementos mayores y menores de un cristal de circón de M6 medido en microsonda electrónica. Unidad de medida: %wt de óxidos. ....	160
Tabla 34. Elementos trazas del circón de M6, medidos en LA-ICP-MS, junto con sus respectivas inclusiones. “-” indica elemento bajo el límite de detección. Unidad de medida: ppm.....	161
Tabla 35. Elementos mayores y menores de los cristales pertenecientes a MA y sus respectivas inclusiones, medidos en microsonda electrónica. “-” indica elemento no medido. Unidad de medida: %wt de óxidos.....	162
Tabla 36. Elementos trazas de los minerales de MA, medidos en LA-ICP-MS, junto con sus respectivas inclusiones. “-” indica elemento bajo el límite de detección. Unidad de medida: ppm.....	163
Tabla 37. Elementos mayores y menores de uno de los cristales pertenecientes a MB y sus respectivas inclusiones, medidos en microsonda electrónica. “-” indica elemento no medido. Unidad de medida: %wt de óxidos.....	164
Tabla 38. Elementos trazas de los minerales de MB, medidos en LA-ICP-MS, junto con sus respectivas inclusiones. “-” indica elemento bajo el límite de detección. Unidad de medida: ppm.....	165
Tabla 39. Resultados geotermómetro Putirka (2008). En azul se indican los valores menores y en rojo, los mayores. La ecuación 27b (Putirka (2008)) está calibrada según 41 observaciones experimentales, con un error de $\pm 30^{\circ}\text{C}$ .....	166
Tabla 40-41. Resultados geotermómetro A Holland y Blundy (1994). Se muestran las temperaturas resultantes de la combinación de todos los puntos de anfíbol con plagioclasa donde, los valores varían de menor a mayor temperatura con el color de la celda. Azul indica la menor temperatura y rojo, la mayor. La presión dada en la primera fila corresponde a la calculada con los datos según Ridolfi y Renzulli (2012).....	167
Tabla 41. Continuación horizontal de la tabla 28. ....	168
Tabla 42. Resultados geotermómetro Lepage (2003). Las ultimas 3 filas se trabajan con el promedio de todos los datos por punto (Average all dato for each analytical pair). ....	169
Tabla 43. Error asociado al análisis de elementos mediante microsonda electrónica estimado a partir del error entregado por cada punto medido. Para cada elemento se consideraron, en el promedio, los minerales con mayor abundancia del mismo. Abreviaciones: vidrio de masa fundamental (v), inclusión vítrea (incl), plagioclasa (plg), anfíbol (anf), piroxeno (px), óxido (ox), apatito (ap), circón (zrn).....	170
Tabla 44. 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. .	171

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de unidades morfoestructurales. Servicio Nacional de Geología y Minería. Marinovic y Lahsen (1984). .....	6
Figura 2. Marco geológico local, escala 1:250.000. El punto celeste indica al domo Cerro La Torta. Abajo se presenta la leyenda del mapa. Servicio Nacional de Geología y Minería. Marinovic y Lahsen (1984). .....	10
Figura 3. Mapa estructural esquemático del área volcánica de El Tatio. Modificado de Lucchi et al., 2009. ....	12
Figura 4. Modelo esquemático de la erupción del domo Cerro La Torta, mediante un ascenso de magma facilitado por cabalgamientos. Editado de Lucchi et al. (2009). 13	
Figura 5. Mapa de ubicación geo gráfica del domo Cerro La Torta, al oeste de los Cerros de Tocorpuri. Se observa su morfología circular elongada en dirección NE-SEW. Imagen obtenida de Google Earth.....	13
Figura 6. Fotografía de la ladera del Cerro La Torta donde es posible observar la zona en bloques, con estructuras columnares; y la zona de cizalle; seguida por una cubierta rugosa o de diaclasamiento caótico. Tomado de Bidart (2014). ....	14
Figura 7. Mapa de ubicación de domos similares a La Torta junto con volcanes de la zona. Imagen obtenida de Google Earth. ....	16
Figura 8. Fotografía del corte transparente M6. a) Muestra M6. b) Se indican en distintos colores los cristales seleccionados para identificar inclusiones. ....	24
Figura 9. Fotomicrografía de familias de inclusiones vítreas (F <sub>x</sub> ) descritas en distintos minerales. a) Cristal qH. b) Cristal qF. c) Cristal pl. d) Cristal aF. Para ver cada descripción, ir al Anexo A. ....	25
Figura 10. Fotomicrografía de una inclusión vítrea hospedada en anfíbol. A la izquierda se observa una imagen de electrones retrodispersados, y a la derecha, en luz transmitida, a nícoles paralelos, en microscopio óptico. Se observa homogénea con una burbuja, que tiene cristales en su interior. ....	26
Figura 11. Fotomicrografía de una inclusión vítrea recristalizada hospedada en plagioclasa. A la izquierda se observa una imagen de electrones retrodispersados, y a la derecha, en luz transmitida, a nícoles paralelos, en microscopio óptico. Se observan pequeños cristales y una burbuja dentro de la inclusión. ....	26
Figura 12. Fotomicrografía de electrones retrodispersados a la izquierda, y a luz reflejada en microscopio óptico, a la derecha. Cristal de magnetita (Mt), con inclusiones de pirrotina (Po), en paragénesis con un cristal de magnesio-hornblenda. Éste último, alberga una inclusión vítrea menor (círculo azul). ....	27
Figura 13. Imagen de electrones retrodispersados de los minerales aflorantes en montaje MA en SEM. Los círculos azules muestran inclusiones en superficie, donde Mx1 tiene una homogénea y dos con burbuja. ....	28
Figura 14. Fotomicrografía de los minerales aflorantes en montaje MB en SEM (Mx1, MX3) y a luz transmitida en microscopio óptico (Mx6). Los círculos azules muestran	

inclusiones en superficie, donde Mx1 tiene 3 homogéneas con burbuja y Mx6, una recristalizada. ....	29
Figura 15. Diagrama ternario de clasificación de feldespatos generado por IgPet. ....	30
Figura 16. Diagrama de clasificación de anfíboles propuesto por Locock (2014). ....	31
Figura 17. Fotomicrografía en microscopio óptico del piroxeno analizado en EMP y, posteriormente, LA-ICP-MS. Se observa el borde de reacción de anfíbol junto con el crecimiento de biotita en su parte superior derecha. Los puntos medidos se indican con círculos celestes para microsonda y rojos para ablación láser. ....	32
Figura 18. Diagrama de clasificación de piroxenos generado por IgPet. Los puntos medidos corresponden, en la figura anterior, al círculo celeste más aislado, hacia el centro del cristal (px74) y el círculo del mismo color, pero con otro rojo, directamente bajo el punto anterior (px75). Las estrellas naranjas corresponden a las mediciones hechas por Bidart (2014) en piroxenos de La Torta, pero en M7. ....	32
Figura 19. Diagrama de clasificación TAS, propuesto por Le Bas et al. (1986), generado en Petrograph (Petrelli, 2005), de las inclusiones vítreas de las muestras M6, MA y MB, y vidrio de masa fundamental en M6 y MA. Unidad de medida: %wt. ....	34
Figura 20. Diagrama K <sub>2</sub> O propuesto por Peccerillo y Taylor (1976), generado en Petrograph (Petrelli, 2005). Al igual que en la figura anterior se presentan puntos de todas las inclusiones vítreas, vidrio de masa fundamental y muestras de roca total de Bidart (2014) y De Astis et al. (2009). ....	35
Figura 21. Diagramas de variación Harker para óxidos mayores, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> y MgO, para las inclusiones vítreas y vidrio. Generado en Petrograph (Petrelli, 2005). ....	38
Figura 22. Diagramas de variación Harker para óxidos mayores, CaO y FeO, para las inclusiones vítreas y vidrio. Generado en Petrograph (Petrelli, 2005). ....	39
Figura 23. Diagramas de variación Harker para óxidos mayores, K <sub>2</sub> O y Na <sub>2</sub> O, para las inclusiones vítreas y vidrio. Generado en Petrograph (Petrelli, 2005). ....	40
Figura 24. Diagramas de variación de #Mg para Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> y CaO en inclusiones vítreas y vidrio de masa fundamental. Las flechas indican la tendencia de cristalización fraccionada de las inclusiones vítreas. Las plagioclasas al fraccionar más fácilmente el Ca y Al que el anfíbol, sus inclusiones tienden a presentar menor cantidad de estos elementos que las que están en anfíbol. Generado en Petrograph (Petrelli, 2005). ....	43
Figura 25. Diagramas de variación de #Mg para FeO y K <sub>2</sub> O en inclusiones vítreas vidrio de masa fundamental. La línea de tendencia constante en el diagrama de FeO evidencia la poca variación de este elemento en todas las inclusiones, independiente de su mineral hospedante, aunque siempre el contenido es mayor en las hospedadas en anfíbol. En el diagrama para el K, la flecha indica, también, una leve tendencia de las inclusiones en plagioclasa a tener mayor contenido de este elemento debido a su mayor facilidad para fraccionarlo. Ambos coinciden con el patrón de cristalización fraccionada. Generado en Petrograph (Petrelli, 2005). ....	44
Figura 26. Diagramas de variación de #Mg para Na <sub>2</sub> O en inclusiones vítreas vidrio. La flecha muestra cómo ocurre un aumento en el contenido de Ca en las inclusiones en anfíbol y luego decrece hacia las hospedadas en plagioclasa. Esto se debe a que el	

anfíbol fracciona menos Ca que la plagioclasa. Generado en Petrograph (Pretelli, 2005). .....	45
Figura 27. Diagrama spider de tierras raras normalizado a la composición promedio del vidrio de masa fundamental de las inclusiones hospedadas en plagioclasa. Los puntos con cuadrados corresponden a inclusiones hospedadas en el centro del cristal, y los con círculo, en el borde. ....	46
Figura 28. Diagrama spider de tierras raras normalizado a la composición promedio del vidrio de masa fundamental de las inclusiones hospedadas en plagioclasa. Los puntos con cuadrados corresponden a inclusiones hospedadas en el centro del cristal, y los con círculo, en el borde. ....	47
Figura 29. Diagrama spider de tierras raras normalizado a la composición del MORB de Pearce (1983) de las inclusiones hospedadas en anfíbol (cruces verdes) y en plagioclasas (hexágonos azules), además de vidrio de masa fundamental (triángulo invertido rojo). Las cruces y hexágonos rellenos indican la ubicación de la inclusión en el centro del cristal y, las figuras vacías, en el borde. ....	48
Figura 30. Diagrama spider de tierras raras normalizado a la composición de la corteza continental superior, de Taylor y McLennan (1985), de las inclusiones hospedadas plagioclasas (hexágonos azules), además del vidrio de masa fundamental (triángulo invertido rojo). Los hexágonos rellenos indican la ubicación de la inclusión en el centro del cristal y, los hexágonos vacíos, en el borde. ....	49
Figura 31. Diagrama spider de tierras raras normalizado a la composición de la corteza continental superior, de Taylor y McLennan (1985), de las inclusiones hospedadas Mh-Hbl (cruces verdes), además del vidrio de masa fundamental (triángulo invertido rojo). Las cruces rellenas indican la ubicación de la inclusión en el centro del cristal y, las cruces vacías, en el borde. ....	50
Figura 32. Diagrama spider de tierras raras normalizado a la composición de la corteza continental superior, de Taylor y McLennan (1985), de las inclusiones hospedadas en anfíbol (cruces verdes) y en plagioclasas (hexágonos azules), además de vidrio de masa fundamental (triángulo invertido rojo). Las cruces y hexágonos rellenos indican la ubicación de la inclusión en el centro del cristal y, las figuras vacías, en el borde. ....	51
Figura 33. Diagrama spider de tierras raras normalizado a la composición de la corteza continental superior, de Taylor y McLennan (1985) para los cristales de plagioclasa. Cada figura indica un perfil disponible en el Anexo C, perteneciente a un determinado cristal (pB, pE, pEw y pH). ....	52
Figura 34. Diagrama spider de tierras raras normalizado a la composición de la corteza continental superior, de Taylor y McLennan (1985) para los cristales de magnesio-hornblenda (triángulos verdes) y enstatita (estrella negra). Los triángulos vacíos indican una posición de borde en el cristal de anfíbol, y el triángulo relleno, de centro. ....	53
Figura 35. Gráfico P.T. Las barras de error indican la desviación estándar esperada ( $\sigma_{est}$ ) de 22°C para la temperatura y la variación de la precisión para la presión. El error máximo relativo para P varía entre 11%, en la curva de máxima estabilidad termal (línea punteada negra), y 25%, en el límite superior de anfíboles consistentes (línea segmentada negra). Se muestra, también, el error máximo de profundidad utilizando un peso específico de 2,7 gr/cm <sup>3</sup> . Las isopletas indican el contenido de sílice anhidro (%wt)	

del fundido que, a su vez, definen campos de estabilidad de fases como biotita (Bt), plagioclasas (Pl), ortopiroxeno (Opx), clinopiroxeno (Cpx), magnetita (Mgn), ilmenita (Ilm) y olivino (Ol) con los anfíboles consistentes (magnesio-hornblenda (Mg-Hbl) y pargasita tshermakítica (Tsc-Prg)). La curva segmentada roja divide productos experimentales consistentes con diferentes cristalinidades. ....57

Figura 36. Gráfico  $\log f_{O_2}$ -T. Las barras de error indican el máximo error de la fugacidad de oxígeno, de 0,4 unidades de logaritmo, y la desviación estándar esperada ( $\sigma_{est}$ ) de 22°C para la temperatura. Las curvas de NNO y NNO+2 son las propuestas por O'Neill y Pownceby (1993). ....57

Figura 37. Gráfico T-H<sub>2</sub>O<sub>melt</sub>. La curva punteada indica el límite máximo de estabilidad termal y la segmentada, el límite inferior de la fase anfíbol. Las barras de error corresponden al máximo error relativo para la temperatura (15%), y a la desviación estándar del contenido de agua en el fundido (0,4 wt%). ....58

Figura 38. Gráficos de composición de CaO, Na<sub>2</sub>O y K<sub>2</sub>O (eje derecho) respecto a la posición en el eje x de los perfiles hechos en los cristales de plagioclasas, pB (perfil 1), pEw (perfil 2), pE (perfil 3) y pH (perfil 4). Se observa como el CaO se comporta de forma opuesta el K<sub>2</sub>O y Na<sub>2</sub>O. Además, se observan dos “peaks” de calcio, indicando dos momentos de recalentamiento. ....64

Figura 39. Gráficos bivariantes de la variación de Ni y Cr respecto al K<sub>2</sub>O de las inclusiones hospedadas en Mg-Hbl, además de mostrar que el vidrio de masa fundamental también contiene una cantidad menor de estos elementos compatibles. Los cuadrados indican inclusiones ubicadas en el centro de los cristales y los círculos, en el borde. Cada color es un cristal distinto. ....67

Figura 40. Sección esquemática del modelo propuesto para la profundidad de la cámara magmática común que formó el domo Cerro La Torta y el volcán y cerros de Tocorpuri. Ésta se ubicaría a ~90 m. bajo el nivel del mar (114 MPa, con un máximo de 680 m.s.n.m) donde los siguientes 2,6 km, en profundidad, correspondería a la zona de riolita cristalizando a diferentes presiones mientras asciende el magma, llegando a los ~2390m. bajo el nivel del mar (185 MPa, con un máximo de 3060 m.), para luego erupcionar. Bajo esta profundidad la composición de la cámara es más dacítica a andesítica, siendo la fuente de los centros volcánicos más antiguos. El gradiente de colores cálidos muestra la evolución composicional de los edificios volcánicos adyacentes al domo (Cerros de Tocorpuri y Volcán Tocorpuri) de andesita – andesita/dacita – riolita. El eje X no está a escala. ....70

Figura 41, Sección esquemática para el modelo de dos fuentes magmáticas. La primera es más profunda, antigua y primitiva, dando origen a los cerros y volcán Tocorpuri de composiciones andesítica y andesítica/dacítica, respectivamente gracias a la diferenciación del magma. Luego, un dique alimentador, propició la formación de una nueva fuente más somera, a sobre los 2390 m. bajo el nivel del mar (185 MPa), cristalizando a distintas presiones mientras el magma asciende hasta un mínimo de 114 MPa, equivalentes a 90 m. bajo la superficie del mar, donde finalmente erupciona a través de las debilidades de la corteza. La simbología es la misma que en la figura 40. El eje X no está a escala. ....71

Figura 42. Arriba, cristal pA visto en aumento de 5x a nícoles paralelos. Se observa F4 y el recuadro negro corresponde a la imagen de abajo, donde se muestran las demás familias. ....	79
Figura 43. Cristal pB en un aumento de 5x a nícoles cruzados. Se observa la macla polisintética y la zonación concéntrica, así como las inclusiones vítreas más grandes y las familias a las que pertenecen. ....	80
Figura 44. Arriba, cristal pC en un aumento de 5x a nícoles cruzados. Se observa la zonación concéntrica acompañada de inclusiones vítreas, además de la macla polisintética. Abajo, familias F1, F2, F3 y F4 vistas en nícoles paralelos. F1 se observa casi en cada zonación, siguiendo su forma. ....	82
Figura 45. Arriba, cristal pD visto en un aumento de 5x a nícoles cruzados. Se observan las maclas Carsbald y periclina, junto con una leve zonación y la posición de F1. Abajo, familia F1 visto en nícoles paralelos. ....	83
Figura 46. Cristal pE visto en nícoles paralelos con un aumento de 20x. Se observa el cristal central (pE) y el cristal CxW (cristal oeste), los cuales forman un aglomerado de plagioclasas. En ambos se indican las familias de inclusiones vítreas descritas. ....	84
Figura 47. Cristal pF visto en nícoles cruzados con un aumento de 5x. Se observan los 3 cristales diferenciados por sus maclas y bordes oscilatorios. ....	85
Figura 48.a) F1 en cristal inferior, CxInf, visto a nícoles paralelos con aumento de 10x. b) F1 en cristal central, CxCentral, en aumento de 50x a nícoles paralelos. Se observan minerales opacos como aglomerados. c) Familias F1 y F2 en el cristal superior, CxSup, a nícoles paralelos en aumento de 20x. ....	87
Figura 49. Cristal pG en aumento de 10x a nícoles paralelos, mostrando la ubicación de las familias. ....	88
Figura 50. Cristal pH visto en nícoles cruzados en aumento de 5x, mostrando la posición de las familias. ....	89
Figura 51. Cristal pH en aumento de 10x. A la izquierda se observa la parte superior y a la derecha, la parte inferior siguiendo la orientación de la imagen anterior. En ambas se indican las familias de inclusiones vítreas descritas. ....	90
Figura 52. Cristal pl en un aumento de 5x a nícoles cruzados. Debido al tamaño del cristal y el campo de visión de la cámara, no se muestra completo. Se observan las zonaciones y las inclusiones que crecieron a partir de ellas. ....	91
Figura 53. Cristal pl en nícoles paralelos. a) Familias F3 y F4. b) F5 que también se observa en c), entre F1 y F9 y al norte de F2. d) Subfamilias de F9. e) EN el borde inferior este del cristal se observa la continuación de F9 y las familias F15, F12 y F11. f) Hacia más el borde del cristal, fuera de F9, F10, F11, F12 y F14. ....	95
Figura 54. Cristal pJ visto en un aumento de 5x a nícoles paralelos. Se observa que en la parte inferior derecha hay otro cristal de plagioclasa, el cual no fue descrito. Además, se indican las familias de inclusiones vítreas descritas. ....	96
Figura 55. Arriba, cristal qC visto en aumento de 10x a nícoles cruzados. Se observan sus bordes rectos e integridad buena. Abajo, F1 de la imagen superior, pero en un aumento de 50x y a nícoles paralelos. ....	98
Figura 56. Cristal aA visto en aumento de 10x a nícoles paralelos. El cristal de la derecha es una biotita. ....	99



Figura 57 F1 vista a nicoles paralelos. Se observa la forma en triángulo debido al clivaje del cristal. F2 vista en nicoles paralelos. ....	100
Figura 58. Cristal aB visto en nicoles paralelos con aumento de 10x. Presenta un marcado clivaje y un borde de reacción con otro cristal de anfíbol. ....	101
Figura 59. Cristal aC visto en nicoles paralelos con un aumento de 5x. la imagen superior corresponde al extremo más ancho del cristal (su hábito es acicular) y la imagen inferior es la continuación. Se observan las inclusiones de biotita y óxidos de hierro, junto con descomposición del mineral por la masa fundamental. ....	102
Figura 60. F2 F3 a nicoles paralelos, vistas a 50x. Corresponden al mismo lugar de las familias en la figura anterior. ....	103
Figura 61. Cristal aD visto en aumento de 20x a nicoles cruzados. Se observa el aglomerado donde aD se ubica en la parte derecha sobre la plagioclasa. ....	104
Figura 62. F1 F2 y F3 visto en nicoles paralelos, en aumento de 50x. ....	105
Figura 63. Cristal aE visto en nicoles paralelos en aumento de 20x. Se observan las maclas pequeñas alargadas y algunas de las inclusiones vítreas más grandes. ...	106
Figura 64. Cristal aF en nicoles paralelos a 5x. Se puede observar un cristal de biotita creciendo en borde de reacción al lado oeste y un gran cristal anhedral del mismo mineral más al centro del cristal. Bajo éste, en el borde del cristal de anfíbol, se observa un circón de color rosa pálido y forma prismática. ....	107
Figura 65. Parte superior del cristal aF, en aumento de 20x, a nicoles paralelos, donde se observan las familias F2, F4 y F6. ....	109
Figura 66. Cristal aG visto en aumento de 20x a nicoles paralelos. Se observa el gran cristal de óxido de hierro en borde de reacción y su marcado clivaje, así como su forma de diamante. ....	109
Figura 67. Cristal aH visto en aumento de 10x a nicoles paralelos. Se observa el marcado clivaje, así como las intrusiones de masa fundamental y la inclusión de biotita en la parte superior. ....	110
Figura 68. F1 F2 y F3 de la imagen anterior, con aumento de 20x. ....	111
Figura 69. Cristal al visto en aumento de 5x a nicoles paralelos. Se observa el cristal de plagioclasa a partir del cual creció y su mala integridad. ....	112
Figura 70. Arriba, familia F8 rodeada de F1. Abajo, F7 rodeada de F1. Se observa el mineral marrón tabular. Ambas poseen un aumento de 20x. ....	113
Figura 71. Parte más ancha del cristal aJ visto en aumento de 5x a nicoles cruzados. Se observa la “macla Carsbald” y la mala integridad del cristal. ....	114
Figura 72. a) Familias F3 y F4 mostradas en la figura anterior. b) F2 y F1 en un lugar distinto a c) que también corresponde a F1. Aquí se observa la aglomeración. .	116
Figura 73. En la parte superior se observa el cristal qA visto en aumento de 5x a nicoles cruzados. Se observa el profundo fracturamiento del cristal y los embahiamientos, además de la ubicación de F1. Abajo, F1 vista en aumento de 50x a nicoles cruzados. ....	117
Figura 74. Arriba, cristal qB visto en nicoles cruzados, en aumento de 10x. Se observan fracturas profundas rellenas con masa fundamental vítrea, así como sus embahiamientos. Abajo, F1 vista en aumento de 50x. a nicoles paralelos. ....	118
Figura 75. Arriba, cristal qD visto a nicoles cruzados, en aumento de 5x. Se observan fracturas con relleno de vidrio, así como reabsorciones dentro del cristal por la	

misma masa fundamental vítrea. Abajo, F2 visto en aumento de 50x. Se observa homogénea. ....	119
Figura 76. Cristal qE visto en aumento de 5x, a nícoles paralelos. Se observan las fracturas y zonas de reabsorción mencionadas, además de las familias F1 y F2. Abajo, F1 vista en nícoles cruzados en la parte este del cristal, en aumento de 50x. Se observa su forma hexagonal. ....	120
Figura 77. Arriba, cristal qF visto en aumento de 10x, a nícoles paralelos. Se observa su mala integridad y estructuralidad. Abajo, F1 y F2 en aumento de 50x, a nícoles paralelos. ....	122
Figura 78. Arriba, cristal qG visto en nícoles cruzados, en aumento de 5x. Se observa su forma irregular debido a procesos de reabsorción. Abajo, F2 y F3 en aumento de 50x, a nícoles paralelos. ....	123
Figura 79. Arriba, Aglomerado de cristales (a 10x y nícoles cruzados) de plagioclasa y cuarzo al que pertenece qH. Abajo, F1, F2, F3, F4, F5 vistas en aumento de 50x a nícoles cruzados. ....	125
Figura 80. Arriba, cristal qI visto en nícoles cruzados, en aumento de 5x. Se observa su gran embahiamiento y forma irregular. Abajo, F1 vista en nícoles paralelos, en aumento de 50x. Se observa la burbuja a la derecha de la inclusión y la aglomeración de minerales opacos hacia el hemisferio izquierdo. ....	126
Figura 81. Arriba, cristal qJ visto en nícoles cruzados, en aumento de 20x. Se observan las fracturas profundas y bordes redondeados y la posición de las familias. Abajo, F1 en aumento de 50x, a nícoles paralelos. ....	127
Figura 82. Fotomicrografía en EMP de pB. a) Se observa el perfil medido desde C26 a C35 (M6_pB_C26 a M6_pB_C356) y las inclusiones vistas en b) (círculo inferior) y c) (círculo superior). b) Inclusión M6_pB_M36. c) Inclusión M6_pB_37 7 38, los cuales son dos mediciones para una inclusión. ....	129
Figura 83. Fotomicrografía de pE en EMP. a) Se observan pEw y pE, este último, con la ubicación del perfil medido desde C12 a C17 (M6_pE_C12 a M6_pE_C17), el punto de vidrio de masa fundamenal v18 (M6_pE_v18) y la ubicación de las inclusiones mostradas en c). b) Se muestra el cristal pEw con su perfil medido, desde C1 a C3 (M6_pEw_C1 a M6_pEw_C3) y su inclusión respectiva mostrada en d) (M6_pE_M4). ....	130
Figura 84. Fotomicrografía cristal pH en EMP. En la parte superior se observa el perfil medido, desde C39 a C48 (M6_pH_C39 a M6_pH_c48). EN la parte inferior se observa la inclusión medida, M6_PH_M49. ....	131
Figura 85. Fotomicrografía del óxido M6_pJ_O91, ulvoespinela, en EMP. ....	132
Figura 86. Fotomicrografía del anfíbol aA en EMP. En a) se observa la ubicación de todos los puntos medidos (M6_aA_C64, M6_aA_C65, M6_aA_O87 y M6_aA_O86) y delas inclusiones mostradas en b), M6_aA_M66 (círculo en la parte superior del cristal) y c) M6_aA_M67 (círculo en parte media del cristal). ....	133
Figura 87. Fotomicrografía del anfíbol aB en EMP. En la parte superior se muestra la posición de todos los puntos medidos (M6_aB_C73 y M6_aB_C73), así como la inclusión, M6_aB_M74, mostrada en la parte inferior. ....	134
Figura 88. Fotomicrografía del anfíbol aC en EMP. a) Ubicación de todos los puntos medidos en el cristal mismo (M6_aC_C58, M6_aB_C59 y M6_aB_63), del apatito	

M6\_aB\_Ap90 y las inclusiones vítreas mostradas en b), c) y d). b) Inclusión M6\_aB\_M60 ubicada bajo C58. c) Inclusión M6\_aB\_M62 ubicada bajo C63. d) Inclusión M6\_aB\_M61 ubicada a la derecha de C63..... 135

Figura 89. Fotomicrografía del anfíbol aF en EMP. En a) se indica la posición de todos los puntos medidos en cristal (M6\_aF\_C9 y M6\_aF\_C68), en óxidos (M6\_aF\_O3 y M6\_aF\_O92, ulvoespinelas), en apatito (M6\_aF\_Ap95), circón (M6\_aF\_Zrn97), así como la ubicación de las inclusiones de la parte inferior de la imagen. (M6\_aF\_M70 (a)) se ubica a la izquierda de C69 y M6\_aF\_M71, en c), no aparece en la imagen, se encuentra en la parte superior del cristal. .... 136

Figura 90. Fotomicrografía del anfíbol aG en EMP. Se observa la ubicación de los puntos medidos en cristal (M6\_aG\_C24 y M6\_aG\_C25), la inclusión vítrea, M6\_aG\_23, el óxido, M6\_aG\_O81 (ulvoespinela) y la pirrotina incluida en O81, M6\_aG\_Po80. .... 137

Figura 91. Fotomicrografía del anfíbol aH en EMP. Se observa la ubicación de los puntos medidos en el mismo cristal, M6\_aH\_C18 y M6\_aH\_C19, así como de las inclusiones M6\_aH\_M20 y M6\_aH\_M21 y M6\_aH\_M22, que resultan ser dos mediciones para una sola inclusión vítrea..... 138

Figura 92. Fotomicrografía del anfíbol aJ en EMP. a) Ubicación de los puntos M6\_aJ\_C50 y M6\_aJ\_C51 y el óxido M6\_aJ\_O82 (ulvoespinela) en la parte inferior, y más ancha, del cristal. b) Ubicación de los puntos en cristal M6\_aJ\_C52 y M6\_aJ\_C53, del óxido M6\_aJ\_O83 (ulvoespinela) y de las inclusiones mostradas en c) y d). c) Inclusión M6\_aJ\_M54 ubicada, en línea recta, sobre O83. d) Inclusión vítrea con 3 puntos medidos, M6\_aJ\_M55, M6\_aJ\_M56 y M6\_aJ\_M57, ubicada a la derecha de M54. .... 139

# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. PRESENTACIÓN

Chile se encuentra, desde el Jurásico, en un margen tectónico activo de convergencia de placas generado por la subducción de la Placa de Nazca bajo la Placa Sudamericana. La evolución tectónica que llevó a este actual régimen hace que Los Andes se divida en cuatro zonas: Zona Volcánica Norte, Zona Volcánica Central, Zona Volcánica Sur y Zona Volcánica Austral, las cuales se separan por “gaps volcánicos” donde el ángulo de subducción baja de 25° a menos de 10° (Charrier et al., 2007).

La Zona Volcánica Central (ZVC) se extiende entre los 16°S y 28°S y se caracteriza por sus centros volcánicos aislados de composición altamente diferenciada y corteza engrosada (~50 a 70 km). Se encuentra poblada por estratovolcanes andesíticos y dacíticos, intercalados con ignimbritas miocénicas y domos de lava riolíticos a dacíticos.

El Cerro La Torta, como su nombre lo indica, es una “torta” (“*low lava dome*”) dacítica (Francis, 1993) de 12 Km<sup>2</sup> de superficie y 4,7 Km<sup>3</sup> de volumen, ubicada en la zona del campo geotermal El Tatio, II región de Antofagasta, Chile. Su cima se encuentra a 5090 m.s.n.m. con una altura de 150 m. Se ha datado en 34±7 ka (medición <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar, Renzulli y Menna, 2006).

Macroscópicamente, la lava presenta textura porfírica (P.I.= 30%) (De Astis et al., 2009) con fenocristales de plagioclasa, cuarzo, biotita y anfíbol en una matriz vítrea. Al no observarse feldespatos alcalinos, se clasifica como una dacita de anfíbol y biotita.

El área de El Tatio, ubicado en la II región de Antofagasta, es parte de una región geotermal escasamente explotada, pero con un potencial estimado de entre 3.000 y 16.000 MWe (Sanchez-Alfaro et al., 2015). Es reconocido mundialmente por sus paisajes imponentes del desierto y sus campos geotermales expresados en geiseres, pozas burbujeantes, depósitos de sínter silicio, etc. Sin embargo, a pesar de este gran potencial energético de energía renovable, el único uso que se le ha dado es netamente recreacional y turístico, por lo que se hace sumamente importante la presencia de investigadores, inversionistas y el propio Estado, para generar nuevas formas sustentables para cubrir la demanda energética del país, la cual sube, aproximadamente, 1.000 MWe al año (Lahsen et al., 2015).

Desde los primeros años del siglo XX que se trabaja en la exploración geotérmica en el norte de Chile (y luego, en la zona centro-sur del país). En el año 2000, Sernageomin publica un listado de 120 áreas termales calificadas como “fuentes probables” y se proclama la Ley N° 19.657, conocida como la Ley Geotérmica, definiendo el marco regulatorio de la exploración y desarrollo geotérmico de Chile.

En el año 2010, luego de un trabajo colaborativo entre la Universidad de Chile y ENAP caracterizando los recursos geotermales en la zona centro-sur del país, se crea el Centro de Excelencia de Los Andes (CEGA), financiado por CONICYT, con el objetivo de generar conocimiento científico sobre los sistemas geotermales de Chile para ayudar, desde la ciencia, al desarrollo de la geotermia en el país (Morata, 2014). En este contexto, los estudios en esta área han ido aumentando exponencialmente, llegando a inaugurar, este año, la primera planta geotérmica de Chile y Sudamérica, Cerro Pabellón, en la comuna de Ollagüe (II Región de Antofagasta), la cual tiene capacidad para abastecer unos 165.000 hogares, con una potencia de 48 MWe.

Para seguir contribuyendo con información sobre el potencial geotérmico de Chile esta memoria de título en geología busca reconstruir los procesos ígneos ocurridos en la evolución del magma del domo Cerro La Torta mediante inclusiones vítreas, determinando la composición del magma parental y la de los eventos posteriores en su erupción. De esta forma será posible abrir paso a la existencia de una relación con la fuente de calor del sistema geotermal de El Tatio y su potencial energético.

## **1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

Antecedentes de estudios específicos del Domo Cerro La Torta no hay, lo que sí existe es información de éste dentro de un contexto geológico más grande, formando parte del último evento volcánico antes del actual sistema geotermal. Sin embargo, este último hecho es el que le da la importancia a la Torta; al ser el último evento, el estudio de la composición de su magma parental será capaz de entregar información sobre el sistema magmático que actualmente calienta las aguas subterráneas y crea el sistema geotermal.

Lo anterior puede convertirse en un aporte al conocimiento e investigación en el área geotermal de El Tatio, a través de una herramienta poco utilizada en Chile, como es el estudio de inclusiones vítreas. De esta forma, se espera que los resultados obtenidos se puedan replicar en otros centros volcánicos a lo largo de todo el país y, de esta forma, aportar en el descubrimiento de nuevas fuentes de energías limpias para la sociedad.

## **1.3. OBJETIVOS**

### **1.3.1. OBJETIVO GENERAL**

Reconstruir los procesos ígneos que ocurrieron en evolución del magma que formó el Cerro La Torta mediante inclusiones vítreas.

### **1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Identificar las familias de inclusiones vítreas en las distintas fases minerales que componen el domo.
- Determinar la composición del magma del que cristalizó el domo mediante los elementos mayoritarios medidos en microsonda electrónica de barrido (EMP).
- Determinar concentraciones de elementos traza de las inclusiones vítreas y sus respectivos minerales huésped mediante espectrometría de masas (LA-ICP- MS).
- Determinar las características del magma parental que formó el domo Cerro La Torta.

## CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES

### 2.1. SÍNTESIS BIBLIOGRÁFICA

Marinovic y Lahsen (1984) publicaron la Hoja de Calama 1:250.000, ubicada entre los 22° y 23° latitud sur y los 69°30' longitud oeste y la frontera con Bolivia, cubriendo un área de 13.000 km<sup>2</sup>. La región fue dividida, morfoestructuralmente, en cinco dominios: Sierra del Medio-Sierra Limón Verde, Cordillera de Domeyko, Precordillera-Cordillera de los Andes, Cordillera de la Sal y Depresión del Río Loa (figura 1).

En la Cordillera de los Andes se describen, principalmente, rocas volcánicas de Cenozoico superior, las cuales se separan en dos grupos mayores: ignimbritas y volcanes, los que, a su vez, se dividen en tres grupos de acuerdo a su edad.

La litología de los volcanes (estratovolcanes, domos de lava y domos) corresponde a andesitas de piroxeno, dacitas de hornblenda y biotita, andesitas basálticas y riolitas. Se disponen en direcciones N-S, NE y NW, paralelos a las fallas y lineamientos. La cadena volcánica principal N-S, se compone de tres cordones volcánicos: Cabana-La Torta de Tocopuri (área de estudio), Putana-Lincancabur y Cerros de Guayaques.

De Silva et al. (1994) estudiaron las propiedades reológicas y estimaron tasa de erupción de la dacita Chao (Cerro Chao), al norte del área de estudio, en el Complejo Volcánico Altiplano-Puna. Con esos datos, elaboraron un modelo para su erupción, consistente en tres fases gatillado por la intrusión de un magma máfico en un cuerpo magmático dacítico, altamente cristalizado. También, relacionaron este domo con otros contemporáneos (de edad menor a 1Ma) sugiriendo que representan un mismo episodio magmático, provenientes de un magma silíceo empobrecido en volátiles, ocurrido después de la erupción de ignimbritas voluminosas. La ubicación de estas lavas silíceas jóvenes podría haber delimitado un sistema magmático actualmente activo, indicando la ubicación de una posible caldera.

Lahsen y Munizaga (1979) realizaron dataciones K/Ar en rocas de las estructuras volcánicas de la zona de El Tatio, asignando una edad menor a 1Ma para Cerro La Torta. De esta forma, determinaron una historia geológica para la zona consistente en una fase compresiva entre los 12 y 4 Ma.; y una fase extensional en dirección EW asociados a fallas normales NW-SE y NE-SW que controlarían la distribución de los centros volcánicos.

Lucchi et al. (2009), elaboraron un nuevo mapa del área de El Tatio, escala 1:50.000 a partir del cual describieron la arquitectura regional del complejo volcano-sedimentario de El Tatio. Según estos autores, la arquitectura de El Tatio es resultado de la interacción de la actividad volcánica del arco volcánico andino, con erupciones explosivas de alta energía, producción de ignimbritas (Complejo Volcánico Altiplano-Puna), fases tectónicas extensionales y compresionales y actividad glacial.

Estos autores definieron una historia eruptiva y tectónica para el complejo volcano-sedimentario de El Tatio consistente en dos periodos eruptivos (9Ma y 1Ma), donde el más reciente, se divide en cuatro épocas eruptivas de emplazamientos de depósitos ignimbríticos, separadas por periodos inter-eruptivos de inactividad volcánica, con dominancia de eventos tectónicos y erosivos. La emisión del domo Cerro La Torta es el evento más reciente, con solo 0,034 Ma sobre un cabalgamiento importante, sugiriendo un rol significativo de este tipo de fallas en el control del ascenso de magma.

De Astis et al. (2009) determinaron que, en la región volcánica de El Tatio, el volcanismo es producido por varios reservorios localizados en la corteza superior, los cuales han sufrido distintos procesos evolutivos en ambientes cerrados y abiertos. Lo anterior se refiere a un proceso de automezcla y mezcla de magmas distintos, en una primera etapa volcánica (desde 7 a 9 Ma), y de asimilación y cristalización fraccionada, con posible “*mingling*”, en una segunda etapa (1 Ma).

Ward et al. (2014) mediante prospección sísmica, proponen una zona de baja velocidad de la corteza bajo el Complejo volcánico Altiplano-Puna (APVC, en inglés), a una profundidad de 4 a 25 km bajo el nivel del mar. Sus dimensiones son, aproximadamente, 200 km de diámetro, 11 km de espesor y un volumen de 500.000 km<sup>3</sup>. Esta anomalía correspondería a un cuerpo plutónico amalgamado, llamado cuerpo magmático Altiplano Puna (APMB, en inglés), con un porcentaje de fusión parcial de entre 4 y 25%, en un estado de masa fundida cristalina y asociado a la fuente de la deformación continua atribuida al ascenso de magma bajo el APVC.

Godoy et al. (2017) mediante el análisis isotópico en Sr y Nd en la cadena volcánica San Pedro-Linzor, determinaron la influencia de la zona de fusión parcial en la corteza (Ward et al., 2014) en el volcanismo de la zona Altiplano-Puna. La relación <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr aumenta en los centros volcánicos dentro del área del cuerpo magmático Altiplano-Puna y disminuye fuera de ésta, pareciéndose a la signatura isotópica normal de la Zona Volcánica Central. Existe una correlación directa entre la composición isotópica de Sr y Nd de las lavas eruptadas por varios estratovolcanes y la estructura sísmica del APMB que los infrayace convirtiéndose en la mejor evidencia del rol fundamental de la zona de fusión parcial del cuerpo magmático en la signatura isotópica y, por lo tanto, del aporte cortical, del magma eruptado a lo largo de los volcanes estudiados.

Bidart (2014) estudió cuatro centros eruptivos volcánicos jóvenes en la zona de El Tatio, incluido el Cerro La Torta, determinando sus condiciones pre-eruptivas y su geocronología. De esta forma, el domo en estudio posee un reservorio somero donde se dio cristalización de anfíbol a 835°C, presión de 135MPa, porcentaje de agua igual a 4,6% y fugacidad de oxígeno de -11,7logfO<sub>2</sub>. Las texturas de desequilibrio que presentan las rocas sugieren que hubo varios episodios de inyección de magmas de mayor temperatura en el reservorio somero más evolucionado y frío; sin embargo, no se descartan procesos de cristalización fraccionada o asimilación cortical. Además, se concluye que el Cerro La Torta fue el primer domo de la zona de estudio en formarse a partir de la efusión de un material altamente diferenciado hace aproximadamente 2,12 Ma con un fuerte control



estructural dado por los lineamientos NE-SW y NS, que favorecen el ascenso de magmas a través de debilidades preexistentes en la corteza.

## 2.2. MARCO GEOLÓGICO

La Hoja Calama (Marinovic y Lahsen, 1984), ubicada entre los 22° y 23° latitud S y los 69° y 67°30' longitud W (siguiendo la frontera con Bolivia), cubre un área de 13.000 km<sup>2</sup> y se divide en cinco dominios morfoestructurales, donde el dominio Precordillera-Cordillera de Los Andes abarca el área de estudio del Cerro La Torta de Tocopuri (figura 1). Al ser un área muy restringida a un solo domo volcánico, este marco geológico abarca las unidades geográficamente cercanas o importantes para dicho domo (figura 2).

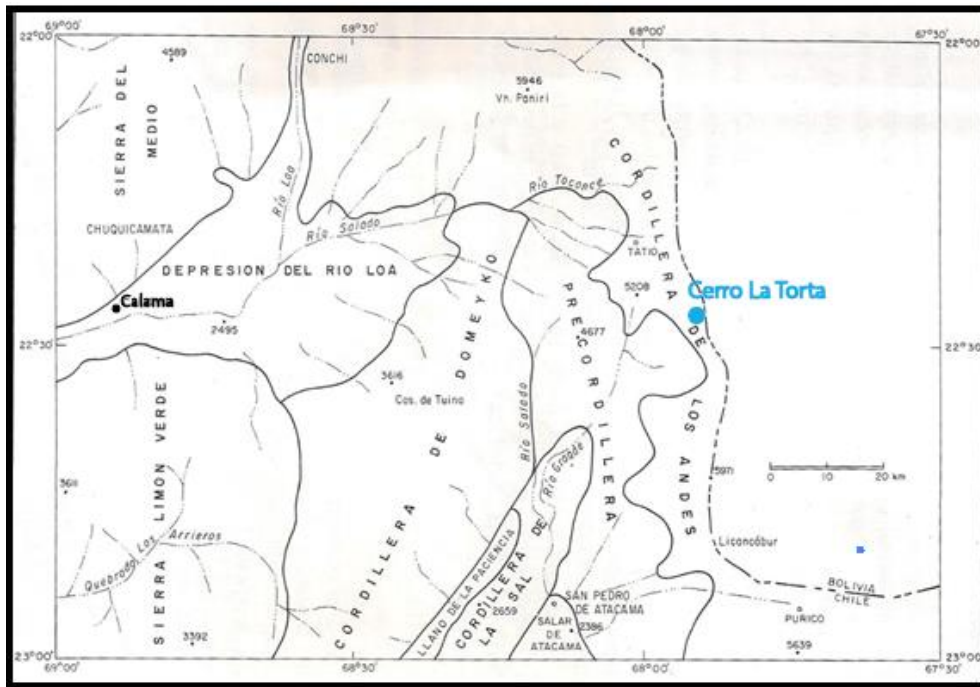


Figura 1. Mapa de unidades morfoestructurales. Servicio Nacional de Geología y Minería. Marinovic y Lahsen (1984).

### 2.2.1. MARCO GEOLÓGICO LOCAL

La zona de la Precordillera-Cordillera de Los Andes se caracteriza por la presencia de rocas del Cenozoico superior que se disponen, mediante discordancias angulares y de erosión, sobre secuencias mesozoicas y cenozoicas. Éstas últimas, afloran como cerros-islas entre una cubierta de ignimbritas o en el fondo de las quebradas (figura 2).

### 2.2.1.1. Rocas volcánicas del Cenozoico superior (Marinovic y Lahsen, 1984)

Son el resultado de la intensa actividad volcánica miocena-holocena, tanto efusiva (lavas) como explosiva (ignimbritas), junto con un tectonismo intenso relacionado al alzamiento andino (Lahsen 1976,1982). Los centros eruptivos presentan un marcado control estructural dado por su distribución coincidente con los principales sistemas de fallas y/o lineamientos de dirección N-S, NW-SE y NE-SW.

#### ***Ignimbritas***

Se dividen en tres grupos según su edad, Mioceno, Plioceno y Pleistoceno, y corresponden a flujos piroclásticos de composición dacítica y andesítica. Se diferencian trece unidades, de las cuales, se abarca una, correspondiente a la Ignimbrita Tatio, donde sobreyace La Torta.

#### *Ignimbritas pleistocénicas*

Ignimbrita Tatio (Qt): Lahsen (1969) la define como la toba soldada más joven que aflora en el sector del valle de El Tatio. Se compone de tobas cristalinas poco a moderadamente consolidadas, de colores gris blanquecino a rosado.

Se extiende desde el extremo sur del cerro Piedras Grandes hasta la cuenca del Río Putana, circundando los cerros de Tocorpuri (figura 2) y yéndose hacia el este a territorio boliviano. En este sector, los flujos de la ignimbrita se disponen radialmente desde el domo riolítico de Tocorpuri, lo que sugiere que este domo fue extruido desde el mismo centro del cual se emitió, inicialmente, al menos, algunos de los flujos que originaron la Ignimbrita Tatio. Hacia el oeste, el cordón Tucle-Puripícar es una barrera natural de estos flujos.

Su espesor varía entre 40 y 60 m cerca del cerro Piedras Grandes y es de unos 14 m en la confluencia de los ríos Putana y Blanco (Ramírez, 1979). En la parte central del valle de El Tatio alcanza una potencia de hasta 100 m, acunándose rápidamente hacia el oeste, alcanzando unos pocos centímetros en el cordón Tucle-Puripícar.

La Ignimbrita Tatio ha sido datada en menos de 1 Ma por Lahsen & Munizaga (1979), definiéndose una edad actualizada, con Ar/Ar, de  $0,7 \pm 0,01$  Ma por Salisbury et al. (2010); asignando esta unidad al Pleistoceno medio.

### 2.2.1.2. Volcanes

Se definen como estratovolcanes de composición andesítica y dacítica y, en menor medida, a domos y lava-domos dacíticos y, de forma subordinada, riolíticos. Sus edades están comprendidas entre el Mioceno inferior y el Holoceno.

Los volcanes se disponen de forma N-S a lo largo de la Cordillera de Los Andes, interceptados por cordones volcánicos orientados NW-SE. De esta forma, sus lavas

abarcan un área de 1800 km<sup>2</sup>, disponiéndose sobre la Formación San Pedro e intercalándose con ignimbritas de edades Mioceno superior y Pleistoceno.

Basado en sus relaciones estratigráficas, dataciones radiométricas y, en menor medida, en su grado de erosión, las lavas de los volcanes se agrupan en tres unidades estratigráficas: Conjunto de volcanes I, II y III (Marinovic & Lahsen, 1984).

El área de estudio abarca los conjuntos de volcanes II y III, donde el domo Cerro La Torta forma parte de este último.

#### *Conjunto de volcanes II (PIQv)*

Corresponden a volcanes y flujos de lavas distribuidos en el extremo oriental de la Hoja Calama que sobreyacen a las Ignimbritas Puripícar y Pampa Guayacanes e infrayacen a las Ignimbritas Tatio y Cajón.

En general, conservan su perfil original, con cumbres redondeadas y, en ocasiones, profundamente disecadas por la erosión.

Los volcanes pertenecientes a esta unidad se distribuyen en la cadena principal NS y en los cordones volcánicos con orientación NW-SE.

Según su morfología, los edificios volcánicos se clasifican en Estratovolcanes, Lava-domos y Domos. Dentro del área de estudio se encuentra, como estratovolcán, los Cerros del Tatio, ubicados al noreste de La Torta, alineados en dirección NW-SE con el volcán Tatio (figura 2).

Litológicamente, los volcanes corresponden a andesitas de piroxeno, andesitas de hornblenda (Cerros del Tatio) y dacitas de hornblenda y biotita.

La edad mínima de esta unidad está determinada por la Ignimbrita Tatio, ya descrita, de edad Pleistoceno medio y su edad máxima, por la Ignimbrita Puripícar. Ésta posee dataciones de  $4,27 \pm 0,07$  y  $4,5 \pm 0,2$  Ma, según Maronovic y Lahsen (1984 y referencias incluidas), de  $4,02 \pm 0,11$  Ma, según de Silva (1989) y de  $4,09 \pm 0,02$  Ma, según dataciones K/Ar de Salisbury et al (2010). Lo anterior, ubica al Conjunto de volcanes II en el Pleistoceno inferior.

#### *Conjunto de volcanes III (Qv)*

Corresponden a los volcanes y coladas de lavas distribuidos en el extremo oriental de la Hoja Calama que sobreyacen a las Ignimbritas Tatio y Cajón y al Conjunto de Volcanes II y que están cubiertos, exclusivamente, por depósitos no consolidados, aluviales, coluviales, piroclásticos y morrénicos (figura 2)

Los volcanes pertenecientes a esta unidad, en su gran mayoría, presentan rasgos erosivos de glaciares pleistocénicos desarrollados sobre los 4300 m s.n.m. Siendo los edificios volcánicos más altos, llegando a los 5900 m de altura, aproximadamente.

Según su morfología, los edificios volcánicos se clasifican en dos grupos, Estratovolcanes y lava-domos. En el área de estudio se encuentran los volcanes Tatio

(5208 m) y Tocorpuri (5808 m) dentro del grupo de Estratovolcanes, mientras que La Torta (4,7 km<sup>3</sup>), se clasifica como un lava-domo

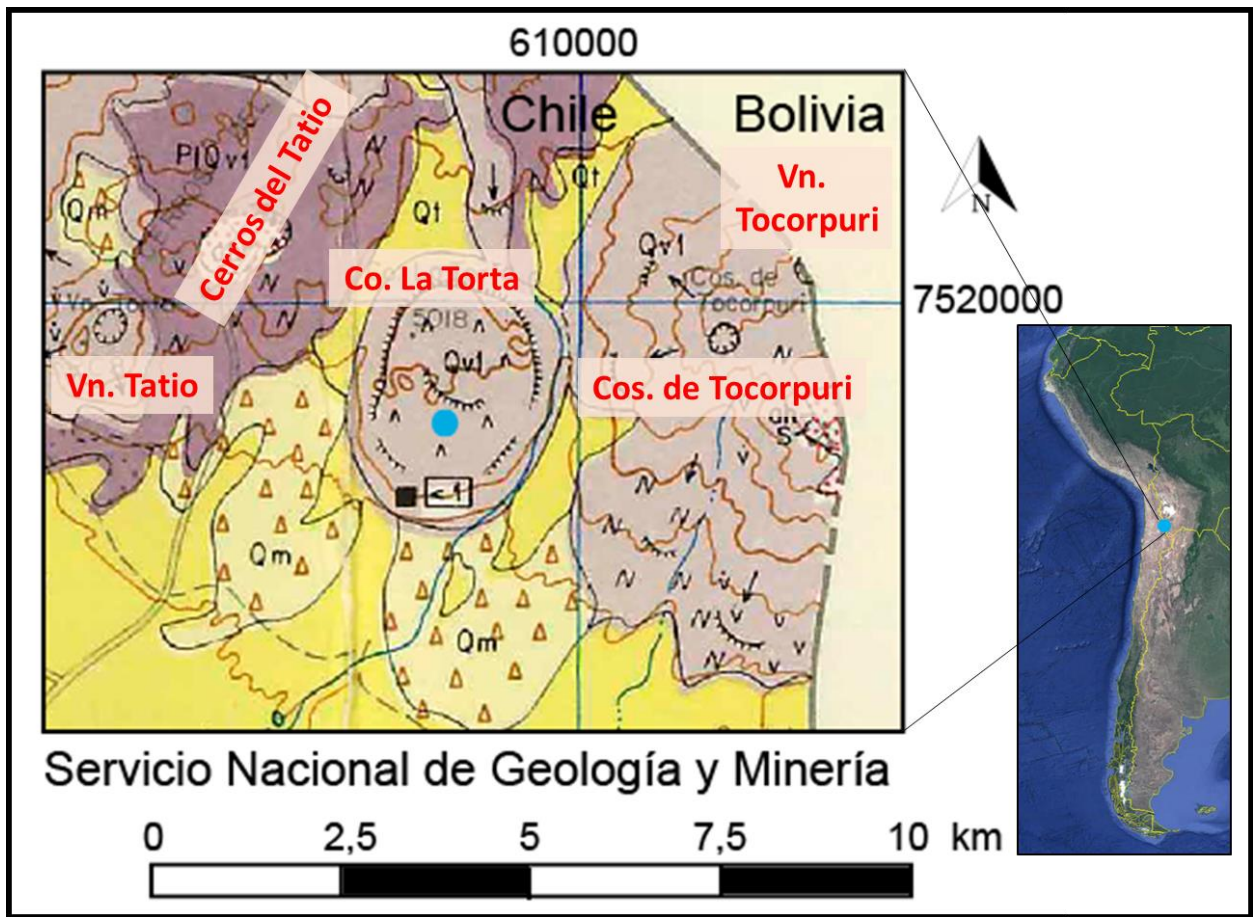
Litológicamente, esta unidad está conformada por andesitas de piroxeno; andesitas de hornblenda (flujos basales del volcán Tocorpuri W), dacitas de hornblenda y biotita y riolitas correspondientes exclusivamente al cerro La Torta de Tocorpuri (72,5% SiO<sub>2</sub>).

Se cuenta con edades radiométricas de 1,1 Ma de una andesita del volcán Toconce (Baker, 1977), menos de 1 Ma para la riolita del cerro La Torta de Tocorpuri, según Lahsen y Munizaga (1979) y de  $0,034 \pm 0,007$  Ma, según Renzulli et al (2006). Lo anterior permite asignar una edad Pleistoceno superior a Holoceno. No hay registros de actividad volcánica de tiempos históricos en el sector, solamente se registra una actividad hidrotermal permanente, con depósitos de azufre en el volcán Putana (fuera del área de estudio), pero sin emisión de material sólido.

#### 2.2.1.3. Depósitos no consolidados

##### *Depósitos morrénicos (Qm)*

Se distribuyen en el sector oriente, en la Cordillera de Los Andes en los flancos de los volcanes. Corresponden a morrenas laterales, terminales y sedimentos periglaciales, que se disponen sobre la Ignimbrita Tatio y subyacen a flujos dacíticos en el sector de los volcanes Sairecabur y Saciél, lo que permite asignar una edad pleistocena superior a estos depósitos. (figura 2).



PIQvI	Conjunto de volcanes II	Qt	Ignimbrita Tatio
QvI	Conjunto de volcanes III	Qm	Depósitos morrénicos

Figura 2. Marco geológico local, escala 1:250.000. El punto celeste indica al domo Cerro La Torta. Abajo se presenta la leyenda del mapa. Servicio Nacional de Geología y Minería. Marinovic y Lahsen (1984).

## 2.2.2. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL LOCAL

La Formación Lomas Negras presenta pliegues anticlinales y sinclinales, abiertos y estrechos, con ejes curvos y rumbo general N-S, extendiéndose unos cientos de metros.

Las unidades de ignimbritas del Mioceno superior (Sifón, Río Salado, etc.) se encuentran localmente deformadas en pliegues amplios con ejes de orientación NW-NE en el borde occidental de la Precordillera.

Tibaldi et al. (2009) reconocen cuatro eventos tectónicos principales que afectaron la zona comprendida entre el Salar de Uyuni y el de Atacama: i) Fase compresiva en dirección E-W a WNW-ESE acompañado de fallas de rumbo invertidas y plegamientos

en secuencias sedimentarias, durante el Mioceno medio a tardío, ii) fallas invertidas con  $\sigma_1$  en dirección NW-SE y  $\sigma_3$ , vertical y. iii) fallamiento de rumbo con el  $\sigma_1$  en la misma dirección anterior, pero con  $\sigma_3$  en dirección NE-SW, ambas durante el Plioceno. iv) fallamiento normal en dirección NW durante el Plioceno tardío y Cuaternario, con  $\sigma_3$  aún en dirección NE-SW y  $\sigma_2$  intercambiado con la dirección de  $\sigma_1$ .

La zona de estudio en este trabajo (figura 2 y 3) presenta actividad tectónica desde al menos 1Ma (cuarto evento tectónico de Tibaldi et al., 2009) correspondiente a fallas normales en dirección NW-SE ubicadas en el área de Los Cerros de Tocorpuri y al norte de éstos (figura 4). El primer evento es una falla normal mayor que cruza el estratocono Volcán Tocorpuri (figura 3, nf1, Lucchi et al., 2009), que, a su vez, es cortada por fallas menores en dirección ENE-WSW (nf2) evidenciando eventos extensivos regionales en el Pleistoceno temprano a medio. Cortando al evento anterior, existen fallas normales en dirección NW-SE al norte de Tocorpuri (nf3, cuarto evento de Tibaldi et al., 2009).

Hacia el oeste del Volcán Tatio y del Campo Geotermal El Tatio, se reconoce un sistema de cabalgamientos mayores con dirección NNE-SSW (tf1-4) (Lucchi et al., 2009), los cuales son tapados por depósitos morrénicos derivados de la actividad glacial regional del Pleistoceno medio a tardío. En este contexto, el domo Cerro La Torta es erupcionado por el último evento, tf4 (figura 4).

Los cordones volcánicos, presentes en todas las etapas de evolución de la zona, se disponen N-S, NE y NW paralelos a las fallas y lineamientos, y en algunos casos, son coincidentes con las estructuras.



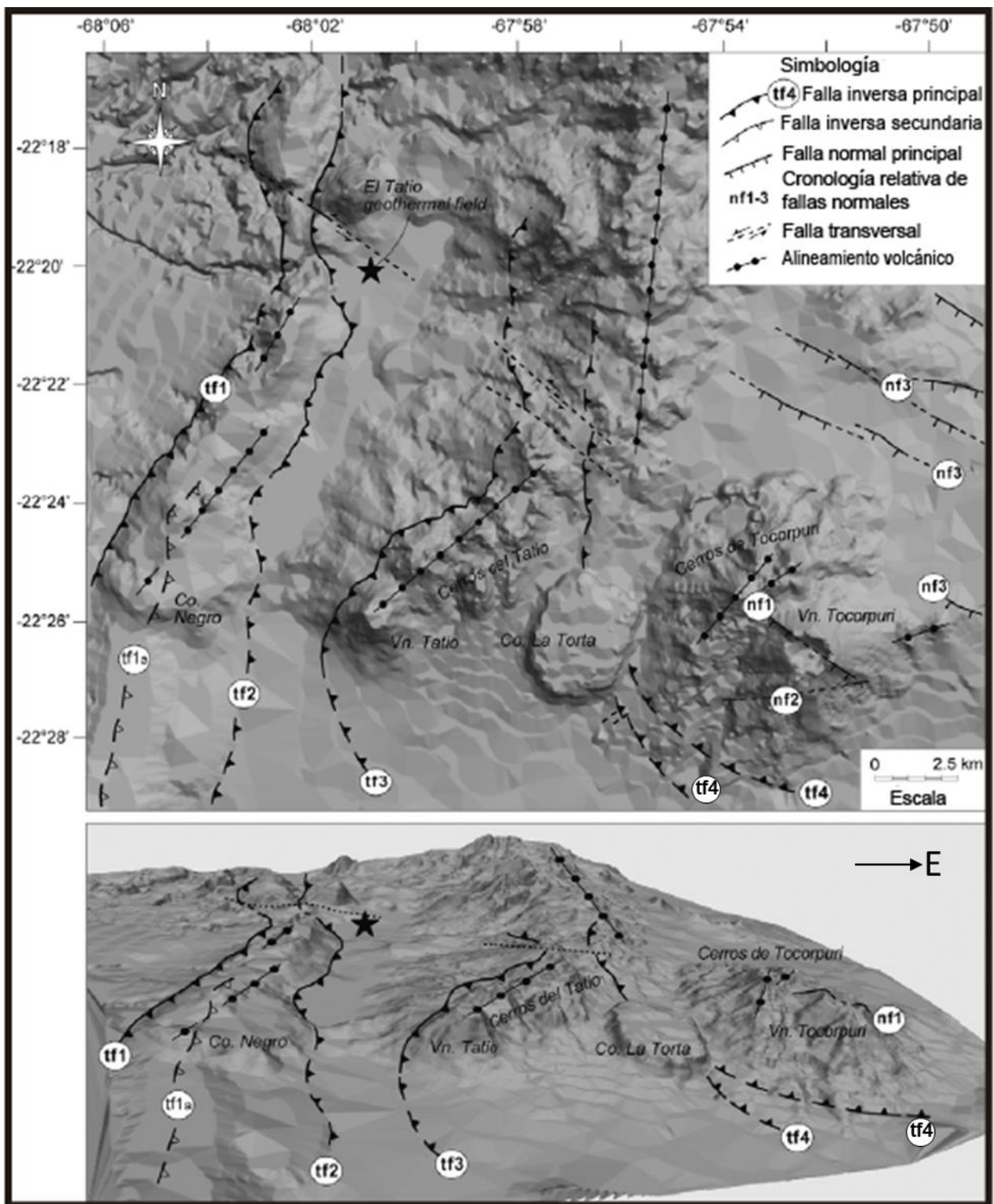


Figura 3. Mapa estructural esquemático del área volcánica de El Tatio. Modificado de Lucchi et al., 2009.

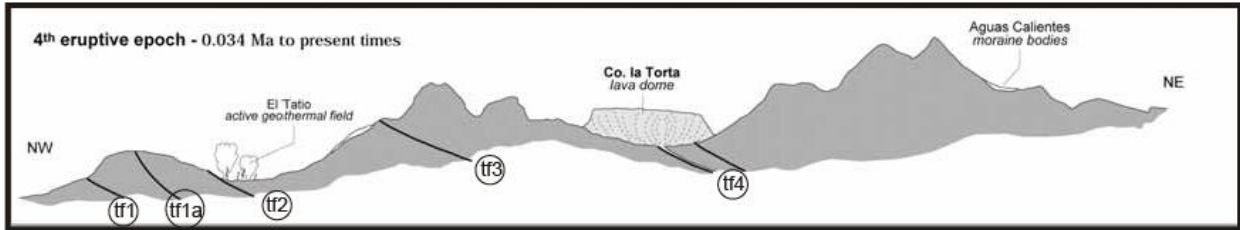


Figura 4. Modelo esquemático de la erupción del domo Cerro La Torta, mediante un ascenso de magma facilitado por cabalgamientos. Editado de Lucchi et al. (2009).

### 2.3. DOMO CERRO LA TORTA DE TOCORPURI

Corresponde a un lava-domo que cubre un área de 12 km<sup>2</sup> y un volumen de 4,7 km<sup>3</sup>, exhibiendo una forma circular elongada en dirección NE-SW, dándole el nombre de torta. Se ubica al oeste de los Cerros de Tocopuri (figura 5) cerca de la frontera con Bolivia, en la II región de Atacama, al SE del Campo Geotermal El Tatio.

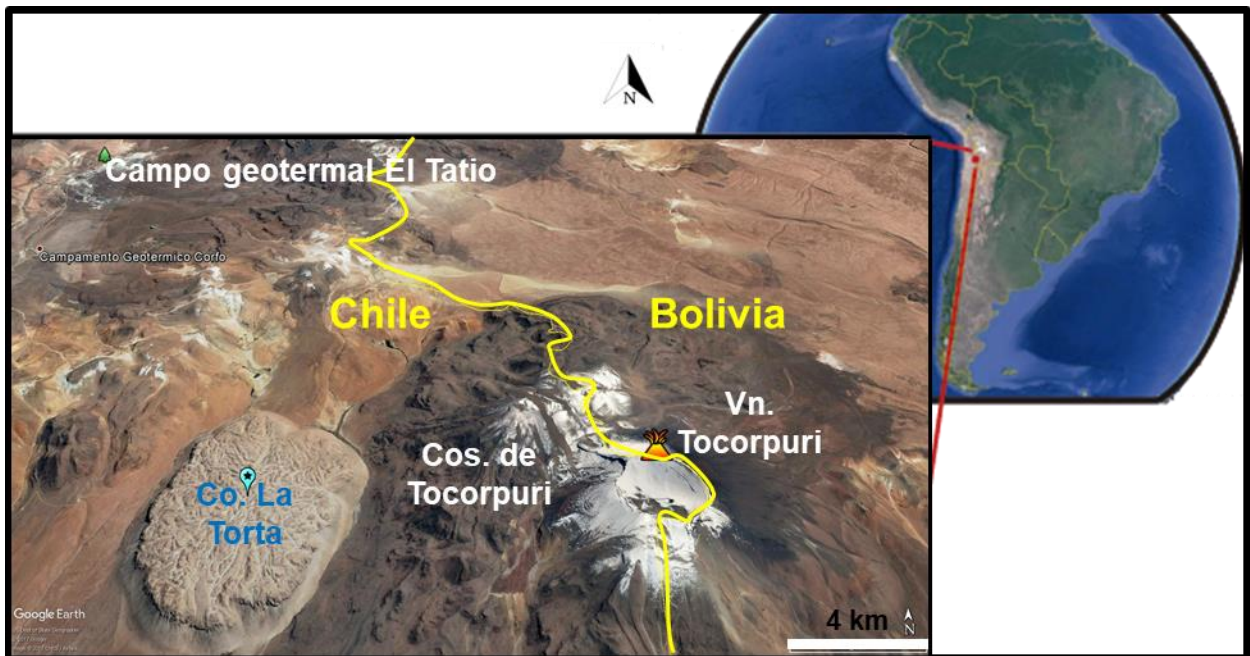


Figura 5. Mapa de ubicación geo gráfica del domo Cerro La Torta, al oeste de los Cerros de Tocopuri. Se observa su morfología circular elongada en dirección NE-SEW. Imagen obtenida de Google Earth.



Según Lucchi et al. (2009), el emplazamiento del Cerro La Torta ocurrió en la cuarta época eruptiva (0,034 Ma), en el extremo del cabalgamiento más oriental del área de estudio, denominado tf. Este cabalgamiento corta a la Ignimbrita Tatio (figura 4), sugiriendo un rol significativo de este tipo de fallas en el control del ascenso y emplazamiento del magma, transformándose en el camino de éste (Lucchi et al., 2009, Tibaldi 2005, Galland et al., 2007).

Macroscópicamente, la lava es leucocrática y presenta textura porfírica con fenocristales de plagioclasa, cuarzo, biotita, anfíbol y menor piroxeno en una masa fundamental vítrea. Los cristales poseen buena integridad, pero baja estructuralidad con un tamaño no superior a los 7mm. No se observa feldespato alcalino, por lo que se clasificaría como una dacita de anfíbol y biotita.

Es posible separar el domo en tres zonas: (i) de bloque, compuesta por estructuras columnares sub-verticales en la base; (ii) de cizalle perpendicular a la zona anterior en la porción central, y (iii) de diaclasamiento de flujo en la parte superior (Bidart, 2014) (figura 6).



*Figura 6. Fotografía de la ladera del Cerro La Torta donde es posible observar la zona en bloques, con estructuras columnares; y la zona de cizalle; seguida por una cubierta rugosa o de diaclasamiento caótico. Tomado de Bidart (2014).*

### 2.3.1. DOMOS VOLCÁNICOS SIMILARES

En el área de El Tatio existen otros domos volcánicos de características similares a La Torta, de composición dacítica a riolítica con alto contenido de cristales. y se ubican hacia el norte y noreste de ésta (figura 7).

El Cerro Chillahuita se ubica 30 km al noreste de La Torta y posee características muy similares. Corresponde un domo volcánico de dacita de hornblenda y biotita, con un volumen de 2,6 km<sup>3</sup>, unos 200 m. de altura y forma circular alargada. Su cráter se encuentra hacia el sur de la lava, la cual se desplazó hacia el norte, quedando la forma característica de un “*low lava dome*” o torta. Además, al igual que La Torta, parece ser producto de un solo evento extrusivo, sin evidencias de actividad explosiva (de Silva et al., 1994) y su edad, determinada con U-Pb en circones, es de 101 ka y entre 104 a 83 ka para dataciones de <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar en sanidina y biotita (Tierney et al., 2016).

El Cerro Chao es un cuerpo de lava silícea tipo couleé, de 14 km de longitud y 26 km<sup>3</sup>, ubicado a 42 km al noroeste de La Torta. Dataciones de U-Pb en circones, determinan una edad de cerca de 101 ka (Tierney et al., 2016). Se compone de dacitas y riodacitas ricas en potasio y con alto contenido de cristales de plagioclasa, cuarzo, hornblenda, biotita, esfero, sanidina accesoria y óxidos. Su erupción fue gatillada por una intrusión de magma máfico dentro de un cuerpo de magma dacítico homogéneo y con alto contenido de cristales, emplazándose en un periodo de 100 a 150 años, con la ayuda de la pendiente topográfica (3 a 20°) y el gran volumen de magma disponible (de Silva et al., 1994).

El Cerro Chascón también corresponde a una torta, ubicada en la caldera Pastos Grandes, a 60 km al noreste de La Torta, en Bolivia. Es el cuerpo volcánico más grande dentro de una cadena de cuerpos silíceos conocido como Complejo Cerro Chascón-Runtu Jarita, el cual correspondería producto de una fisura en dirección NW-SE, a partir de un dique (de Silva et al., 1994, Watts et al., 1999). La edad de este complejo, en mediciones de <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar, es de 85 ka aproximadamente (Watts et al., 1999).

Geográfica y químicamente, el complejo Chascón-Runtu Jarita se divide en dos grupos; uno al norte, compuesto de cuatro domos riodacíticos con rara presencia de enclaves máficos, y uno al sur, consistente en una cadena de seis pequeños domos de no más de un km<sup>3</sup> en total, de composición dacítica a riolítica, con dominancia de enclaves máficos, a medida que se avanza hacia el sur. La erupción de ambos grupos estaría gatillada por una recarga de magma máfico (Watts et al., 1999).

Por último, se encuentra el Cerro Chanka ubicado en el flanco noroeste del volcán Azufre, a unos 85 km al noroeste de La Torta. A diferencia de los otros domos, éste es mucho más antiguo, con una edad de 1,5 ±0,1 Ma (Roobol et al., 1974). Existen otros

dos domos vecinos que se ubican al este del volcán Azufre y son más jóvenes que el anterior, donde el Cerro Apacheta, es el más pequeño (un km. de diámetro).



Figura 7. Mapa de ubicación de domos similares a La Torta junto con volcanes de la zona. Imagen obtenida de Google Earth.

## CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA DE TRABAJO

Las muestras utilizadas corresponden a un corte transparente-pulido perteneciente al trabajo de título de Bidart (2014). La muestra de mano de la cual se realizó el corte transparente, del mismo código, y los montajes de cristales separados, se denomina M6 y fue extraída de las coordenadas 22°25'13.60"S, 67°57'20.52"W. En consecuencia, no hubo trabajo en terreno para este estudio.

Se utiliza M6, ya que es la que estaba disponible físicamente para su estudio.

### 3.1. TRABAJO EN LABORATORIO

Todo el trabajo realizado fue en función de las inclusiones vítreas. Cannatelli et al. (2016) muestran una recopilación completa sobre ellas. Estos autores definen una inclusión vítrea como gotitas (1-200  $\mu\text{m}$ ) de fundido silicatado atrapadas en irregularidades de cristales durante su crecimiento en un cuerpo magmático que se definen por su composición de burbujas, cristales y vidrio, formando familias de inclusiones (Melt Inclusion Assemblage: MIA). Además, entrega una guía de metodologías a seguir para el estudio y análisis de inclusiones fundidas, desde su caracterización petrográfica, pasando por las reglas de Roedder y microtermometría, hasta los análisis geoquímicos como EMP, SIMS, LA-ICP-MS, espectroscopia Raman y FT-IR.

#### 3.1.1. PETROGRAFÍA

La descripción petrográfica se realizó en un corte transparente-pulido y dos montajes de minerales separados, con un microscopio óptico, Olympus BX51, perteneciente al Laboratorio de Inclusiones Fluidas y Vítreas del Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes (CEGA), del Departamento de Geología de la Universidad de Chile. Las fotomicrografías se tomaron con una cámara M Shot a través del software M Shot Digital Imaging System.

En el corte transparente (M6), de 30  $\mu\text{m}$  de espesor, el criterio de selección de los cristales se centró en la preservación tanto del cristal en sí, como en sus inclusiones y el tamaño de estas últimas, las que no podían ser menores a 3  $\mu\text{m}$  de diámetro, además del cumplimiento de las reglas de Roedder (Cannatelli et al.,2016).

A partir de la muestra de mano, una parte fue molida y tamizada a mallas #18 y #35 en el Laboratorio de Separación de Minerales del Departamento de Geología de la Universidad de Chile, para recuperar cristales individuales de plagioclasa, cuarzo y

anfíbol, tamaño bajo malla 35#, y montarlos en epoxy. También, se separaron biotitas en malla bajo #18 (y sobre #35). Así se crearon los montajes MA, con anfíbol, plagioclasa y cuarzo, y MB, con plagioclasa, cuarzo y vidrio. Estos montajes fueron pulidos por ambos lados con lijas de P800, P1200, P4000 y P5000 para exponer en superficie las inclusiones vítreas identificadas de manera de poder ser analizadas por microsonda electrónica.

Las inclusiones más importantes, y las que se priorizaron en el pulido, fueron las totalmente homogéneas u homogéneas con burbuja, en caso de que las primeras no existieran. De esta forma es posible analizar y medir la concentración del vidrio que quedó atrapado en la inclusión en un determinado momento.

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

En el laboratorio SEM (Scanning Electron Microscopy) del CEGA, en el Departamento de Geología de la Universidad de Chile, se determinó, semicuantitativamente, la composición de los 30 cristales seleccionados del corte M6 y de los minerales separados, mediante electrones retro-dispersados (back scattered electrons). Además, se tomaron puntos en los distintos minerales opacos observados en el microscopio óptico y del vidrio de las inclusiones, asegurándose que efectivamente estas últimas se encontraban en superficie.

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

Los análisis de elementos mayores se realizaron por microsonda electrónica (EMP. Electron MicroProbe), modelo JEOL KXA-8230, en el Laboratorio de Microscopía Electrónica y Análisis por Rayos X (LAMARX), perteneciente a la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Los análisis se realizaron en anfíbol, plagioclasa, piroxeno, vidrio de inclusiones vítreas y cuarzo (este último sólo en los montajes de minerales separados).

Los parámetros utilizados son (tabla 1):

Tabla 1. Parámetros utilizados para el análisis de las muestras mediante EMPA.

Corriente	9,995+10 <sup>-9</sup> A
Voltaje	15 kV
Cristales usados	TAP, PETJ, LIF, LIFH
Líneas detectadas	K $\alpha$
Tiempo analizado en <i>peack</i>	Ajustable entre 5 y 20 seg
Tiempo analizado en <i>backgrund</i>	Ajustable entre 2,5 y 10 seg
Elementos analizados	F, Na, Mg, Al, Si, P, Cl, K, Ca, Ti, Mn, Fe, Zr

### 3.1.4. ESPECTROMETRÍA DE MASAS

Los análisis de elementos trazas se realizaron con la técnica de LA-ICP-MS (*Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*), ubicado en el Laboratorio de Espectrometría de Masas del Departamento de Geología de la Universidad de Chile.

El espectrómetro de masas utilizado es un cuadrupolo Thermo Scientific, modelo iCapQ con las especificaciones mostradas en la tabla 2.

Los estándares externos utilizados fueron el Nist SMR 610 (vidrio), como estándar primario, y el MRM BHVO-2G (vidrio basáltico), del USGS, como secundario.

Tabla 2. Parámetros usados para el análisis de las muestras mediante LA-ICP-MS.

Fluencia del láser	6 J7cm <sup>2</sup>
Frecuencia	7 Hz
Tamaño del haz	Ajustable entre 15 y 65 μm
Celda de ablación	HelEx2
Celda de flujo de gas He	0,6 lt/min
Flujo de gas nebulizador	0,95 a 1 lt/min
Tiempo de permanencia por isótopo	10 mseg

Se midieron 80 isótopos a partir de 58 elementos diferentes (tabla 3), aplicando la medición de estándares al principio y final de cada análisis. El haz del láser fue ajustado al tamaño de cada inclusión y espacio disponible en cada cristal, obteniendo datos como una señal de intensidad versus tiempo.

Tabla 3. 80 isótopos medidos a partir de 58 elementos químicos cuantificados.

Isótopos medidos (80)	Elementos cuantificados (58)
<sup>7</sup> Li, <sup>29</sup> Si, <sup>23</sup> Na, <sup>24</sup> Mg, <sup>25</sup> Mg, <sup>27</sup> Al, <sup>31</sup> P, <sup>35</sup> Cl, <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>66</sup> Zn, <sup>68</sup> Zn, <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>104</sup> Pd, <sup>105</sup> Pd, <sup>106</sup> Pd, <sup>107</sup> Ag, <sup>109</sup> Ag, <sup>111</sup> Cd, <sup>118</sup> Sn, <sup>120</sup> Sn, <sup>125</sup> Te, <sup>129</sup> Xe, <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>181</sup> Ir, <sup>191</sup> Ir, <sup>194</sup> Pt, <sup>195</sup> Pt, <sup>196</sup> Pt, <sup>197</sup> Au, <sup>200</sup> Hg, <sup>206</sup> Pb, <sup>207</sup> Pb, <sup>208</sup> Pb, <sup>232</sup> Th, <sup>238</sup> U	Li, Si, Na, Mg, Al, O, Cl, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Fe, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Kr, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Ru, Pd, Ag, Cd, Sn, Te, Xe, Cs, Ba, La, Cu, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, Ir, Pt, Au, Hg, Pb, Th, U

## 3.2. TRABAJO EN GABINETE

### 3.2.1. REDUCCIÓN DE DATOS

La reducción de datos se realizó con el software IOLITE (Paton et al., 2011) implementado en IGOR Pro (Wavemetrics), el cual entrega datos de concentraciones a partir de un estándar interno entregado por los datos de microsonda electrónica, punto por punto analizado, por lo que es necesario que los puntos tomados en ambos análisis sean, en lo posible, en el mismo lugar o cercano. Lo anterior se determinó usando el NIST 610, de modo que, con El BHVO-2G, se determinaron los isótopos que se ajustan mejor para ser usados en próximos diagramas y resultados (Tabla 4).

Tabla 4. Isótopos elegidos para crear resultados finales.

Isótopos cuantificados (51)
<sup>7</sup> Li, <sup>29</sup> Si, <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>55</sup> Mn, <sup>57</sup> Fe, <sup>59</sup> Co, <sup>60</sup> Ni, <sup>63</sup> Cu, <sup>66</sup> Zn, <sup>69</sup> Ga, <sup>85</sup> Rb, <sup>88</sup> Sr, <sup>89</sup> Y, <sup>90</sup> Zr, <sup>93</sup> Nb, <sup>106</sup> Pd, <sup>107</sup> Ag, <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>196</sup> Pt, <sup>197</sup> Au, <sup>208</sup> Pb, <sup>232</sup> Th, <sup>238</sup> U

### 3.2.2. TRATAMIENTO DE DATOS

Teniendo los datos definitivos de EMP, mediante el software PetroGraph (Petrelli et al., 2005), se exportaron para crear diagramas TAS para inclusiones, además de diagramas Harker y de número de magnesio (#Mg).

En el software IgPet, con los datos de EMP, se realizaron diagramas ternarios de clasificación de plagioclasas y piroxenos y, para la clasificación de anfíboles, se utilizó una hoja de cálculo en Excel (Locock, 2014), ACES\_9-2.xls.

Con los datos reducidos del análisis de espectrometría de masas se realizó diagramas tipo spider para determinar la signature geoquímica de las muestras. Para ello, se normalizó respecto a la composición del promedio del vidrio de masa fundamental de M6, a corteza continental superior, de Taylor y McLennan (1985) y al MORB, de Pearce (1983).

### 3.2.3. GEOTERMOBAROMETRÍA

La determinación de las condiciones químicas y físicas como temperatura, presión, agua y fugacidad de oxígeno en el momento de cristalización de las fases involucradas

se realizó con diferentes hojas de cálculos ejecutables en Excel entregadas por sus respectivos autores.

Se calculó un termobarómetro a partir de anfíbol en la hoja de cálculo, *Amp-TB.xls*, de Ridolfi et al. (2010). Utilizando el equilibrio entre plagioclasas y sus respectivas inclusiones vítreas, se calcularon temperaturas con la hoja de cálculo *RiMG069\_Ch03\_Feldspar-liquid P-T-H2O.xls* de Putirka (2008); de la misma forma, se determinó para el equilibrio entre plagioclasa y feldespato alcalino con *RiMG069\_Ch03\_two-feldspar\_T.xls* (Putirka, 2008).

Se determinó un geotermómetro para anfíbol y plagioclasa de Hora et al (2013) que calcula, combinando los trabajos de Holland y Blundy (1994) y Ridolfi y Renzulli (2012) la temperatura de la cristalización eutéctica de estos minerales, mediante la hoja de cálculo *Hbl-Plag\_worked\_example.xls*.

Por último, se calculó temperatura para la formación de óxidos de Fe-Ti según el trabajo de Lepage (2003) mediante la hoja de cálculo de Excel *Table\_5\_ILMAT\_magnetite\_ilmenite\_thermobarometry.xls*



# CAPITULO 4. RESULTADOS

## 4.1. PETROGRAFÍA

### 4.1.1. CORTE TRANSPARENTE-PULIDO, M6

Del corte transparente se eligieron 10 cristales de plagioclasa, anfíbol y cuarzo, los cuales fueron identificados con las letras del abecedario (A-J) más otra antepuesta que identifica a cada mineral (p=plagioclasa, a=anfíbol, q=cuarzo). Las familias de inclusiones vítreas (Silicate Melt Inclusion Assemblage (MIA)) se identificaron con una F con subíndice numérico.

#### 4.1.1.1. Descripción petrográfica

La muestra corresponde a una roca ígnea extrusiva con textura hipocristalina, inequigranular, porfírica y con cristales hipidiomórficos. También presenta textura glomeroporfírica en plagioclasas y cumulo porfírica con plagioclasas, biotita y anfíbol.

La masa fundamental corresponde al 40% del total de la muestra. Presenta textura vitrofírica y vesicular. Las vesículas corresponden al 10% de ésta, evidenciando un flujo alrededor de los fenocristales. Se presentan aplanadas con un tamaño entre 0,5 a 1 mm.

Los fenocristales (60%) son mayores a 0,1 mm y corresponden a plagioclasa (24%), cuarzo (15%), biotita (8%), anfíbol (12%) y ortopiroxeno (1%).

**Plagioclasa:** Se observan dos familias, una de grano medio, de 1 a 2 mm, y otra de tamaño fino, entre 0,5 y 0,7 mm. En ambas, los cristales son prismáticos tabulares con caras ehedrales, excelente estructuralidad e integridad, macla Carsbald, polisintética y policarsbald (macla albíta) en menor medida. La mayoría se encuentran zonados concéntricamente. Algunos de ellos se conservan fracturados, mientras que otros, con evidencia de reabsorción e inclusiones opacas. El 40% presenta textura *sieve* y parche con secciones rectangulares de reabsorción rellenas de vidrio, orientadas de acuerdo al clivaje. También presentan inclusiones vítreas y de circones.

**Cuarzo:** Cristales anhedrales subredondeados y fracturados. Son de grano medio (1-3 mm), con textura de reabsorción evidenciada por embahiamientos.

**Biotita:** Cristales tabulares elongados de 1 a 4 mm, con integridad buena y bordes de reabsorción en algunos casos.

**Anfíbol:** Cristales prismáticos alargados y basales, de grano medio a grueso (2 a 6 mm). Presentan pleocroísmos verdoso y marrón. Su estructuralidad es buena y su

integridad, baja con inclusiones de plagioclasa, opacas y vítreas. El 90% presenta bordes de descomposición y reabsorción.

Ortopiroxeno: Cristales prismáticos basales de integridad buena a mala, de grano fino (200 a 400  $\mu\text{m}$ ) y un cristal único de grano medio (2,8 mm). Presentan bordes de reacción de anfíbol e incluso, reemplazo total por este mineral.

Como minerales accesorios se observan circón en plagioclasa y anfíbol, con tamaños entre 0,2 a 0,3 mm. También, se observan óxidos de hierro-titanio incluidos en anfíbol y biotita, con tamaños entre 35 y 400  $\mu\text{m}$ , y 90  $\mu\text{m}$ , respectivamente.

De esta forma y debido a la nula presencia de feldespato alcalino, la roca se clasifica como una dacita de anfíbol y biotita.

#### 4.1.1.2. Descripción de familias de inclusiones vítreas

El criterio de selección de los cristales se centró en la preservación tanto del cristal en sí, como en sus inclusiones y el tamaño de estas últimas, las que no podían ser menores a 3  $\mu\text{m}$  de diámetro. Esto se debe a que el diámetro del haz de la microsonda pierde resolución y calidad de medición mientras más pequeño es y bajo este valor, la pierde toda validez.

Además, las inclusiones vítreas deben cumplir las reglas de Roedder para probar que realmente representan la composición del magma en el momento de su atrapamiento y no se han reequilibrado. Estas reglas son tres: i) Las inclusiones vítreas deben ser atrapadas en una sola fase homogénea; ii) las inclusiones deben comportarse como un sistema isocórico cerrado y iii) después de su atrapamiento nada se ha perdido o agregado a la inclusión.

Como se observa en la figura 8, cada mineral fue encerrado de acuerdo a un color: azul para plagioclasa, verde para anfíbol y celeste para cuarzo.

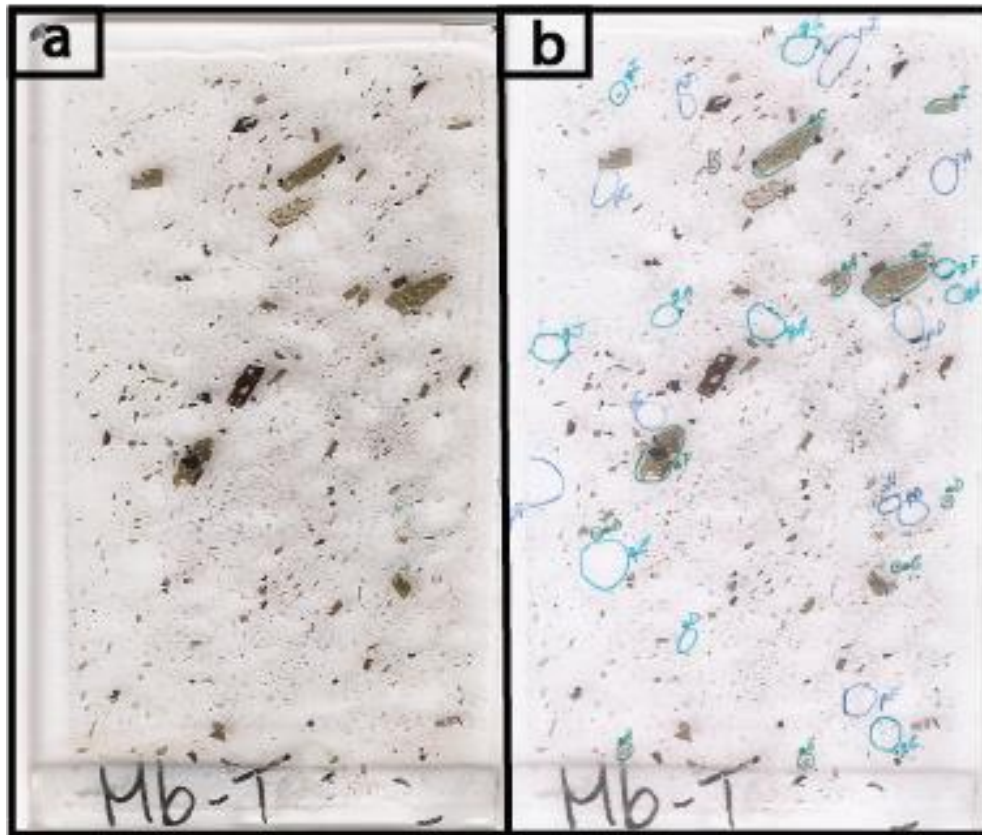


Figura 8. Fotografía del corte transparente M6. a) Muestra M6. b) Se indican en distintos colores los cristales seleccionados para identificar inclusiones.

Las MIAs se diferenciaron por el mineral huésped, la proporción vidrio/burbuja y su ubicación (Cannatelli et al., 2016). Además, se especificó la presencia o no de minerales dentro de las inclusiones.

Las inclusiones encontradas se caracterizan por ser grandes, con un promedio de 20  $\mu\text{m}$  de diámetro llegando a 100  $\mu\text{m}$  las de mayor envergadura. La gran mayoría son homogéneas con burbuja, encontrándose en plagioclasas y anfíboles, mientras que, en los cristales de cuarzo, las inclusiones se presentan en su gran mayoría recristalizadas (figura 9).

En cuanto a la cantidad de inclusiones, los cristales de cuarzo presentan no más de cinco, en cambio, las plagioclasas y anfíboles llegan al 1 a 2% del cristal.

En plagioclasas las inclusiones se encuentran en los bordes de zonación (crecimiento) de los cristales, siguiendo su forma, además de ser tabulares, al igual que su mineral huésped. Las inclusiones en anfíbol no presentan ninguna orientación preferencial, pero su forma es tabular a rómbica, siguiendo el clivaje. En cuarzo, son romboidales y sin orientación preferencial.

El detalle de cada cristal descrito se encuentra en el Anexo A.

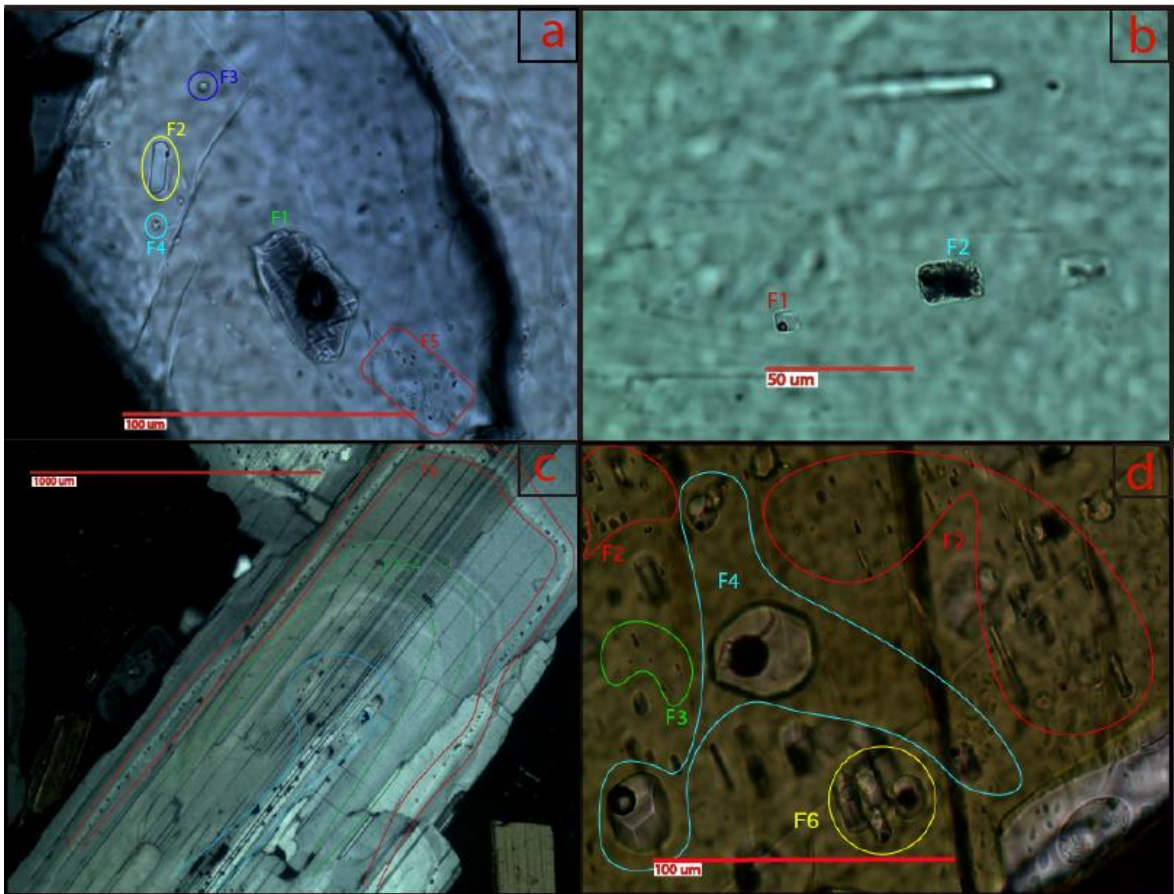


Figura 9. Fotomicrografía de familias de inclusiones vítreas ( $F_x$ ) descritas en distintos minerales. a) Cristal qH. b) Cristal qF. c) Cristal pl. d) Cristal aF. Para ver cada descripción, ir al Anexo A.

#### 4.1.1.3. Petrografía en SEM

El análisis de los 30 cristales en SEM reveló que la mayoría de las inclusiones no se encuentran en superficie, limitando la cantidad de puntos para análisis en microsonda, sumado a que son las de menor tamaño.

Se distinguen nuevas fases minerales incluidas en estos cristales, tales como apatito rico en flúor, espinelas, óxidos de hierro-titanio y sulfuros (figuras 10, 11 y 12)

La composición relativa de las inclusiones es de albita a anortosa, siendo, la gran mayoría, homogéneas u homogéneas con burbuja.

Las plagioclasas son ricas en calcio y sodio, pero con un porcentaje de potasio aproximado del 0,8% en peso. Por otro lado, los anfíboles son ricos en magnesio.



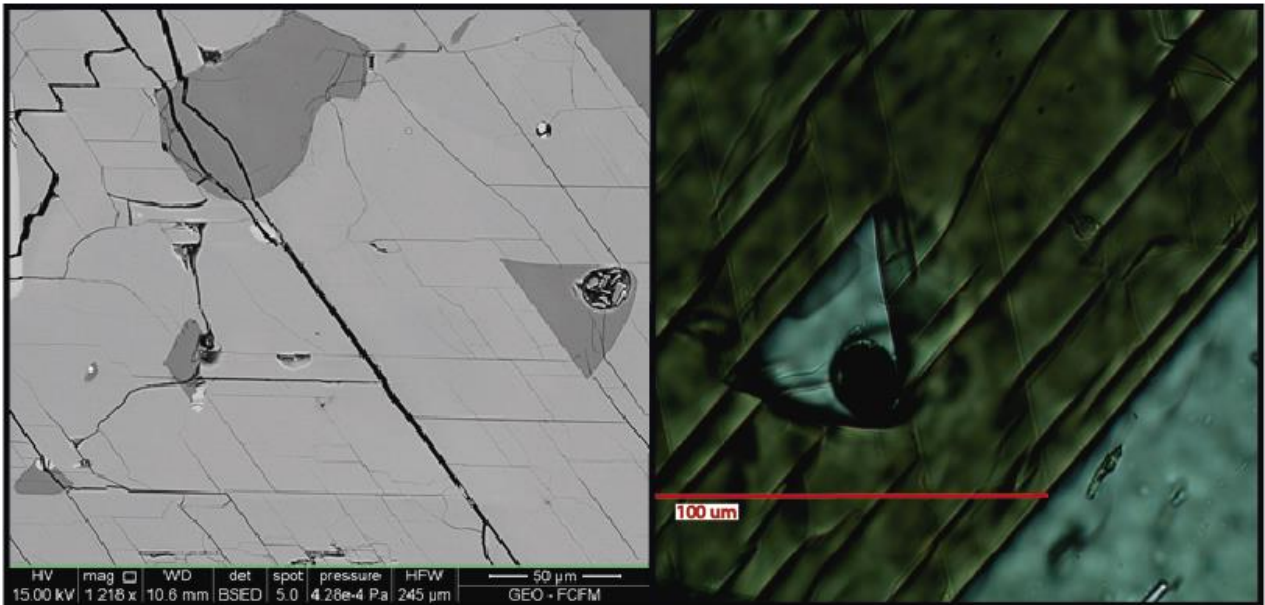


Figura 10. Fotomicrografía de una inclusión vítrea hospedada en anfíbol. A la izquierda se observa una imagen de electrones retrodispersados, y a la derecha, en luz transmitida, a nículos paralelos, en microscopio óptico. Se observa homogénea con una burbuja, que tiene cristales en su interior.

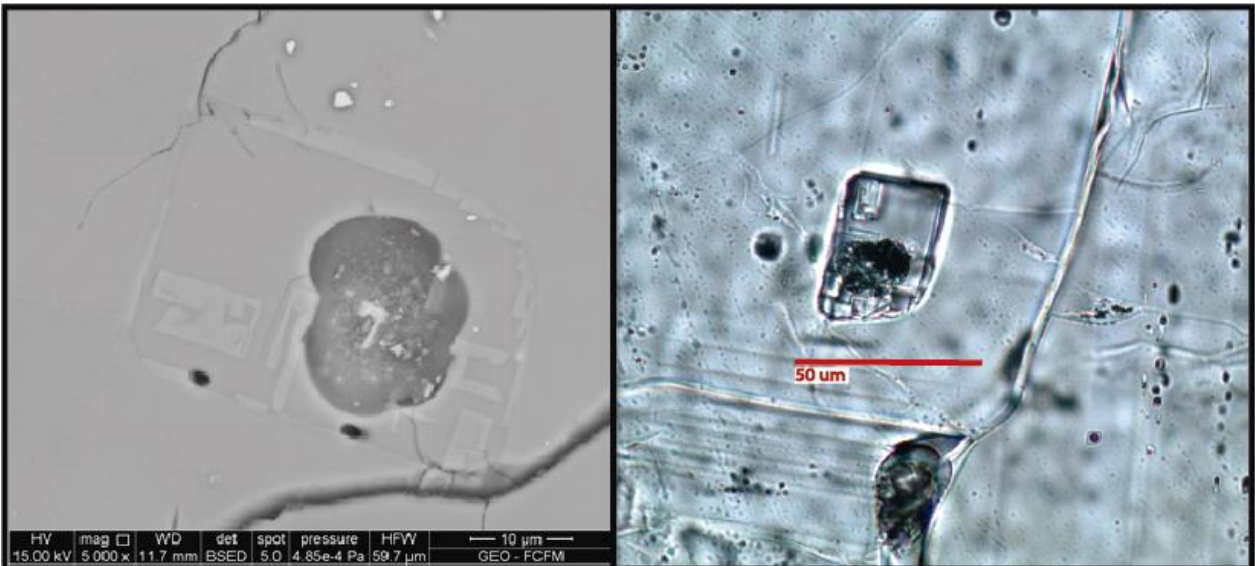


Figura 11. Fotomicrografía de una inclusión vítrea recristalizada hospedada en plagioclasa. A la izquierda se observa una imagen de electrones retrodispersados, y a la derecha, en luz transmitida, a nículos paralelos, en microscopio óptico. Se observan pequeños cristales y una burbuja dentro de la inclusión.

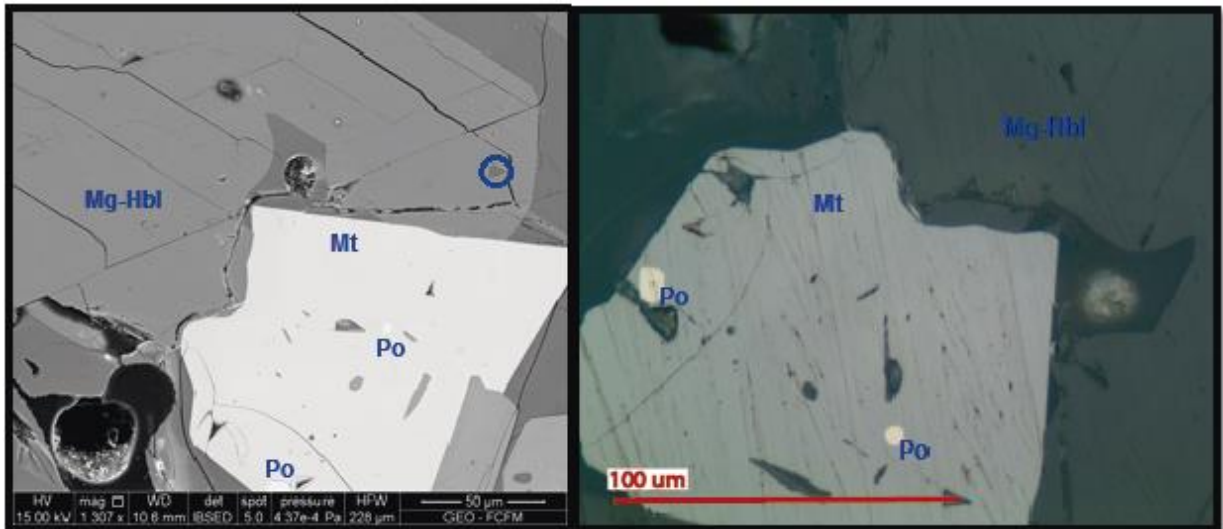


Figura 12. Fotomicrografía de electrones retrodispersados a la izquierda, y a luz reflejada en microscopio óptico, a la derecha. Cristal de magnetita (Mt), con inclusiones de pirrotina (Po), en paragénesis con un cristal de magnesio-hornblenda. Éste último, alberga una inclusión vítrea menor (círculo azul).

#### 4.1.2. MONTAJE DE CRISTALES SEPARADOS, MA

Corresponde a cristales de anfíbol (Mx7), cuarzo (Mx11), plagioclasa (Mx11), vidrio (Mx1) y biotita (Mx2), de los cuales afloraron 15 y se analizaron 5 (figura 13).

La gran mayoría presenta inclusiones, sin embargo, solo unas pocas están en superficie.

Visto en SEM, los cristales de vidrio resultan ser ricos en potasio, con un porcentaje en peso de 2% en promedio.

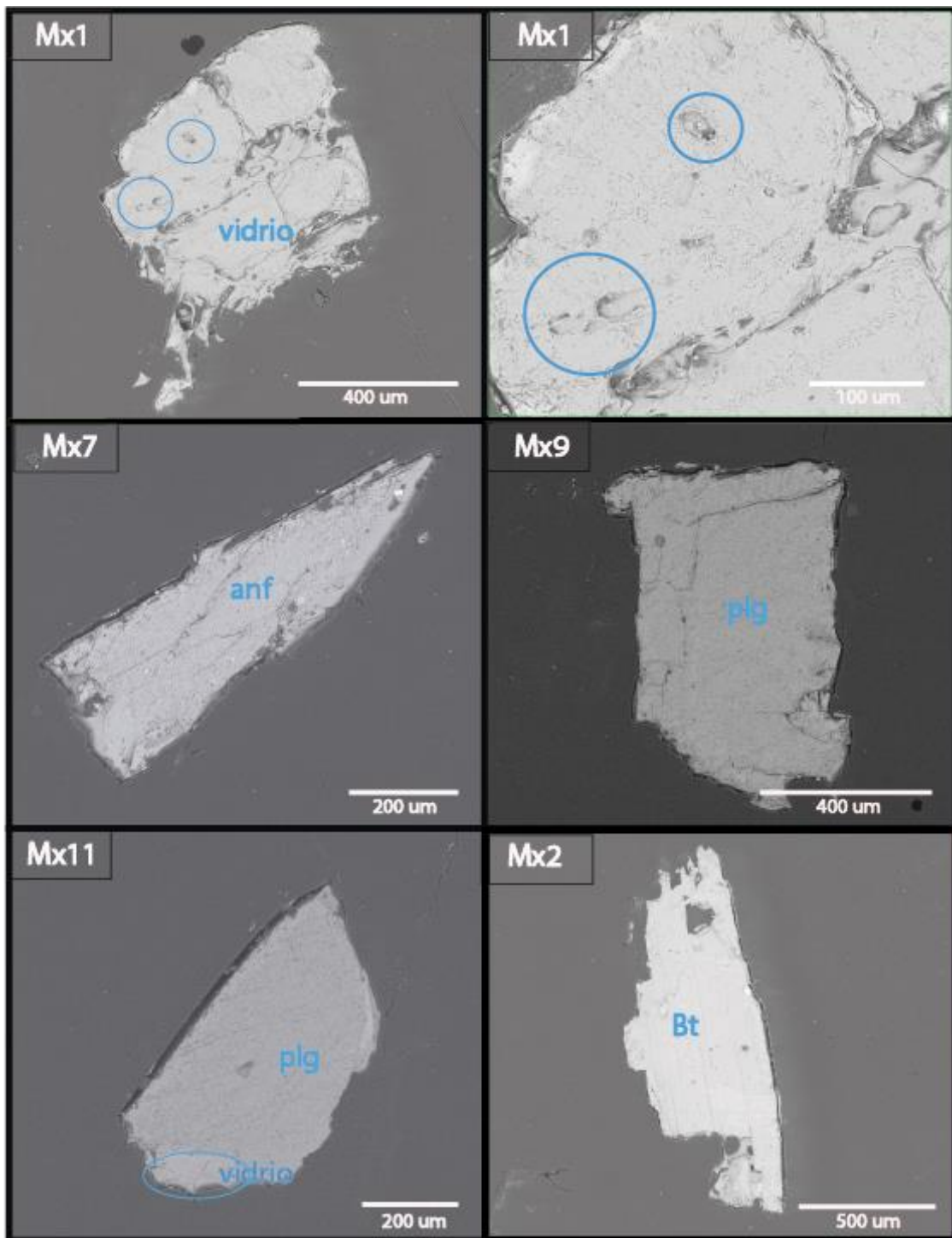


Figura 13. Imagen de electrones retrodispersados de los minerales aflorantes en montaje MA en SEM. Los círculos azules muestran inclusiones en superficie, donde Mx1 tiene una homogénea y dos con burbuja.

#### 4.1.3. MONTAJE DE CRISTALES SEPARADOS, MB

Corresponde a cristales de cuarzo, plagioclasa (Mx1, Mx3), cuarzo (Mx3, Mx6) y vidrio de los cuales afloraron siete y se analizaron tres (figura 14).

El análisis en SEM muestra que la gran mayoría presenta inclusiones, sin embargo, solo unas pocas se encuentran en superficie, salvo unas pocas. Cabe destacar que en este montaje se dieron inclusiones homogéneas completas, que tampoco afloraron.

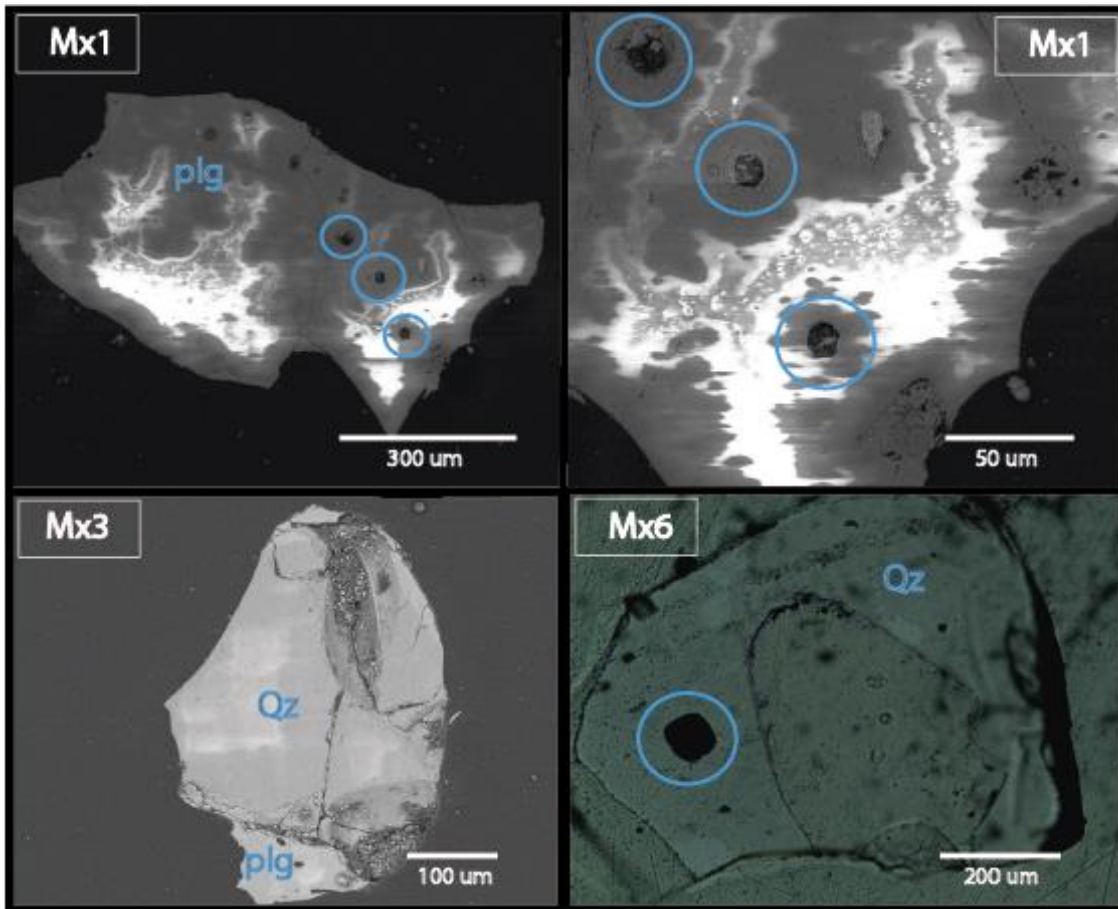


Figura 14. Fotomicrografía de los minerales aflorantes en montaje MB en SEM (Mx1, Mx3) y a luz transmitida en microscopio óptico (Mx6). Los círculos azules muestran inclusiones en superficie, donde Mx1 tiene 3 homogéneas con burbuja y Mx6, una recristalizada.



## 4.2. QUÍMICA MINERAL

### 4.2.1. PLAGIOCLASA

Los datos de la composición de los cristales de plagioclasas se obtuvieron mediante EMP (anexo C) en 3 cristales de la muestra M6 (pE, pEw, pH), obteniendo perfiles de centro a borde; 2 cristales de MA (Mx1 y Mx9) y uno de MB (Mx1), obteniendo un total de 29 mediciones.

El resultado de las mediciones se muestra en la figura 15, donde la mayoría de los puntos caen en el campo de la andesina, solo tres puntos en labradorita y un punto corresponde a sanidina (MA\_Mx1\_p1).

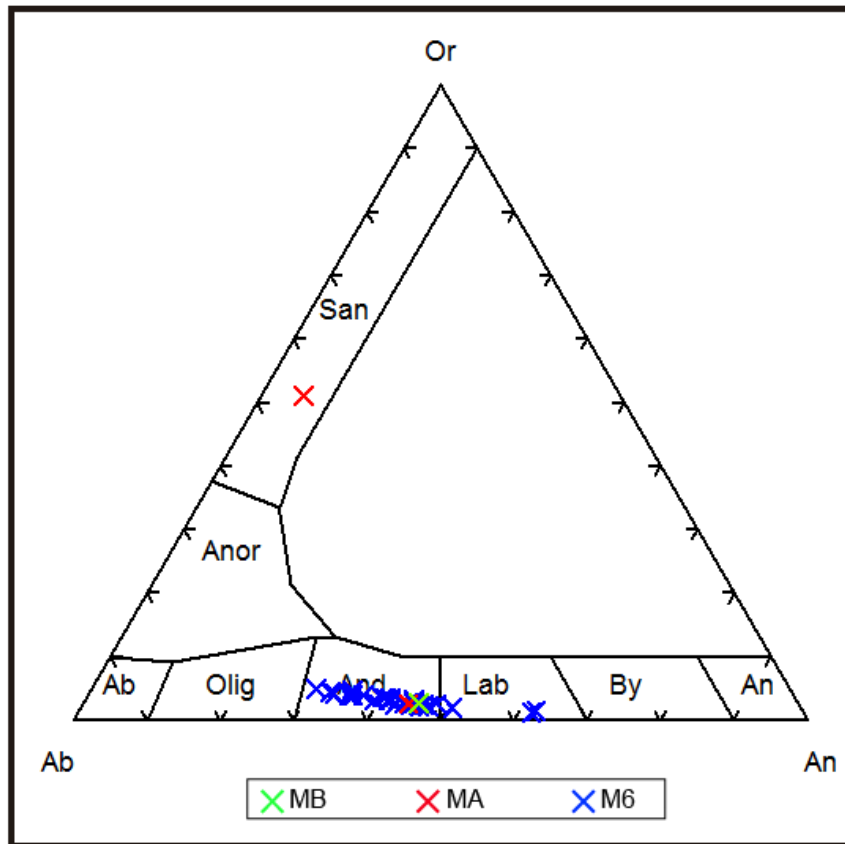


Figura 15. Diagrama ternario de clasificación de feldespatos generado por IgPet.

#### 4.2.2. ANFÍBOL

Los datos de composición de anfíbol se obtuvieron mediante EMP (anexo C) en 7 cristales de M6 (aA, aB, aC, aF, aG, aH y aJ) y 3 cristales de MA (Mx1, Mx11 y Mx15), haciendo un total de 17 puntos. Los resultados determinan que el anfíbol corresponde a magnesio-hornblenda y magnesio-ferri-hornblenda, dentro de este campo, y pargasita, según el cuadro de clasificación propuesto por Locock (2014) (figura 16).

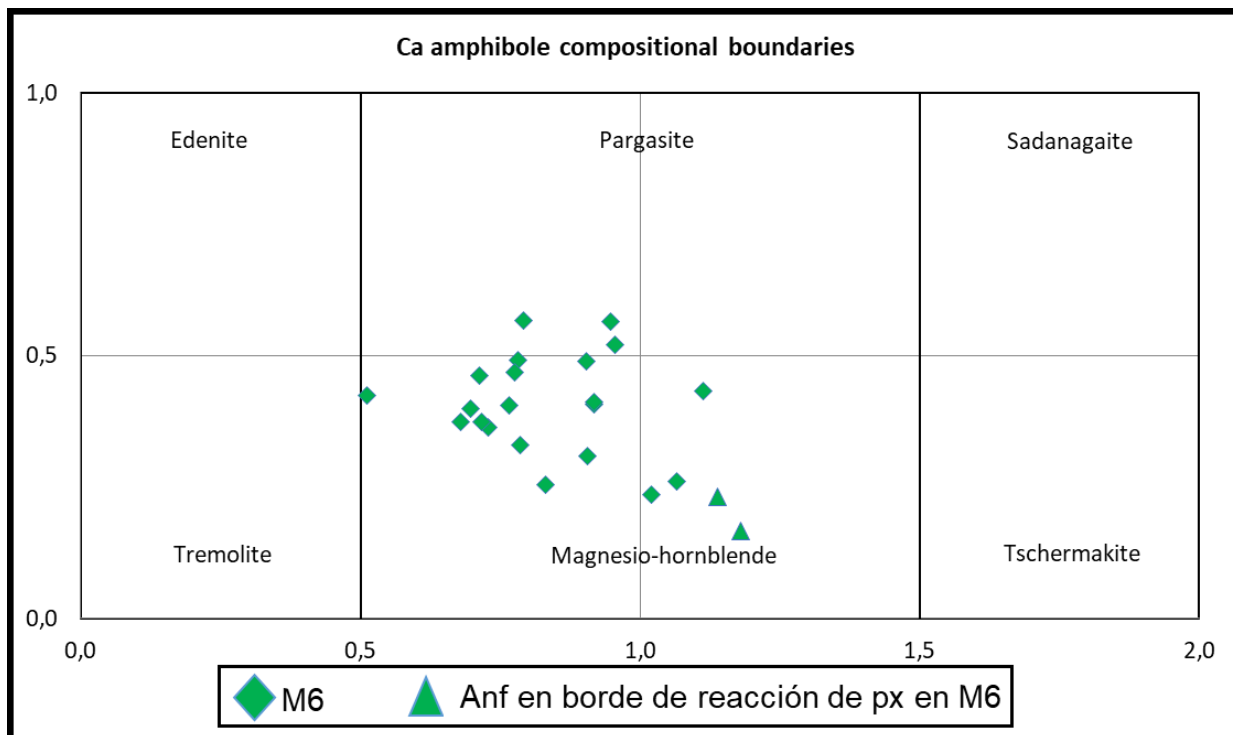


Figura 16. Diagrama de clasificación de anfíboles propuesto por Locock (2014).

#### 4.2.3. PIROXENO

Sólo se midió un cristal de piroxeno debido a su baja cantidad dentro de la roca. El cristal analizado en EMP (anexo C) pertenece a M6 y corresponde a una enstatita (figura 18) con borde de reacción de magnesio-hornblenda (Locock, 2014) (figura 17).

Bidart (2014) realizó un número mayor de mediciones en piroxenos, dando como resultado, enstatita en el mismo rango de los valores de este estudio (figura 18).

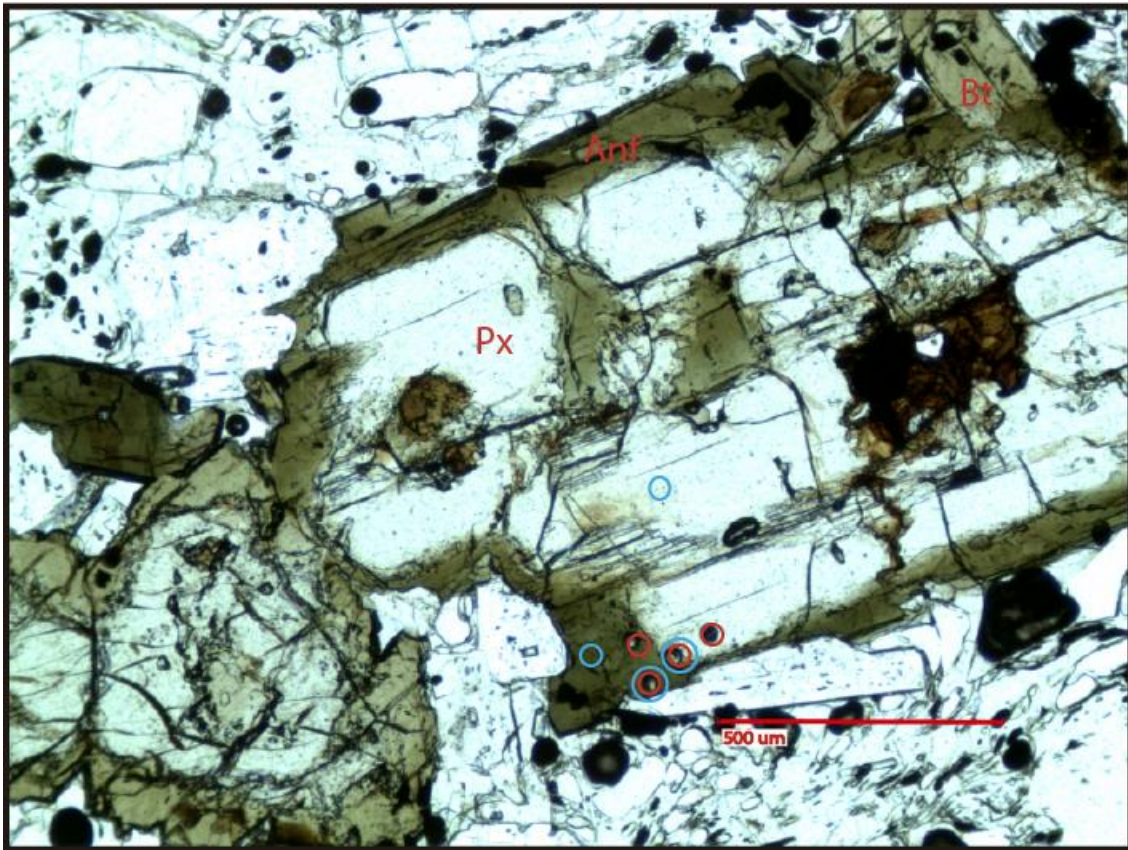


Figura 17. Fotomicrografía en microscopio óptico del piroxeno analizado en EMP y, posteriormente, LA-ICP-MS. Se observa el borde de reacción de anfíbol junto con el crecimiento de biotita en su parte superior derecha. Los puntos medidos se indican con círculos celestes para microsonda y rojos para ablación láser.

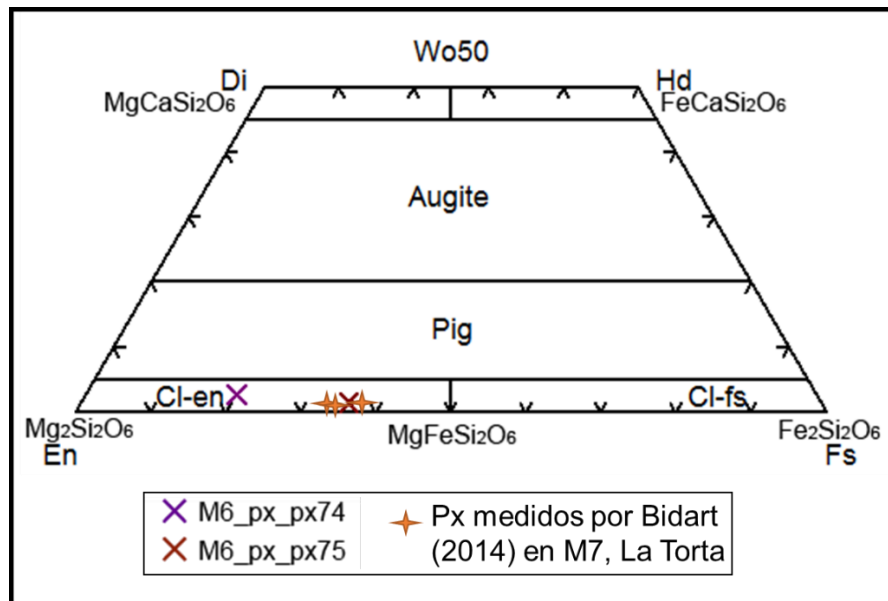


Figura 18. Diagrama de clasificación de piroxenos generado por IgPet. Los puntos medidos corresponden, en la figura anterior, al círculo celeste más aislado, hacia el centro del cristal (px74) y el círculo del mismo color, pero con otro rojo, directamente bajo el punto anterior (px75). Las estrellas naranjas corresponden a las mediciones hechas por Bidart (2014) en piroxenos de La Torta, pero en M7.

#### 4.2.4. ÓXIDOS Fe-Ti

La clasificación de óxidos Fe-Ti se determinó a través del termobarómetro de Hora et al. (2013), que si bien, no se utilizó para este fin, su cálculo clasifica los minerales como hematita-ilmenita o magnetita-ulvoespinela.

Con la hoja de cálculo, *Fe-Ti\_Oxide.xls*, dispuesta por el autor, se clasificaron los 11 minerales opacos medidos en microsonda en la muestra M6, siendo todas magnetitas, excepto una (M6\_aG\_O84) que resulta ser ilmenita.

### 4.3. GEOQUÍMICA DE INCLUSIONES VÍTREAS

El análisis en microsonda entregó datos de composición de los elementos mayores como óxidos medidos en piroxeno, vidrio de masa fundamental, plagioclasa, anfíbol e inclusiones vítreas hospedadas en estos minerales.

Desde este momento en adelante no se tienen datos de inclusiones en cuarzo, ya que, o no están en superficie o se encuentran recristalizadas, por lo que no es posible analizarlas con microsonda electrónica.

Se realizaron 109 mediciones en total. 96 fueron en M6, donde 28 corresponden a inclusiones, 29 a plagioclasas, 17 a anfíboles, 11 a óxidos, 3 a apatitos, 2 a masa fundamental vítrea, 4 a piroxenos, 1 a circón y 1 a sulfuros. 10 puntos fueron medidos en MA, de los cuales 1 corresponde a vidrio, 2 a inclusiones, 5 a anfíboles y 2 a plagioclasas. En MB, se realizaron 3 mediciones correspondientes a 2 inclusiones y 1 plagioclasa. Los datos se encuentran en el anexo C, mientras que el error asociado se encuentra en el anexo E.

#### 4.3.1. DIAGRAMA TAS

El diagrama TAS (Total Alkali Silica) es un esquema de clasificación de rocas volcánicas de acuerdo a su contenido de sílice ( $\text{SiO}_2$ ), como abscisa, y de álcalis ( $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{K}_2\text{O}$ ), como ordenada. Esto permite dividir a las rocas en 15 grupos mostrados en la figura 18.

En este estudio, se utiliza el diagrama TAS para determinar la composición del vidrio que contienen las inclusiones vítreas homogéneas u homogéneas con burbuja medidas por microsonda electrónica.

Como se observa en la figura 19, todas las inclusiones caen en el campo de las riolitas, donde las que están hospedadas en anfíbol tienden a ser más alcalinas que las hospedadas en plagioclasa. Además, éstas se encuentran dentro de la serie sub-alcalina, por lo que se pueden clasificar según su contenido de  $\text{K}_2\text{O}$ .

Para comparar la composición de las inclusiones vítreas respecto a la de la roca total del domo, se utilizó la composición de roca total de la muestra M5, de Bidart (2014), ubicada en las coordenadas 22°25'13.60"S, 67°57'20.52"W al igual que M6. Además, se incluyen análisis de roca total de De Astis et al. (2009) muestreadas en los puntos 22°25'10,4"S, 67°56'40,4"W (muestras TA07/07b, TA07/07c, TA07/07d) y 22°25'4.032"S, 67°57'58074"W (TA07/20A).

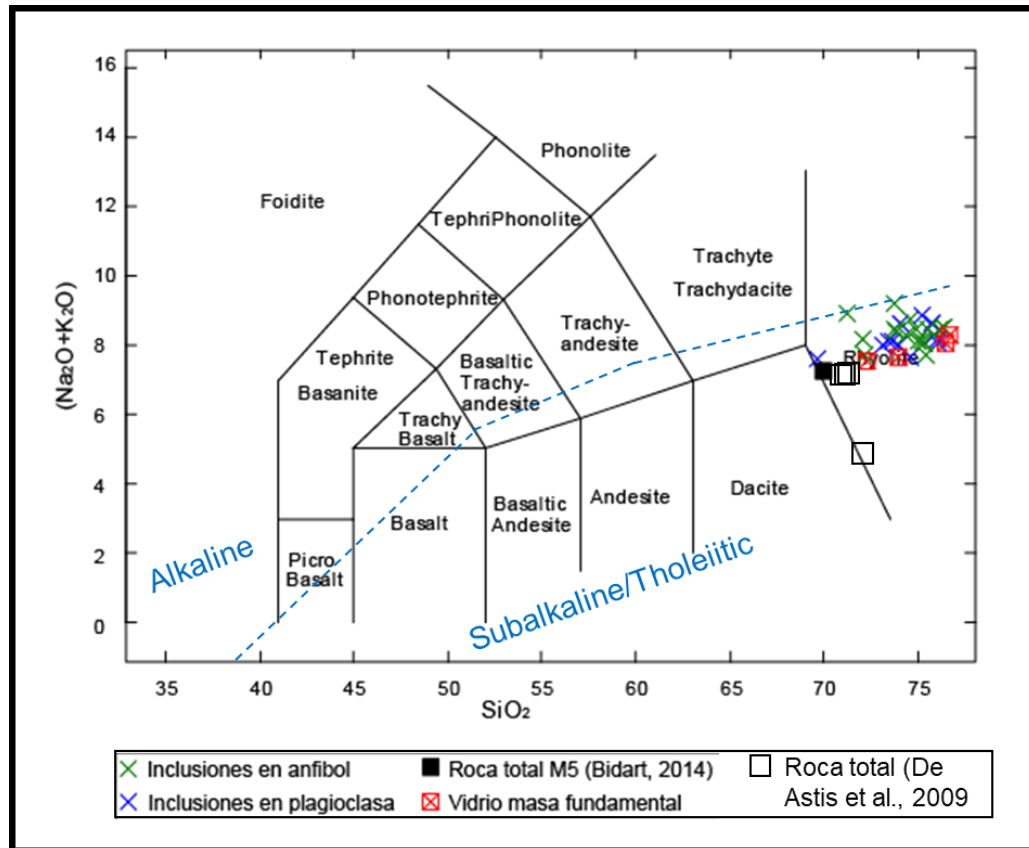


Figura 19. Diagrama de clasificación TAS, propuesto por Le Bas et al. (1986), generado en Petrograph (Petrelli, 2005), de las inclusiones vítreas de las muestras M6, MA y MB, y vidrio de masa fundamental en M6 y MA. Unidad de medida: %wt.

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

Como se dijo anteriormente, las inclusiones, al pertenecer a la serie sub-alkalina, se pueden clasificar según su contenido de K<sub>2</sub>O respecto al SiO<sub>2</sub>, según Peccerillo y Taylor (1976). Este diagrama divide a las rocas sub-alkalinas en alto, medio y bajo contenido de K, definiendo las series calco-alkalina alta en K, calco-alkalina y toleítica respectivamente.

En la figura 20 se presenta este diagrama para las inclusiones vítreas, vidrio de masa fundamental y análisis de roca total, el cual indica que todos los puntos pertenecen

a la serie calco-alcalina rica en K. Se destacan tres puntos de roca total hechos por De Astis et al (2009) que se encuentran en el límite de esta serie pasando a la calco-alcalina y que tanto las inclusiones como el vidrio tienen mayor contenido de K respecto a la roca total.

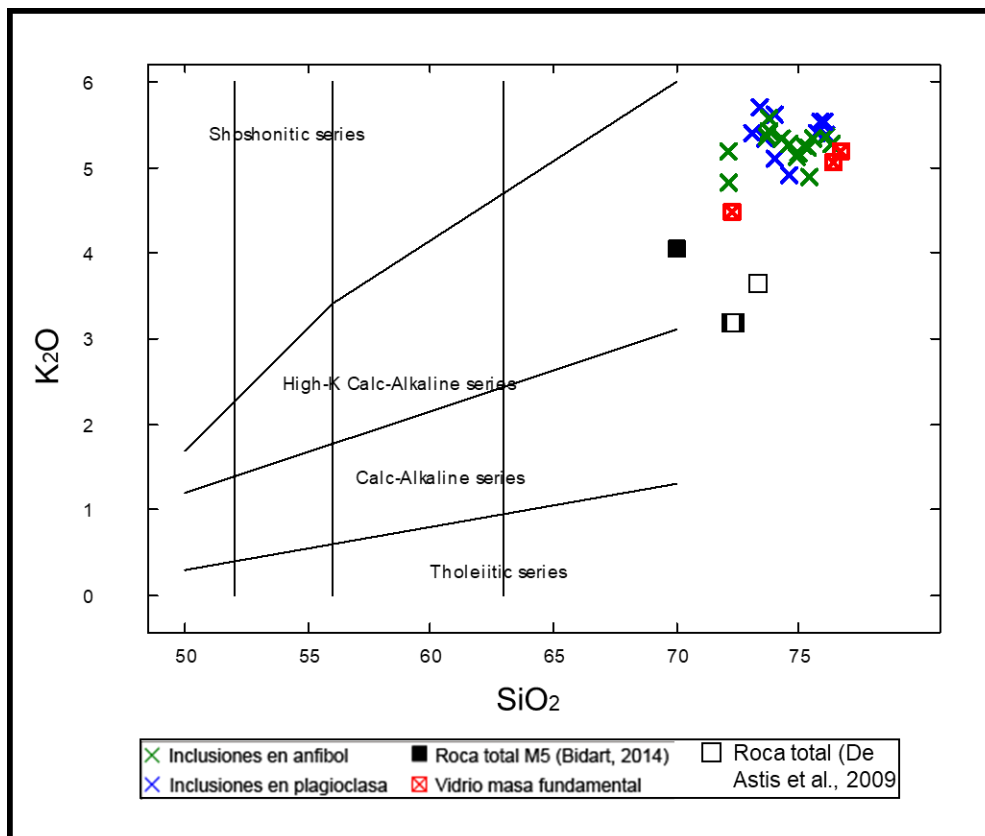


Figura 20. Diagrama K<sub>2</sub>O propuesto por Peccerillo y Taylor (1976), generado en Petrograph (Petrelli, 2005). Al igual que en la figura anterior se presentan puntos de todas las inclusiones vítreas, vidrio de masa fundamental y muestras de roca total de Bidart (2014) y De Astis et al. (2009).

#### 4.3.3. DIAGRAMAS HARKER

Este diagrama bivalente, propuesto por Harker (1909), presenta la variación de los óxidos mayoritarios (también trazas menores a 0,1%) respecto a la sílice. Esto permite observar los mecanismos de cristalización fraccionada y fusión parcial.

Los elementos mayores para las inclusiones vítreas, de acuerdo con los análisis en microsonda electrónica, son Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, Mn, Ti, (mayores), P y Cl (menores) (figuras 21, 22 y 23). Los puntos analizados corresponden a inclusiones vítreas en M6, MA y MB y vidrio de masa fundamental en M6 y MA. Cabe destacar que las inclusiones en los montajes se encuentran hospedadas en plagioclasa solamente.

En este estudio solo se presentan los diagramas para Al, Ca, Mg, Na, Fe y K debido a que muestran mejor la evolución de las inclusiones. Sin embargo, igual se presenta una breve descripción de los elementos no mostrados (Ti, Mn, P y Cl).

La composición de SiO<sub>2</sub> varía entre 72 y 77% wt, sin mostrar un orden específico que dependa de su mineral hospedante.

El diagrama de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (figura 21) presenta una tendencia cóncava dada por la línea negra, donde el contenido de este óxido disminuye en las inclusiones con menor SiO<sub>2</sub>, que resultan ser de anfíbol, y luego aumenta en todas las inclusiones. Este patrón en el diagrama de óxido de aluminio revela el fraccionamiento de plagioclasa y/o augita, por lo tanto, se observa que el fundido de las inclusiones fraccionó una cantidad menor de ambos minerales y luego, se removió la augita para fraccionar plagioclasa rica en Ca. Esto se ve evidenciado en el contenido de este elemento en las plagioclasas (Anexo C.1.1)

El diagrama Harker de MgO (figura 21) muestra una composición constante para todas las inclusiones y vidrio entre 0 y 0,13%, siendo mayor en las inclusiones hospedadas en plagioclasa y en el vidrio (desde 0,05% MgO). El vidrio presenta un contenido de MgO entre 0,04 y 0,09%.

La composición de CaO (figura 22) en las inclusiones se mantiene mayoritariamente constante entre 0,6 y 0,7% independiente de su mineral huésped. Sin embargo, el vidrio de la masa fundamental no posee calcio. La misma situación se da con la composición de FeO (figura 22), el cual se mantiene entre 0,6 y 0,7% independiente del mineral hospedante.

La composición de Na<sub>2</sub>O (figura 23) es mayor en las inclusiones vítreas hospedadas en anfíbol, mostrando valores entre 2,8 y 3,3% en la mayoría de los puntos. Por otro lado, las inclusiones en plagioclasa presentan valores de Na<sub>2</sub>O entre 2,4 y 3% y el vidrio presenta un 3% en promedio. Por otra parte, el contenido de K<sub>2</sub>O respecto al SiO<sub>2</sub> (figura 23) varía entre 4,9 y 5,6% aproximadamente, con una tendencia de las inclusiones hospedadas en plagioclasa, a tener mayor cantidad. El vidrio presenta una composición entre el 5 y 5,2%.

El TiO<sub>2</sub> se mantiene uniforme respecto al SiO<sub>2</sub>, variando de 0 a 0,2%. La composición del vidrio varía ampliamente, con valores entre 0,05 y 0,25%.

La composición del MnO no presenta resultados importantes, ya que éste se mantiene prácticamente constante en todas las inclusiones con valores entre 0,01 y 0,07%. Sin embargo, las inclusiones hospedadas en anfíbol tienden a tener un poco más de Mn que las hospedadas en plagioclasa. El vidrio se mantiene en los mismos valores con un promedio de 0,04% de MnO.

El contenido de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> muestra una variación entre 0 y 0,12%, donde la mayoría de las inclusiones están hospedadas en anfíbol. El vidrio casi prácticamente no tiene P.

La composición de Cl varía uniformemente entre 0,07 y 0,16% independiente del mineral hospedante. Respecto al vidrio, ocurre lo mismo, pero con valores entre 0,07 y 0,1%.

La muestra de roca total M5 tiene un contenido de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) del 70%, siendo siempre menor a la composición de las inclusiones y vidrio, al igual que el caso del  $\text{K}_2\text{O}$ , donde se contrapone un contenido del 4,04% M5 con un promedio de 5,2% de los puntos analizados. Por otro lado, su contenido en  $\text{MnO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{P}_2\text{O}_5$  está en el rango de las inclusiones y vidrio analizados. Sin embargo, presenta un mayor porcentaje de todos los otros óxidos de elementos medidos,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{FeO}$  y  $\text{MgO}$ , quedando aislado dentro de los gráficos (suerte de “*outlayer*”).



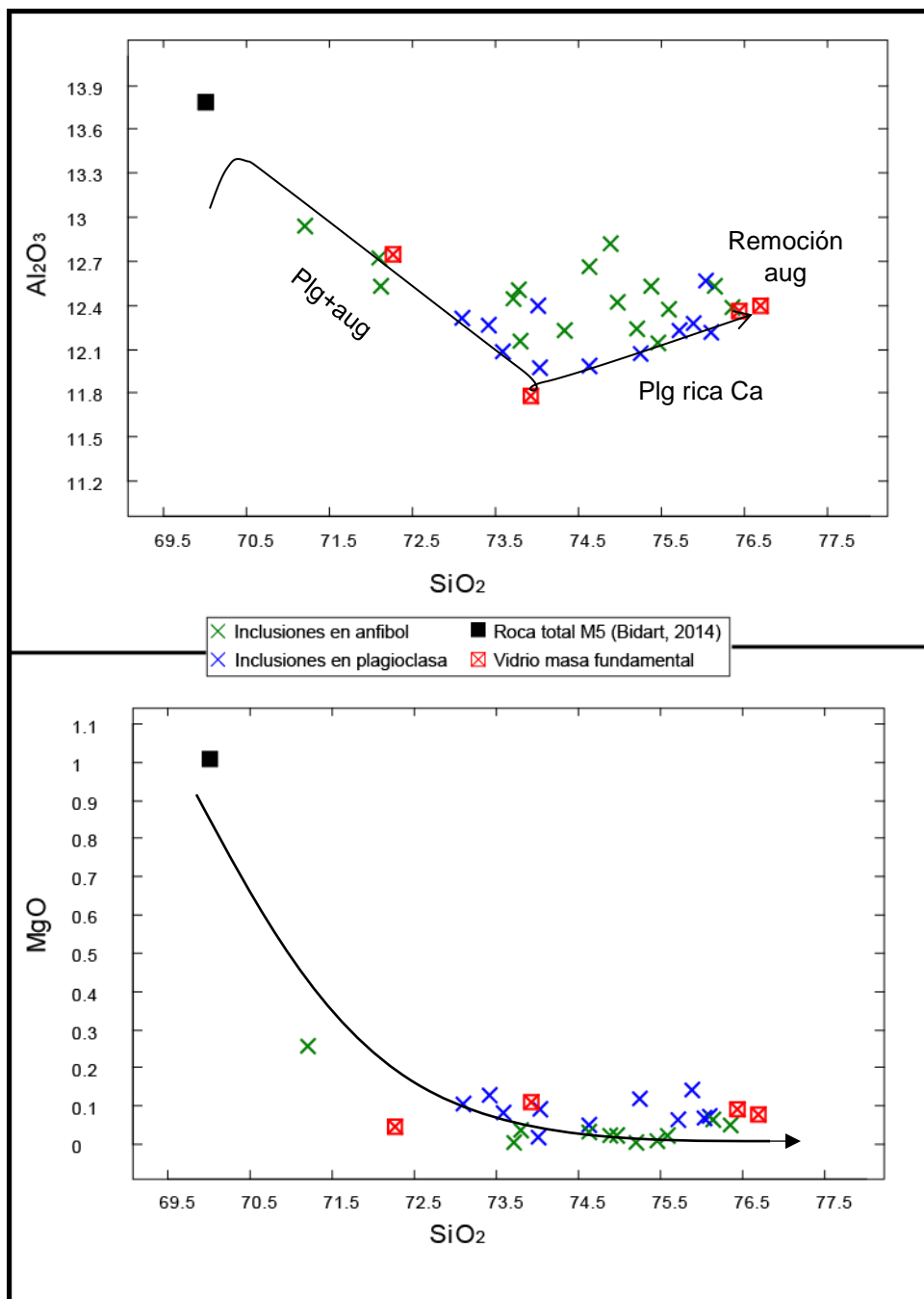


Figura 21. Diagramas de variación Harker para óxidos mayores,  $Al_2O_3$  y  $MgO$ , para las inclusiones vítreas y vidrio. Generado en Petrograph (Pretelli, 2005).

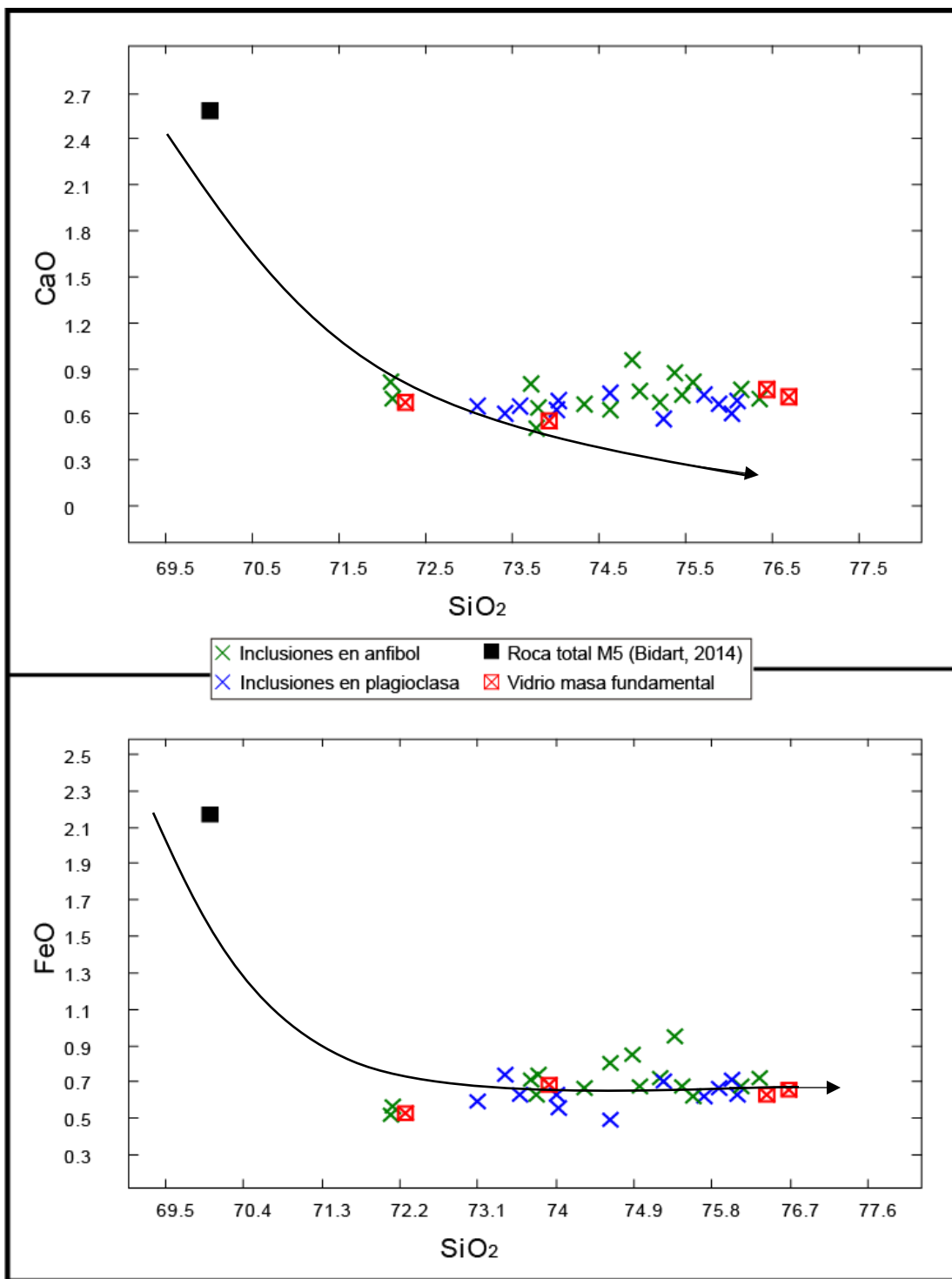


Figura 22. Diagramas de variación Harker para óxidos mayores, CaO y FeO, para las inclusiones vítreas y vidrio. Generado en Petrograph (Pretelli, 2005).

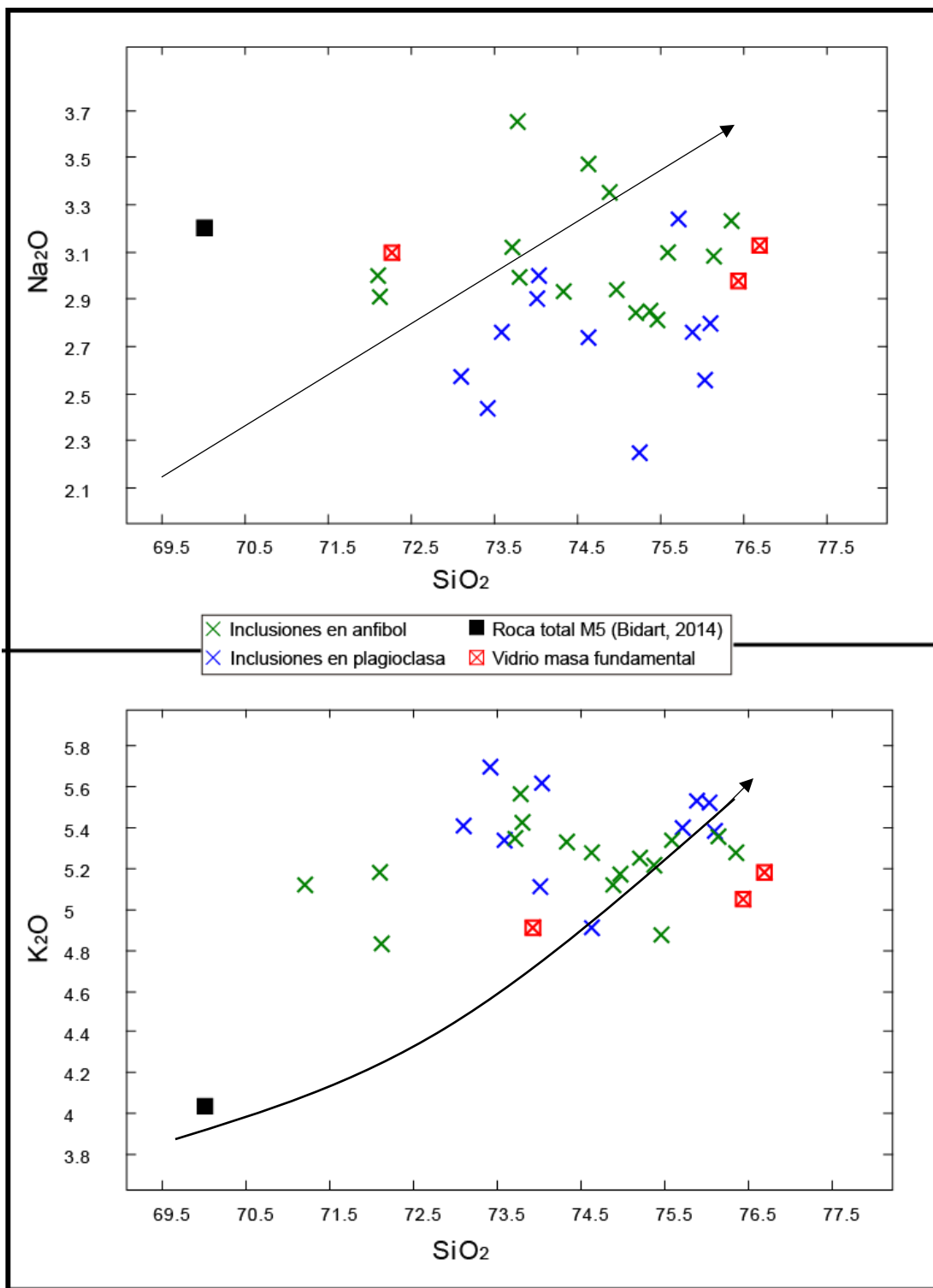


Figura 23. Diagramas de variación Harker para óxidos mayores, K<sub>2</sub>O y Na<sub>2</sub>O, para las inclusiones vítreas y vidrio. Generado en Petrograph (Pretelli, 2005).

#### 4.3.4. DIAGRAMAS BIVARIANTES DE #Mg

El diagrama de variación Fenner muestra el comportamiento de los óxidos mayores respecto a MgO o al número de magnesio (#Mg). Éste último se refiere a la razón de magnesio con los elementos ferromagnesianos (Mg y Fe) calculado de la siguiente forma (ecuación 1):

$$\#Mg = \frac{MgO}{(MgO + FeO)} * 100 \quad (1)$$

En este estudio, los elementos mayores para las inclusiones vítreas, de acuerdo con los análisis en microsonda electrónica, son Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, Mn, Ti, P y Cl. Los puntos analizados, al igual que con los diagramas Harker, son inclusiones en M6, MA (hospedadas en plagioclasa) y MB, y vidrio de masa fundamental en M6 y MA.

Al igual que con los diagramas Harker, aquí solo se muestran los diagramas para Ca, Fe, Al, K y Na debido a que se ve mejor su evolución respecto al #Mg y presentan mayor variación, aunque de todas formas se explica el comportamiento de los elementos no graficados (Si, P, Cl, Mn y Ti).

En todos los diagramas es posible diferencia dos grupos de puntos: inclusiones en plagioclasa, agrupadas a la derecha, e inclusiones en anfíbol, a la izquierda, lo que concuerda con la cantidad de elementos ferromagnesianos que presentan los minerales huésped. A mayor #Mg se tiene mayor cantidad de Mg en el mineral y menor, en las inclusiones (inclusiones en plagioclasa) y viceversa (inclusiones en anfíbol).

En el diagrama de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y CaO (figura 24) se observa una tendencia de cristalización, indicada por la flecha negra, que va de mayor a menor #Mg con pendiente negativa. El vidrio se comporta como las inclusiones en ambos gráficos.

El diagrama de FeO (figura 25) muestra una tendencia levemente constante que fluctúa entre 0,55 y 0,7% para las inclusiones vítreas en plagioclasas y entre 0,6 y 0,8% para las hospedadas en anfíbol. Para éstas últimas, se observa un leve aumento al disminuir el #Mg, sin embargo, no es importante, coincidiendo con un patrón de cristalización fraccionada. También en la figura 25, el diagrama del #Mg para K<sub>2</sub>O, muestra valor prácticamente constante para todas las inclusiones, 5,24% para inclusiones en anfíbol y 5,26%, en plagioclasa. Por otro lado, el vidrio muestra valores más bajos cercanos a 5,1%. Como se observa en los valores anteriores, de todas maneras, existe una leve tendencia de las inclusiones vítreas hospedadas en plagioclasa a tener mayor contenido de K.

El contenido de Na<sub>2</sub>O (figura 26) es menor en las inclusiones hospedadas en plagioclasa, manteniendo valores uniformes entre 2,4 y 2,8%. Por otro lado, las inclusiones en anfíbol muestran una tendencia lineal positiva de aumento del Na al aumentar el #Mg. Esto evidencia el patrón de cristalización fraccionada para este elemento.

Tanto el contenido de Cl como el de  $P_2O_5$  no presentan una tendencia específica. Los valores no fluctúan de forma importante ( $P_2O_5$  varía de 0 a 0,08% y el Cl, de 0,06 a 0,017%).

La composición de  $TiO_2$  no muestra variación, mostrando valores entre 0,025 y 0,25%, donde la mayoría de los datos se encuentra entre 0,1 y 0,17%. Lo mismo ocurre con la  $SiO_2$ ; se distribuyen uniformemente entre un 73,3 y 76,3% *wt*. Pero sí cabe notar que el vidrio presenta los mayores valores de sílice y las inclusiones hospedadas en anfíbol tienden a tener mayor contenido que las hospedadas en plagioclasa.

El diagrama de MnO no presenta variaciones importantes, con valores entre 0,1 y cercanos a 0 la gran mayoría de los puntos, al igual que el vidrio.

Respecto a M5, su #Mg es bastante más alto que el de las inclusiones y vidrio, con un valor de 31,76, alejándose hacia la derecha en los diagramas. Presenta valores más altos que el promedio de puntos analizados en cuanto a Al, Ca, P, Fe y Ti, y valores más bajos, en K y Si. Respecto al Mn y Na, se mantiene dentro del rango de composición, donde, en el diagrama de  $Na_2O$ , se asemeja al de las inclusiones en anfíbol.

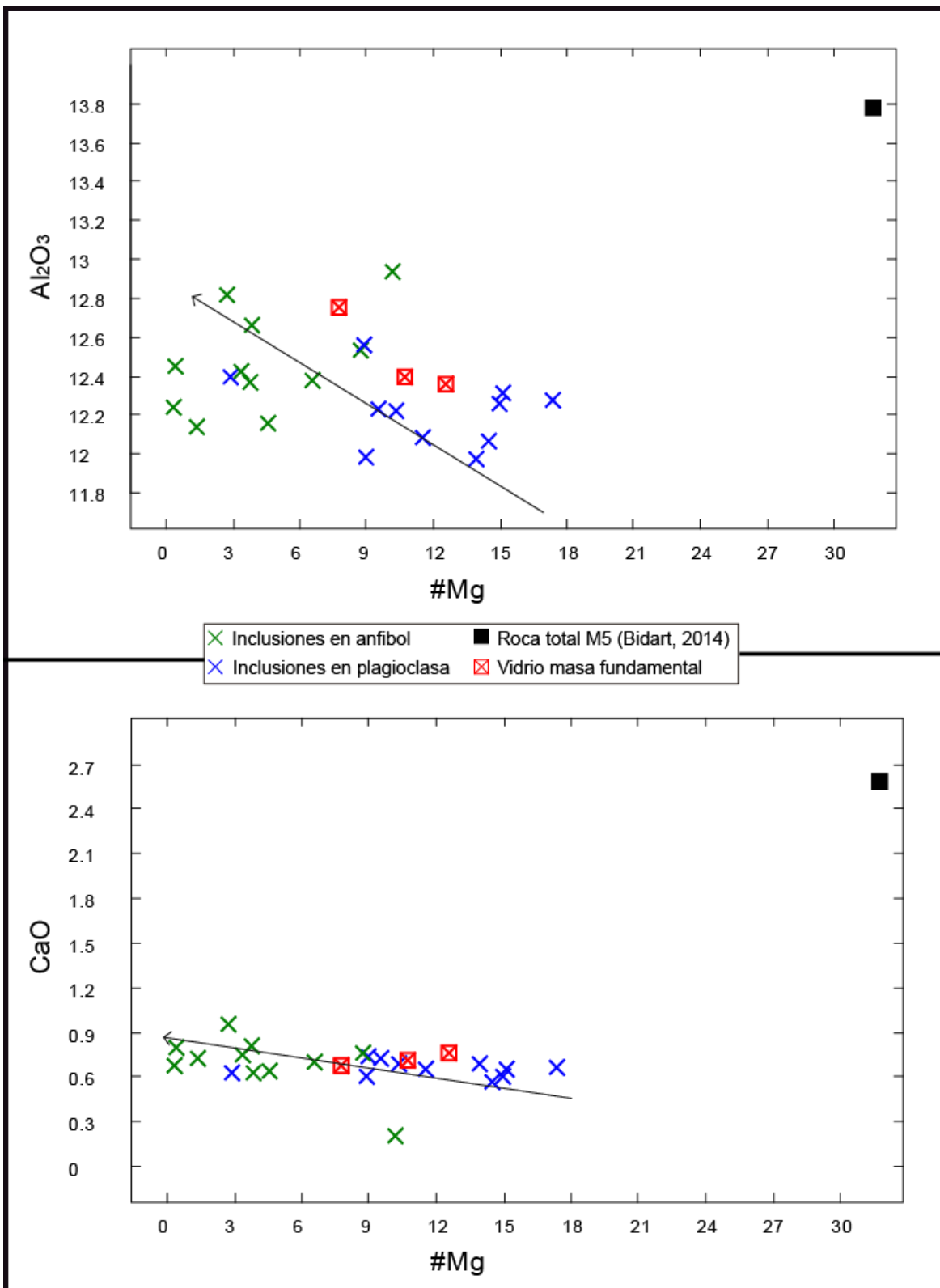


Figura 24. Diagramas de variación de #Mg para  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y CaO en inclusiones vítreas y vidrio de masa fundamental. Las flechas indican la tendencia de cristalización fraccionada de las inclusiones vítreas. Las plagioclasas al fraccionar más fácilmente el Ca y Al que el anfíbol, sus inclusiones tienden a presentar menor cantidad de estos elementos que las que están en anfíbol. Generado en Petrograph (Pretelli, 2005).

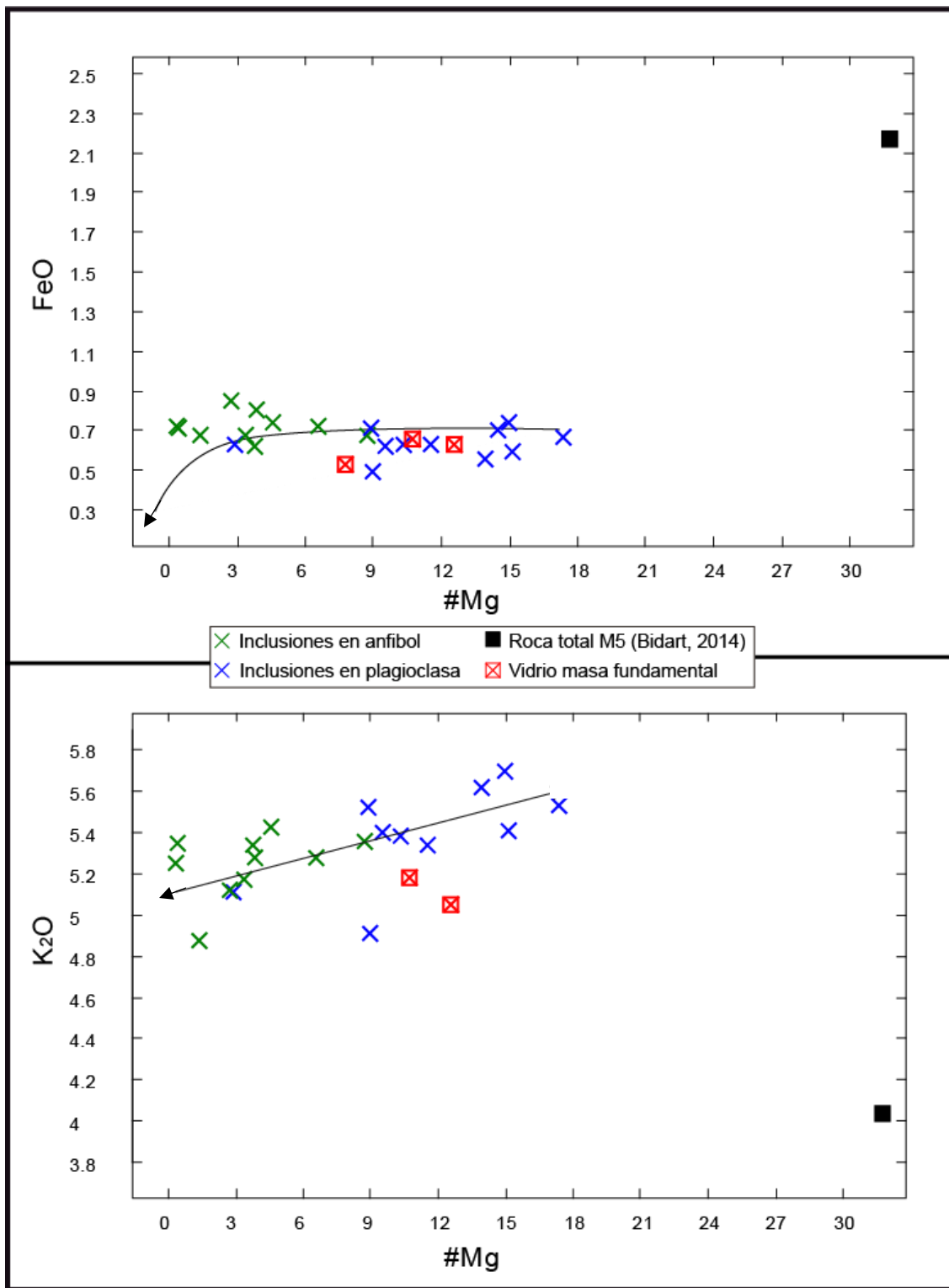


Figura 25. Diagramas de variación de #Mg para FeO y K<sub>2</sub>O en inclusiones vítreas vidrio de masa fundamental. La línea de tendencia constante en el diagrama de FeO evidencia la poca variación de este elemento en todas las inclusiones, independiente de su mineral hospedante, aunque siempre el contenido es mayor en las hospedadas en anfíbol. En el diagrama para el K, la flecha indica, también, una leve tendencia de las inclusiones en plagioclasa a tener mayor contenido de este elemento debido a su mayor facilidad para fraccionarlo. Ambos coinciden con el patrón de cristalización fraccionada. Generado en Petrograph (Pretelli, 2005).

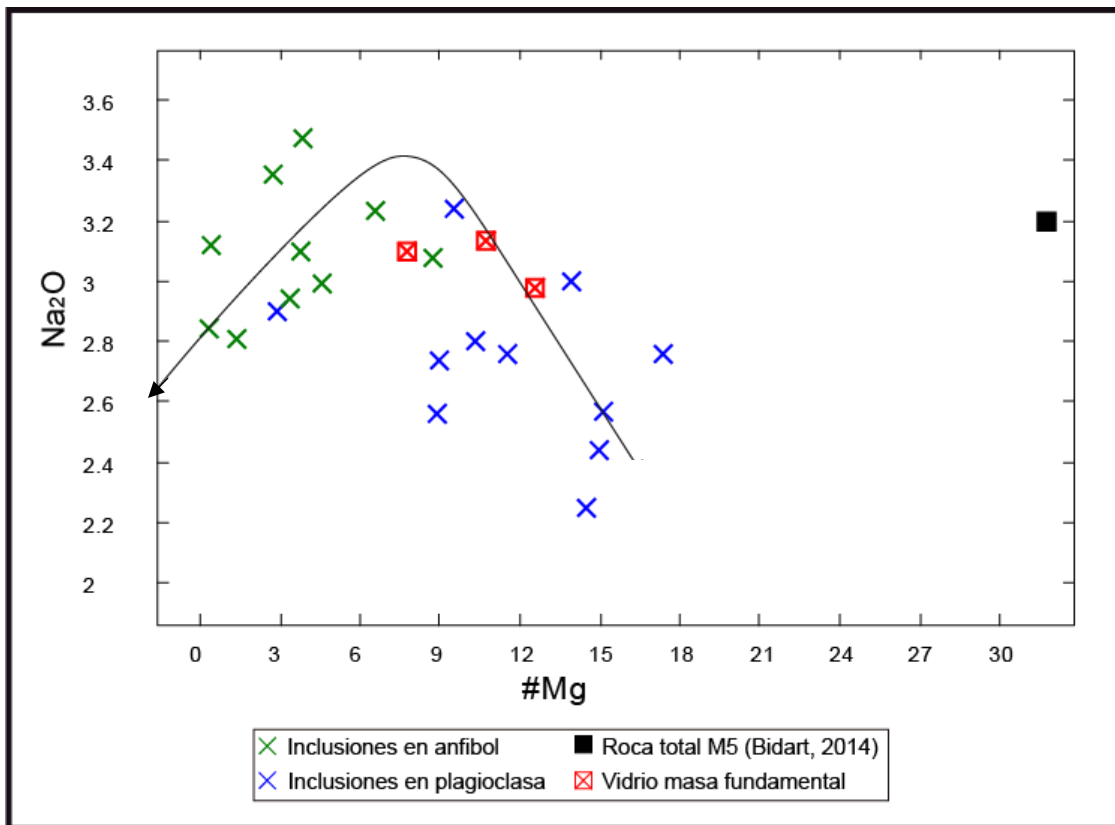


Figura 26. Diagramas de variación de #Mg para Na<sub>2</sub>O en inclusiones vítreas vidrio. La flecha muestra cómo ocurre un aumento en el contenido de Ca en las inclusiones en anfíbol y luego decrece hacia las hospedadas en plagioclasa. Esto se debe a que el anfíbol fracciona menos Ca que la plagioclasa. Generado en Petrograph (Pretelli, 2005).

#### 4.3.5. DIAGRAMAS DE TIERRAS RARAS (SPIDER)

Un elemento traza se define por estar en concentraciones menores a 0,1% *wt* dentro de una roca. La mayor parte del tiempo, sustituyen a los elementos mayores de los minerales que forman la roca, por lo que su importancia radica en poder discriminar mejor los procesos petrológicos que puede sufrir el sistema.

Su estudio se lleva a cabo a través de diagramas de tierras raras o multi-elementos, los cuales incluyen a las primeras, normalizados a un determinado condrito, manto primitivo, MORB, corteza continental o, incluso, a la composición de roca total de la muestra en estudio.

En este caso se realizaron diagramas de tierras raras, normalizadas a la composición del vidrio de masa fundamental y a corteza continental superior, de (Taylor y McLennan (1985), para las inclusiones vítreas hospedadas en plagioclasa y magnesio-hornblenda y normalizadas a MORB, de Pearce (1983), para los minerales hospedantes



En la figura 27, se presenta el diagrama de tierras raras normalizado a la masa fundamental de la muestra M6. Las inclusiones en centros de plagioclasa están levemente enriquecidas que las ubicadas en los bordes y que, en general, el patrón mantiene una pendiente relativamente constante en torno al valor 1, indicando que la composición de las inclusiones respecto al vidrio es similar.

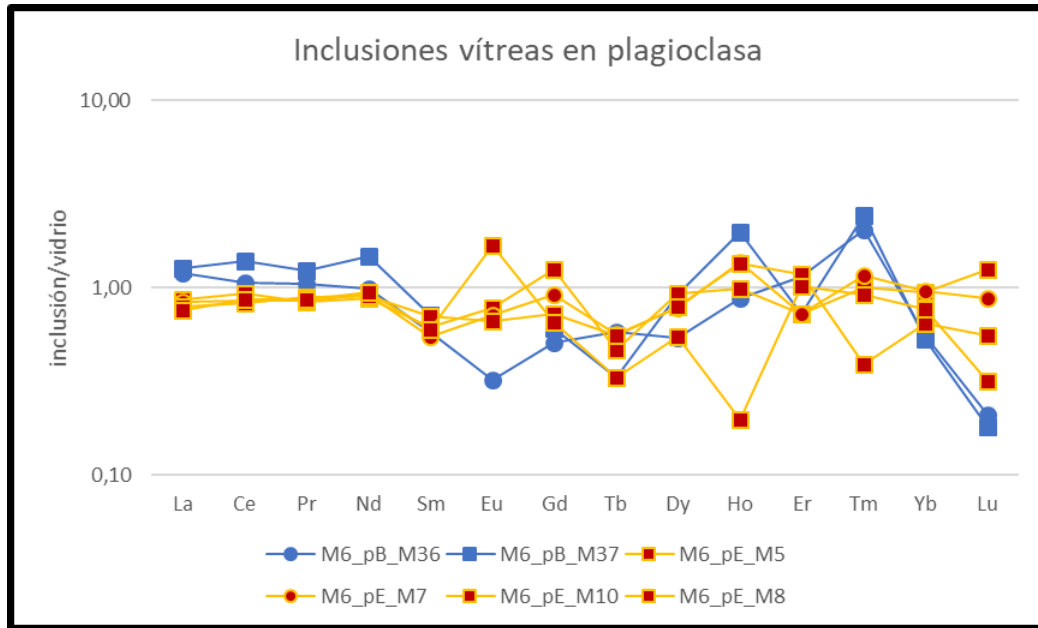


Figura 27. Diagrama spider de tierras raras normalizado a la composición promedio del vidrio de masa fundamental de las inclusiones hospedadas en plagioclasa. Los puntos con cuadrados corresponden a inclusiones hospedadas en el centro del cristal, y los con círculo, en el borde.

Las inclusiones hospedadas en magnesio-hornblenda (Mg-Hbl) (figura 28) presentan un patrón de tierras raras de pendiente positiva respecto al vidrio, con la esperada anomalía negativa de Eu y un pequeño empobrecimiento de Yb y Lu respecto a los demás elementos. Además, se observa un enriquecimiento en tierras raras pesadas dado por el mineral hospedante, es decir, el anfíbol fracciona más fácilmente estos elementos, por lo que es esperable que sus inclusiones también lo hagan en comparación a las hospedadas en plagioclasa.

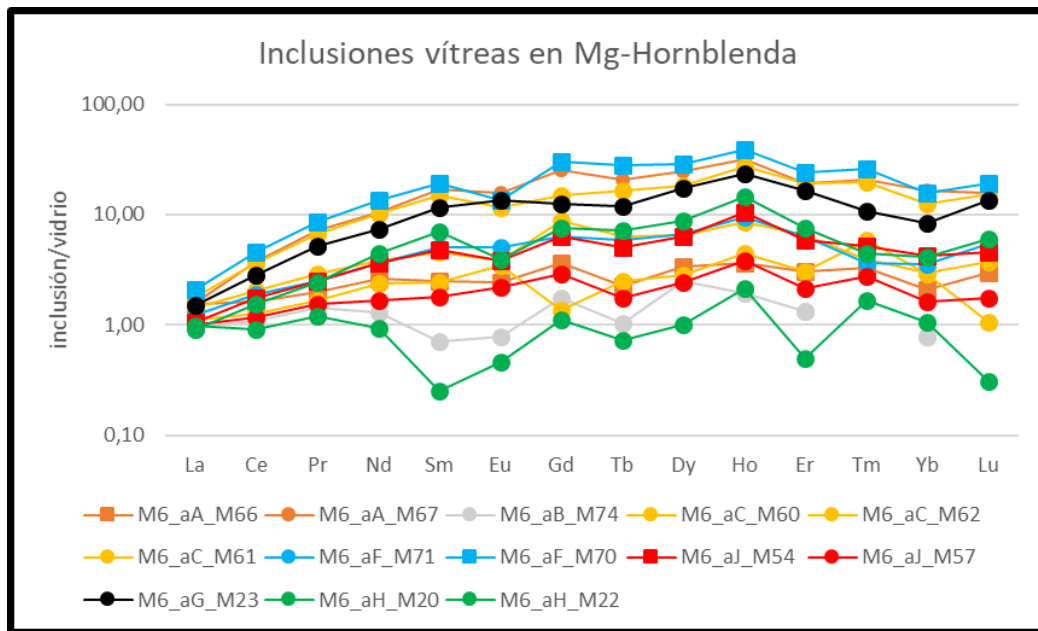


Figura 28. Diagrama spider de tierras raras normalizado a la composición promedio del vidrio de masa fundamental de las inclusiones hospedadas en plagioclasa. Los puntos con cuadrados corresponden a inclusiones hospedadas en el centro del cristal, y los con círculo, en el borde.

En la figura 29, se expone el diagrama spider de tierras raras para todas las inclusiones vítreas y vidrio de masa fundamental, normalizado al MORB de Pearce (1983). Claramente se un enriquecimiento de tierras raras livianas (LREE) y un empobrecimiento de las pesadas (HREE), así como el “peak” positivo del Rb y el negativo de Ti característico de la composición de la corteza continental superior (Rollinson 1993).

Se destaca también, que el vidrio de masa fundamental se comporta muy similar a las inclusiones hospedadas en plagioclasa, indicando el mismo nivel de diferenciación.

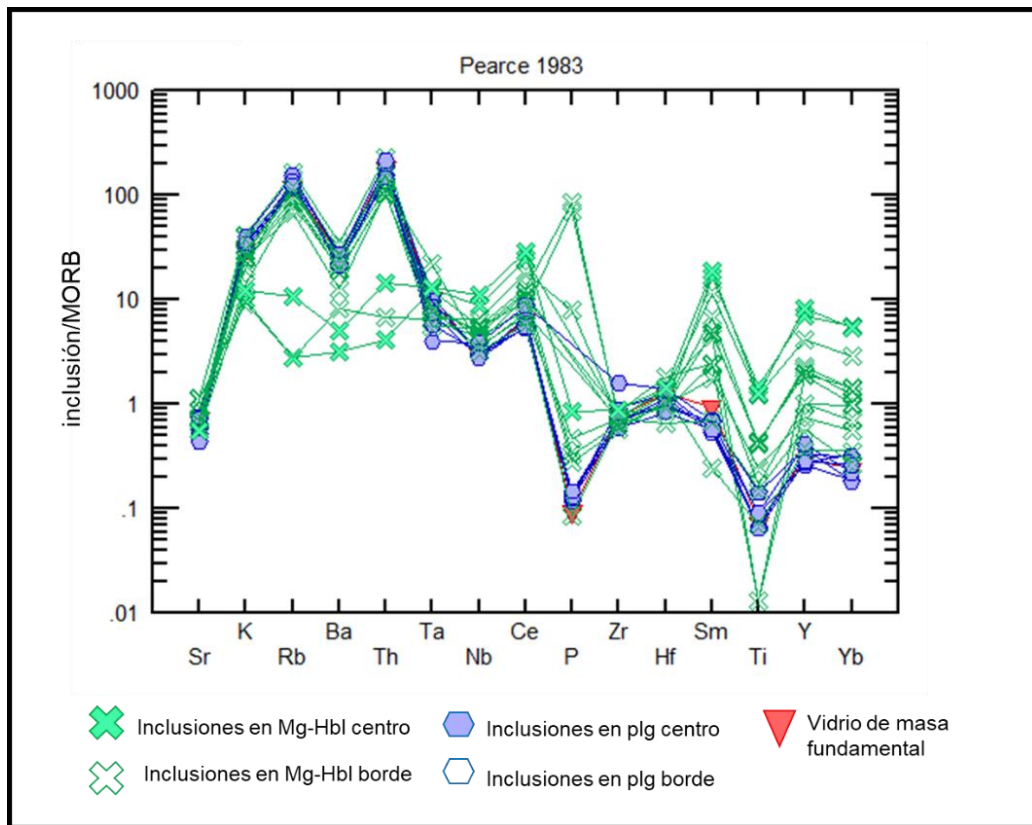


Figura 29. Diagrama spider de tierras raras normalizado a la composición del MORB de Pearce (1983) de las inclusiones hospedadas en anfíbol (cruces verdes) y en plagioclasas (hexágonos azules), además de vidrio de masa fundamental (triángulo invertido rojo). Las cruces y hexágonos rellenos indican la ubicación de la inclusión en el centro del cristal y, las figuras vacías, en el borde.

En la figura 30 se presenta el diagrama de tierras raras de inclusiones hospedadas en plagioclasas y vidrio de masa fundamental, normalizados a la corteza continental superior de Taylor y McLennan (1985). Aquí se observa, nuevamente, que el vidrio se comporta de forma similar a las inclusiones, denotando un nivel levemente mayor de diferenciación. Además, se ve un empobrecimiento general de todas las tierras raras, pero sin superar el orden de magnitud, por lo que las composiciones son similares a la corteza superior, pero siempre menores. Esto indica que no hay mayores procesos corticales que influyan en la formación de las inclusiones.

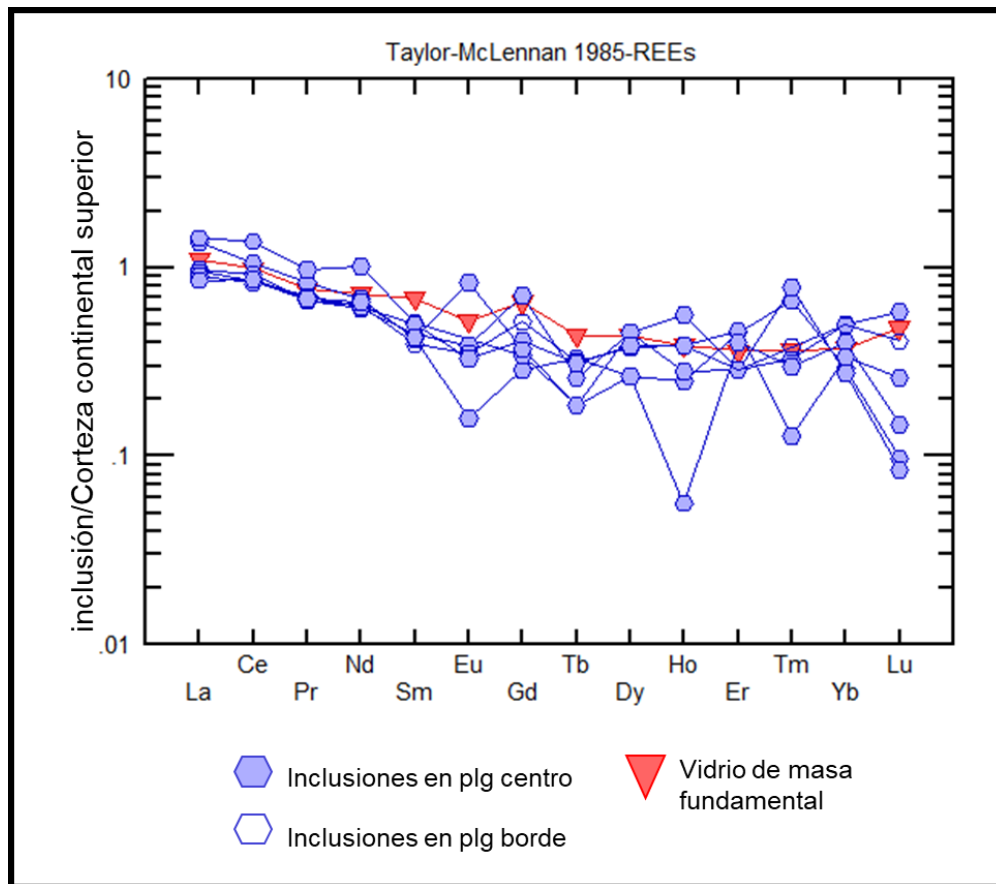


Figura 30. Diagrama spider de tierras raras normalizado a la composición de la corteza continental superior, de Taylor y McLennan (1985), de las inclusiones hospedadas plagioclasas (hexágonos azules), además del vidrio de masa fundamental (triángulo invertido rojo). Los hexágonos rellenos indican la ubicación de la inclusión en el centro del cristal y, los hexágonos vacíos, en el borde.

Igual que en la figura anterior, se presenta el diagrama de tierras raras para inclusiones hospedadas en anfíbol y vidrio de masa fundamental, normalizados a la composición de la corteza continental superior (figura 31) según Taylor y McLennan (1985). Se observa que las inclusiones ubicadas en el centro de los cristales están claramente más enriquecidas que las de los bordes. Específicamente, las inclusiones aA\_M67 y aF\_M70 son los dos puntos ubicados en los centros de sus respectivos cristales y sus inclusiones vecinas ubicadas en los bordes, están más empobrecidas.

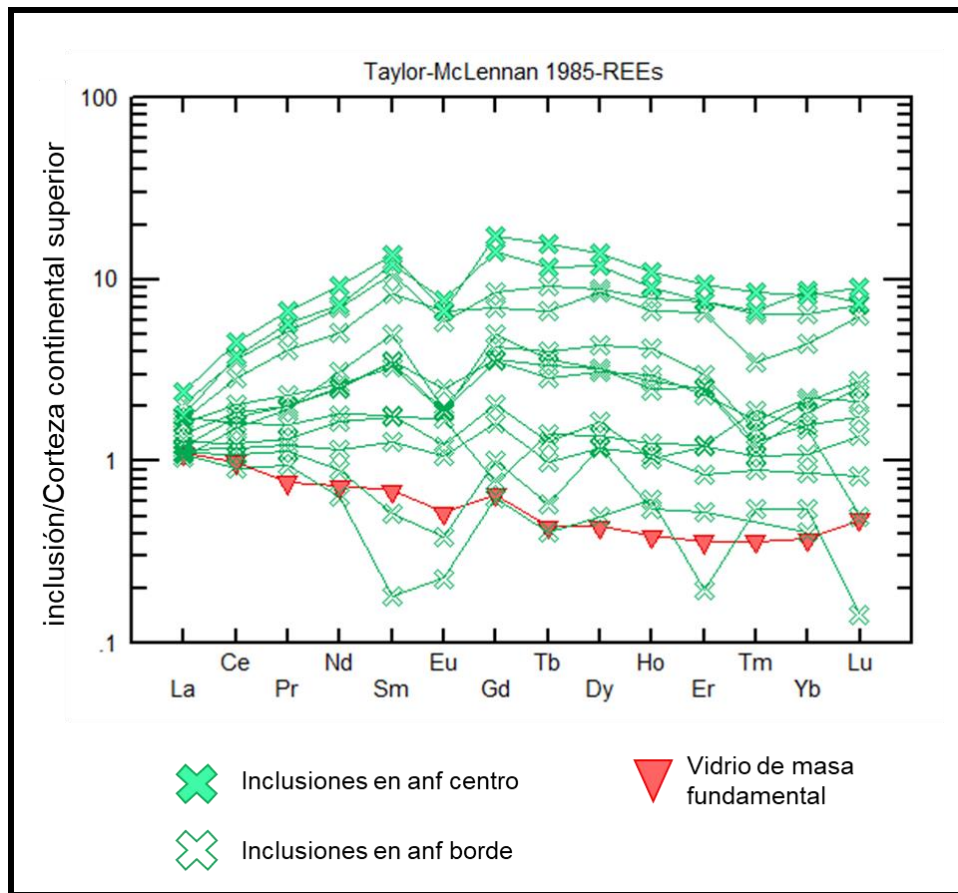


Figura 31. Diagrama spider de tierras raras normalizado a la composición de la corteza continental superior, de Taylor y McLennan (1985), de las inclusiones hospedadas Mh-Hbl (cruces verdes), además del vidrio de masa fundamental (triángulo invertido rojo). Las cruces rellenas indican la ubicación de la inclusión en el centro del cristal y, las cruces vacías, en el borde.

Si se superponen ambos diagramas de inclusiones anteriores (figura 32), se observa que un grupo de las hospedadas en Mg-Hbl, específicamente, las ubicadas en los bordes, tienen un comportamiento muy similar a las inclusiones en plagioclasa y, en consecuencia, al del vidrio de masa fundamental.

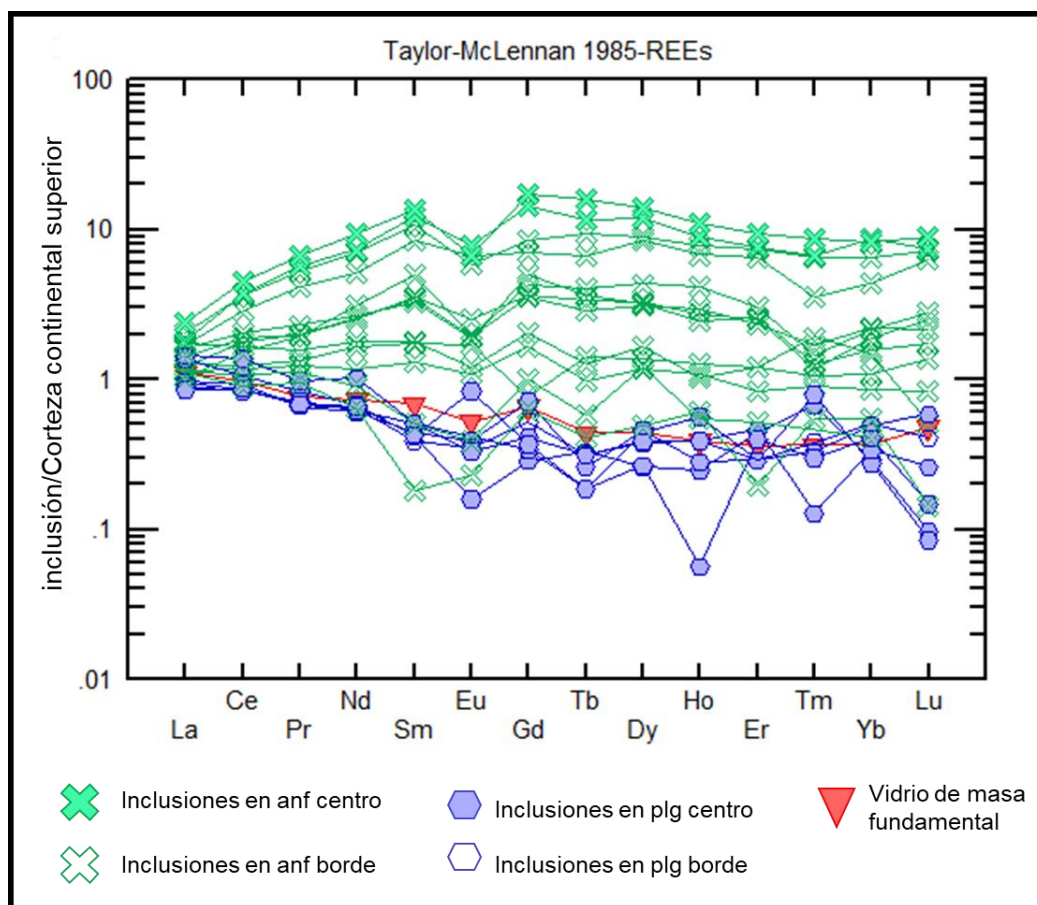


Figura 32. Diagrama spider de tierras raras normalizado a la composición de la corteza continental superior, de Taylor y McLennan (1985), de las inclusiones hospedadas en anfíbol (cruces verdes) y en plagioclasas (hexágonos azules), además de vidrio de masa fundamental (triángulo invertido rojo). Las cruces y hexágonos rellenos indican la ubicación de la inclusión en el centro del cristal y, las figuras vacías, en el borde.

En las figuras 33 y 34 se presentan los diagramas spider de tierras raras, normalizados a corteza continental superior según Taylor y McLennan (1985), para cristales de plagioclasa, enstatita y Mg-Hbl, además del vidrio de masa fundamental.

En el diagrama de plagioclasas (figura 33), se observa que éstas están empobrecidas en tierras raras livianas y casi no presentan datos de tierras raras pesadas, aunque los pocos puntos que hay indican que éstas están aún más empobrecidas, dándole al patrón una pendiente general negativa. Además, se ve una clara y esperable anomalía positiva de Eu debido al fácil fraccionamiento de éste en la plagioclasa como reemplazo del Ca.

En el caso de la magnesio-hornblenda (figura 34) se observa un enriquecimiento de hasta un orden de magnitud de todas las tierras raras, con la esperada anomalía negativa Eu. Este patrón es típico de estos minerales en magmas riolíticos (Rollinson, 1993).

En la misma figura xx2 se observa el patrón de tierras raras del cristal de enstatita analizado y se observa una similitud con el comportamiento de las magnesio-hornblenda mostrando un claro enriquecimiento de un orden de magnitud respecto a la composición de la corteza superior.

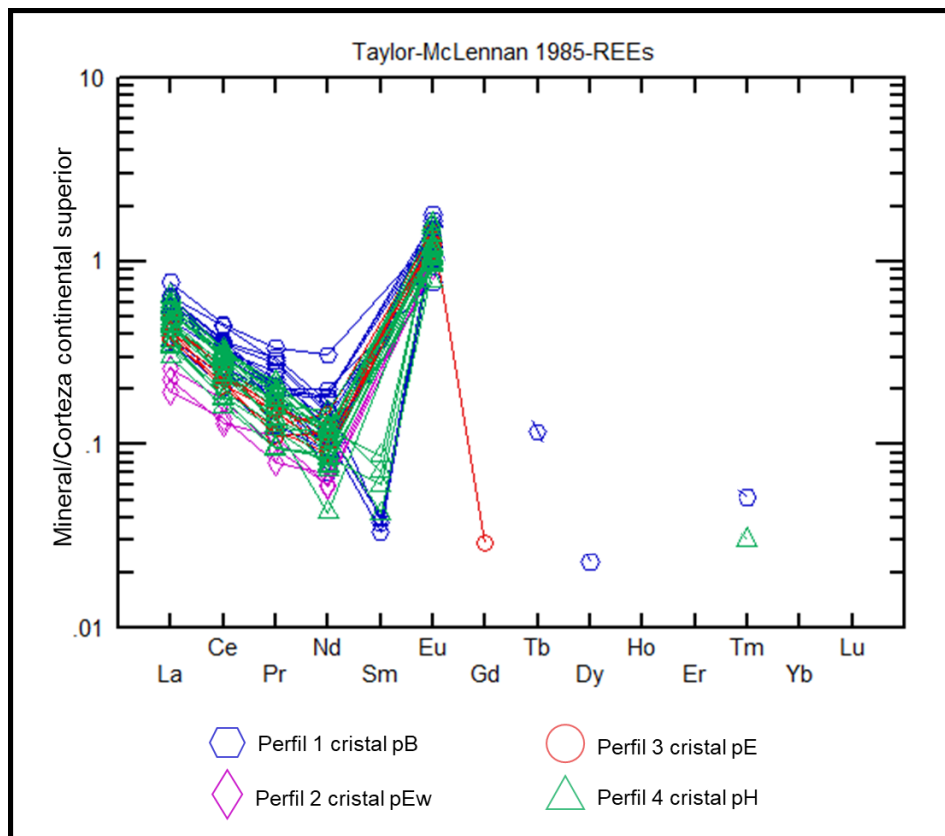


Figura 33. Diagrama spider de tierras raras normalizado a la composición de la corteza continental superior, de Taylor y McLennan (1985) para los cristales de plagioclasa. Cada figura indica un perfil disponible en el Anexo C, perteneciente a un determinado cristal (pB, pE, pEw y pH).

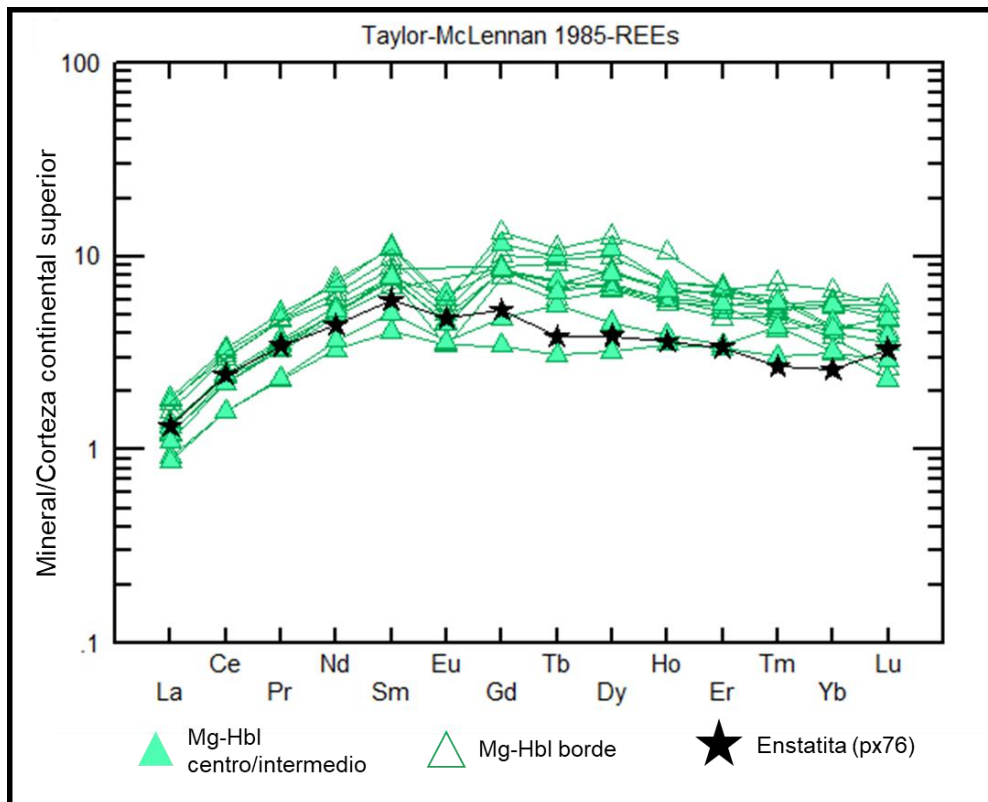


Figura 34. Diagrama spider de tierras raras normalizado a la composición de la corteza continental superior, de Taylor y McLennan (1985) para los cristales de magnesio-hornblenda (triángulos verdes) y enstatita (estrella negra). Los triángulos vacíos indican una posición de borde en el cristal de anfíbol, y el triángulo relleno, de centro.



## CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN

### 5.1. TRATAMIENTO DE DATOS

El vidrio volcánico suele tener un porcentaje de  $Al_2O_3$  mayor a 10% para definirse como tal, por lo que las inclusiones vítreas con contenido menor han sido descartadas. En este caso, M6\_pEw\_M4, M6\_pH\_M49 y MB\_Mx1\_M1 han sido removidas de los gráficos por no cumplir esta condición.

En los diagramas Harker y de #Mg se eliminaron “outlayers” distintos para cada gráfico (tabla 5). Se observa que algunos puntos se repiten, por lo que no se descarta que hayan sido mal medidos o el haz de la microsonda electrónica cubrió mineral huésped, creando una mezcla de composiciones.

*Tabla 5. Inclusiones eliminadas en cada diagrama bivariante, en inclusiones vítreas y vidrio por ser “outlayer”.*

Óxido	Harker ( $SiO_2$ )	#Mg
$Al_2O_3$	M6_pEw_M4 M6_pH_M49 MB_Mx1_M1	MA_Mx1_M3 MA_Mx1_v2
FeO	M6_aG_M23 MA_Mx1_v2	MA_Mx1_M3 MA_Mx1_v2 M6_aG_M23
MgO / $SiO_2$	MA_Mx1_v2	MA_Mx1_M3 MA_Mx1_v2 M6_aG_M23 MA_Mx11_v4
$TiO_2$	M6_aG_M23	MA_Mx1_M3
CaO	M6_aG_M23 MA_Mx1_v2	MA_Mx1_M3 MA_Mx1_v2 M6_aG_M23
$K_2O$	MA_Mx1_v2 MB_Mx1_M2 MA_Mx11_v4	MA_Mx1_M3 MA_Mx1_v2 MA_Mx11_v4 MB_Mx1_M2
$Na_2O$	M6_aG_M23 MA_Mx1_v2	MA_Mx1_M3 MA_Mx1_v2 M6_aG_M23
$P_2O_5$	MA_Mx1_v2	MA_Mx1_M3 MA_Mx1_v2
MnO	M6_aG_M23 MA_Mx1_v2	MA_Mx1_M3 MA_Mx1_v2

Los diagramas spider permiten confirmar algunos de los puntos eliminados en los diagramas bivariantes, como es el caso de M6\_aG\_M23, la cual, como su código indica, es una inclusión vítrea hospedada en anfíbol (aG), pero su signatura geoquímica coincide con la de los minerales de anfíbol. Esto evidencia que el haz del láser abarcó la inclusión y parte del mineral huésped, haciendo inválido el dato. Lo mismo ocurre con los puntos M6\_aF\_M70, M6\_aC\_M62 y M6\_aH\_M67, con la diferencia de que los diagramas bivariantes no lo detectaron, lo que pudo haber sido por una menor influencia del mineral huésped.

Los puntos M6\_aC\_M60 y M6\_aC\_M61 se eliminan, también, del diagrama multi-elementos debido a que en P presentan una anomalía de dos órdenes de magnitud, cuando el patrón general está empobrecido en éste, y en Ti, su anomalía es negativa, cuando todos los puntos indican que es positiva. La explicación de este fenómeno se puede deber a que el haz del espectrómetro abarcó algún mineral pequeño de apatito, ya que los puntos fuera del patrón coinciden con este mineral.

El punto MA\_Mx2\_anf10 se eliminó de todos los diagramas spider debido a que se determinó que el cristal corresponde a biotita y no a anfíbol.

El punto MA\_Mx1\_p1, registrado como plagioclasa, muestra una signatura isotópica muy similar a la del vidrio de masa fundamental, lo que se complementa con su eliminación en la mayoría de los diagramas bivariantes de minerales. Estas evidencias definen a este punto como un cristal de vidrio.

Los puntos correspondientes a plagioclasas, M6\_pE\_C12.0 y M6\_pH\_C43.0, muestran una signatura isotópica mucho más baja que los demás puntos en plagioclasas y más similar a vidrio, por lo que fueron eliminados. Sin embargo, sus homólogos, M6\_pE\_C12 y M6\_pH\_C43, presentan el patrón general. La explicación de esto radica en que los puntos en EMP son menos que los que se hicieron con LA, por lo que, para hacer el estándar interno en perfiles de plagioclasas, se asignó un punto de la microsonda a más de uno en el espectrómetro. De esta forma resultan mejores resultados que otros, según la similitud de composiciones de los puntos cercanos.

## **5.2. GEOTERMOBAROMETRÍA**

### **5.2.1. ANFÍBOL**

Ridolfi et al. (2010) obtiene formulaciones termobarométricas pre-eruptivas de anfíboles en magmas calco-alcalinos en sistemas de subducción y dispone de una hoja de cálculo, ejecutable en Excel, *AMP-TB.xls*, para trabajar. Posteriormente, Ridolfi y Renzulli (2012) presentan un termobarómetro para anfíbol cálcico y rico en Mg ( $\#Mg > 0,5$ ) en magmas calco-alcalinos y alcalinos.

A partir de los datos de microsonda electrónica en todos los puntos de anfíboles se obtuvieron los siguientes resultados (tabla 6):

Tabla 6. Resultados termobarómetro Ridolfi et al. (2010). En azul se indican los valores menores y en rojo, los mayores. "invalid" indica que el dato es inválido y Prof, profundidad en la corteza continental.

Punto	T (°C)	$\sigma_{est}$	P (Mpa)	Max error	%wt H <sub>2</sub> O <sub>melt</sub>	$\sigma_{est}$	logfO <sub>2</sub>	$\sigma_{est}$	$\Delta$ NNO	Prof (Km)
M6_aH_C18	832	22	150	16	4,9	0,4	-12,2	0,4	1,0	5,7
M6_aH_C19	791	22	95	10	4,7	0,4	-12,5	0,4	1,5	3,6
M6_aG_C24	783	22	96	11	4,9	0,4	-12,6	0,4	1,6	3,6
M6_aG_C25	794	22	101	11	4,9	0,4	-12,5	0,4	1,5	3,8
M6_aJ_C50	834	22	148	16	5,7	0,4	-12,3	0,4	0,8	5,6
M6_aJ_C51	818	22	111	12	4,8	0,4	-12,3	0,4	1,2	4,2
M6_aJ_C52	871	22	196	22	5,7	0,4	-11,8	0,4	0,6	7,4
M6_aJ_C53	794	22	97	11	4,4	0,4	-12,5	0,4	1,5	3,7
M6_aC_C58	851	22	163	18	4,7	0,4	-12,0	0,4	0,9	6,2
M6_aC_C59	818	22	123	14	4,9	0,4	-12,2	0,4	1,2	4,6
M6_aC_C63	873	22	194	21	4,7	0,4	-11,6	0,4	0,7	7,3
M6_aA_C64	835	22	149	16	5,3	0,4	-12,4	0,4	0,7	5,6
M6_aA_C65	792	22	94	10	4,5	0,4	-12,6	0,4	1,4	3,5
M6_aF_C68	852	22	167	18	4,9	0,4	-12,1	0,4	0,6	6,3
M6_aF_C69	803	22	106	12	4,8	0,4	-12,5	0,4	1,3	4,0
M6_aB_C72	836	22	140	15	4,7	0,4	-12,0	0,4	1,1	5,3
M6_aB_C73	803	22	100	11	4,7	0,4	-12,4	0,4	1,4	3,8
M6_px_px76	813	22	120	13	5,2	0,4	-12,0	0,4	1,6	4,5
M6_px_anf76	809	22	114	13	4,8	0,4	-12,1	0,4	1,5	4,3
MA_Mx11_anf5	invalid		invalid	invalid	invalid		invalid		invalid	invalid
MA_Mx11_anf6	invalid		invalid	invalid	invalid		invalid		invalid	invalid
MA_Mx11_anf7	invalid		invalid	invalid	invalid		invalid		invalid	invalid
PROMEDIO	821		130		4,9		-12,3		1,2	4,6
DATO MAYOR	873		194		5,7		-11,8		1,6	7,4
DATO MENOR	791		94		4,4		-12,6		0,6	3,6

Los puntos MA\_Mx11\_anf5, MA\_Mx11\_anf6 y MA\_Mx11\_anf7, se calificaron como "inválidos" debido a que la suma de los elementos mayores da menos de 98% wt, el cual es el límite mínimo definido para que la muestra sea un anfíbol siendo agua el contenido restante.

Los siguientes gráficos (figuras 35, 36 y 37), disponibles por el autor (Ridolfi et al., 2010), también, muestran los errores máximos asociados a la desviación estándar de los análisis, donde los puntos de la tabla 6, se grafican como rombos verdes.

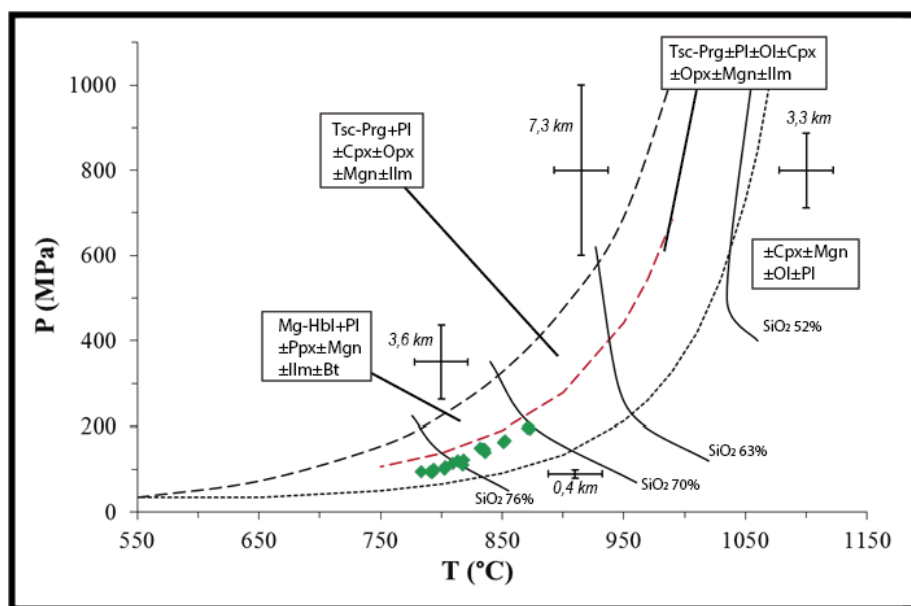


Figura 35. Gráfico P.T. Las barras de error indican la desviación estándar esperada ( $\sigma_{est}$ ) de 22°C para la temperatura y la variación de la precisión para la presión. El error máximo relativo para P varía entre 11%, en la curva de máxima estabilidad termal (línea punteada negra), y 25%, en el límite superior de anfíboles consistentes (línea segmentada negra). Se muestra, también, el error máximo de profundidad utilizando un peso específico de 2,7 gr/cm<sup>3</sup>. Las isopletas indican el contenido de sílice anhidro (%wt) del fundido que, a su vez, definen campos de estabilidad de fases como biotita (Bt), plagioclasas (Pl), ortopiroxeno (Opx), clinopiroxeno (Cpx), magnetita (Mgn), ilmenita (Ilm) y olivino (Ol) con los anfíboles consistentes (magnesio-hornblenda (Mg-Hbl) y pargasita tshermakítica (Tsc-Prg)). La curva segmentada roja divide productos experimentales consistentes con diferentes cristalinidades.

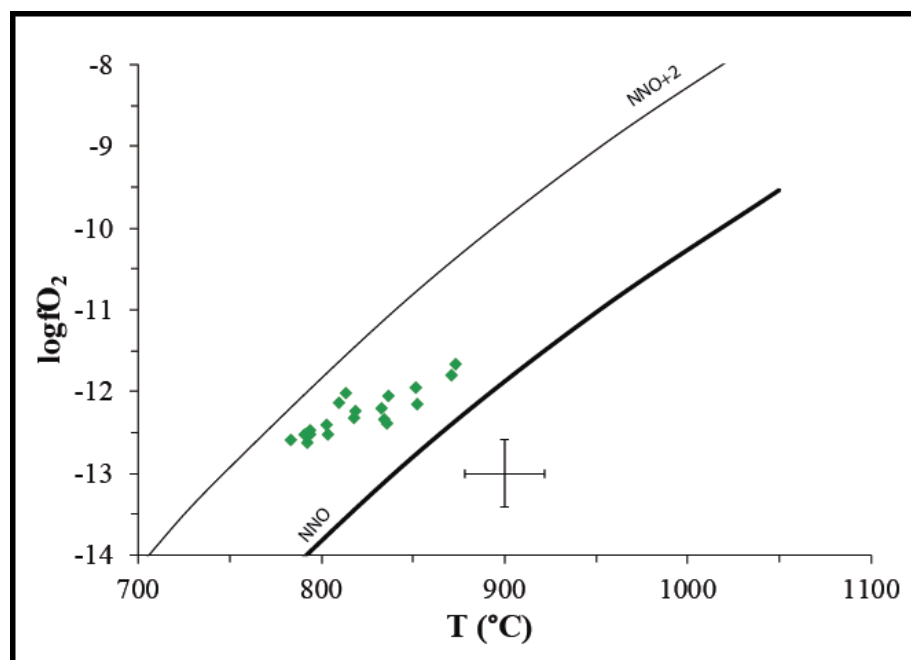


Figura 36. Gráfico  $\log f_{O_2}$ -T. Las barras de error indican el máximo error de la fugacidad de oxígeno, de 0,4 unidades de logaritmo, y la desviación estándar esperada ( $\sigma_{est}$ ) de 22°C para la temperatura. Las curvas de NNO y NNO+2 son las propuestas por O'Neill y Pownceby (1993).

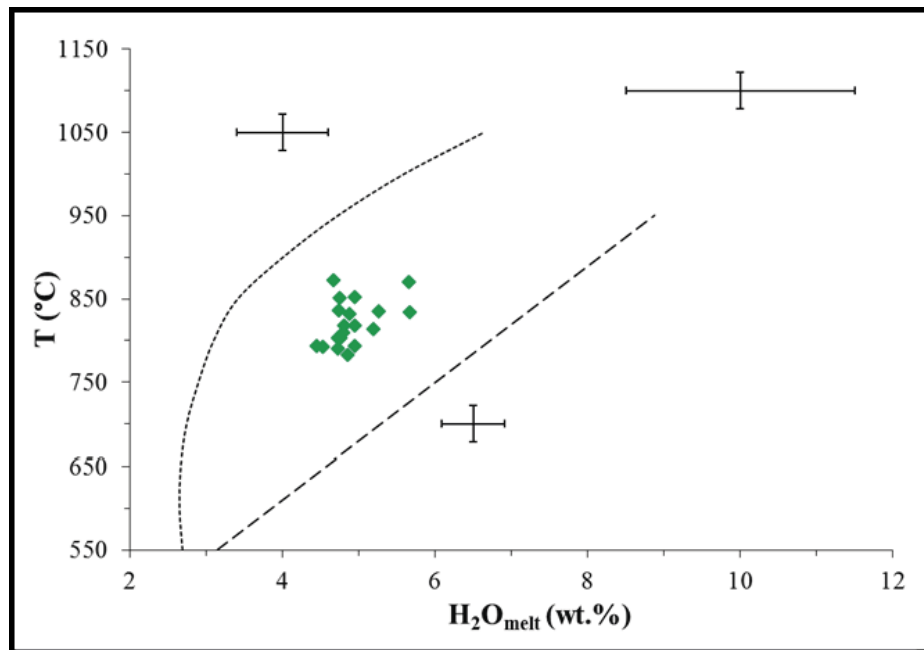


Figura 37. Gráfico  $T$ - $H_2O_{melt}$ . La curva punteada indica el límite máximo de estabilidad termal y la segmentada, el límite inferior de la fase anfíbol. Las barras de error corresponden al máximo error relativo para la temperatura (15%), y a la desviación estándar del contenido de agua en el fundido (0,4 wt%).

Los resultados de Ridolfi y Renzulli (2012) se presentan a continuación (tabla 7), con una incertidumbre de  $\pm 23,5^{\circ}\text{C}$  para la temperatura, y  $\pm 11,5\%$  para la presión.

Tabla 7. Resultados termobarómetro Ridolfi y Renzulli (2012). En azul se indican los valores menores y en rojo, los mayores. "invalid" indica que el dato es inválido.

Punto	P (MPa)	T ( $^{\circ}\text{C}$ )
M6_aH_C18	161	810
M6_aH_C19	104	752
M6_aG_C24	113	765
M6_aG_C25	115	785
M6_aJ_C50	158	828
M6_aJ_C51	118	785
M6_aJ_C52	203	863
M6_aJ_C53	112	781
M6_aC_C58	164	815
M6_aC_C59	132	803
M6_aC_C63	190	820
M6_aA_C64	145	776
M6_aA_C65	104	767
M6_aF_C68	177	832
M6_aF_C69	115	773
M6_aB_C72	146	793
M6_aB_C73	105	754
M6_px_px76	138	809
M6_px_anf76	136	813
MA_Mx11_anf5	invalid	invalid
MA_Mx11_anf6	invalid	invalid
MA_Mx11_anf7	invalid	invalid
MA_Mx15_anf8	invalid	invalid
<b>PROMEDIO</b>	<b>796</b>	<b>139</b>
<b>DATO MAYOR</b>	<b>863</b>	<b>203</b>
<b>DATO MENOR</b>	<b>752</b>	<b>104</b>

## 5.2.2. INCLUSIÓN VÍTREA/VIDRIO-PLAGIOCLASA

Este geotermómetro está propuesto por Putirka (2008 y referencias incluidas) y, partiendo de una presión experimental, de 130 MPa, correspondiente al promedio

obtenido de la tabla 6. y el cumplimiento de la condición de equilibrio pedida, se pueden obtener los siguientes resultados en la tabla 8:

*Tabla 8. Resultados geotermómetro Putirka (2008). En azul se indican los valores menores y en rojo, los mayores. La primera columna de temperatura (ecuación 23 en Putirka (2008)), posee un error de  $\pm 43^{\circ}\text{C}$  y la tercera columna (ecuación 24a en Putirka (2008)), correspondiente a una regresión global, mejora el error a  $\pm 36^{\circ}\text{C}$ . La segunda columna, corresponde a la temperatura de cristalización de plagioclasa cuando el magma se satura en esta fase.*

<b>Plagioclasa</b>	<b>Inclusión</b>	<b>Ec23 T(°C)</b>	<b>T(°C) sat</b>	<b>Ec24a T(°C)</b>
M6_pE_M5	M6_pE_C12	977	970	919
M6_pE_M7	M6_pE_C14	976	965	918
M6_pE_M8	M6_pE_C13	976	964	916
M6_pE_M10	M6_pE_C12	973	964	913
M6_pE_v18	M6_pE_C17	949	965	887
M6_aH_M20	M6_aH_C18	979	967	923
M6_aH_M22	M6_aH_C19	979	967	923
M6_aG_M23	M6_aG_C25	982	968	926
M6_pB_M36	M6_pB_C29	928	976	883
M6_pB_M37	M6_pB_C28	953	972	888
M6_aJ_M54	M6_aJ_C53	946	966	880
M6_aJ_M57	M6_aJ_C52	972	967	915
M6_aC_M60	M6_aC_C59	974	968	916
M6_aC_M61	M6_aC_C58	973	963	922
M6_aC_M62	M6_aC_C63	943	949	895
M6_aA_M66	M6_aA_C64	986	969	938
M6_aA_M67	M6_aA_C65	974	964	916
M6_aF_M70	M6_aF_C69	980	972	925
M6_aF_M71	M6_aF_C68	965	964	915
M6_aB_M74	M6_aB_C73	986	969	930
<b>PROMEDIO</b>		<b>968</b>	<b>966</b>	<b>913</b>
<b>DATO MAYOR</b>		<b>986</b>	<b>976</b>	<b>938</b>
<b>DATO MENOR</b>		<b>928</b>	<b>949</b>	<b>883</b>

### 5.2.3. PLAGIOCLASA-FELDESPATO ALCALINO

Este termómetro es posible de realizar debido a que el cristal Mx1 del montaje MA, equivalente al punto MA\_Mx1\_p1 resultó ser sanidina (figura 14). Debido a que el cristal pertenece al montaje, no es posible relacionarlo con otro cristal de plagioclasa cercano para que estén en equilibrio. Debido a esto se procedió a calcular la temperatura del

sistema de todos los puntos medidos en plagioclasa (en microsonda electrónica) respecto a la sanidina, según el modelo de Putirka (2008 y referencias incluidas).

Todas las parejas creadas resultaron estar en equilibrio, por lo que se creó una tabla con todos los resultados en el anexo D. A continuación, en la tabla 9, se muestra el resumen de los resultados.

Tabla 9. Resultados geotermómetro Putirka (2008). En azul se indican los valores menores y en rojo, los mayores. La ecuación 27b (Putirka (2008)) está calibrada según 41 observaciones experimentales, con un error de  $\pm 30^{\circ}\text{C}$ .

	<b>Ec27b T(°C)</b>	<b>Regresión global (42 experimentos) T(°C)</b>
<b>PROMEDIO</b>	<b>918</b>	<b>871</b>
<b>DATO MAYOR</b>	<b>998</b>	<b>960</b>
<b>DATO MENOR</b>	<b>857</b>	<b>811</b>

#### 5.2.4. ANFÍBOL-PLAGIOCLASA

En la hoja de cálculo ejecutable en Excel, *Hbl-Plag\_worked\_example.xls*, obtenida de Hora et al. (2013) es posible obtener la temperatura del sistema a partir de la combinación de datos de plagioclasa y anfíbol. El cálculo determina, en primer lugar, la presión del sistema a partir del trabajo de Ridolfi y Renzulli (2012), para luego, calcular la temperatura de cada combinación de puntos tomados en microsonda electrónica según el trabajo de Holland y Blundy (1994). El resultado completo se encuentra en el Anexo D.

Los datos de interés se encuentran en la tabla 10:

Tabla 10. Resultados de interés a partir de los datos de la tabla 28 en el Anexo D.

	<b>T (°C)</b>	<b>P (MPa)</b>
<b>PROMEDIO</b>	<b>791</b>	<b>140</b>
<b>DATO MAYOR</b>	<b>892</b> (M6_aC_C63-M6_pB_C27)	<b>200</b> (M6_aJ_C52)
<b>DATO MENOR</b>	<b>694</b> (M6_aG_C24-M6_pE_C16)	<b>100</b> (M6_aH_C19, M6_aA_C65)

#### 5.2.5. MAGNETITA-ILMENITA

Lepage (2003) dispone de una hoja de cálculo ejecutable en Excel, *Table\_5\_ILMAT\_magnetite\_ilmenite\_thermobarometry.xls*, para determinar las condiciones de temperatura y fugacidad de oxígeno a partir de distintos autores. No se



tiene ningún requerimiento especial sobre tipo de magma o ambiente de formación, solo trabaja con la interacción entre ilmenita y magnetita.

Como se muestra en la sección 4.2.4, hay un punto de M6 que corresponde a ilmenita y los demás a magnetita, por lo que el geotermómetro es el resultado de un punto de ilmenita respecto a magnetitas distintas, el cual se encuentra en el Anexo D. En la tabla 11 se dispone el resumen de los resultados:

Tabla 11. Resultados geotermómetro Lepage (2003).

	T(°C)	log <sub>f</sub> O <sub>2</sub>
<b>PROMEDIO</b>	792	-11,82
<b>DATO MAYOR</b>	801	-11,74
<b>DATO MENOR</b>	788	-11,88

## 5.2.6. CONDICIONES DE CRISTALIZACIÓN

De los resultados indicados en las tablas 6, 7 y 10, se tiene que la presión de cristalización varía entre 99 y 200 MPa. La temperatura presenta más variación debido a la mayor cantidad de termómetros disponibles, por lo que se obtiene más de un rango de temperatura inicialmente.

La cristalización de anfíbol ocurre entre los 791 y 813 °C, lo que concuerda con datos utilizados por Ridolfi et al. (2010) del volcán Redoubt, cuya composición varía de andesitas a dacitas.

La cristalización en equilibrio de anfíbol y plagioclasa ocurre entre los 694 y 892 °C. Estas condiciones se asemejan, a las riolitas del volcán Okataina, en Nueva Zelanda, uno de los centros riolíticos más activos del planeta, cuya geotermometría, a partir de Holland y Blundy (1994), se encuentra entre los 690 y 830 °C (Smith et al., 2005). Lo anterior permite confirmar un resultado esperable para el geotermómetro anfíbol-plagioclasa.

Por último, la cristalización de plagioclasa con vidrio o inclusiones vítreas se da entre 883 y 986 °C en total, la de plagioclasa y feldespató alcalino ocurre entre los 811 y 998 °C y, entre feldespató alcalino y/o vidrio residual, entre 815 a 839 °C.

Todos estos resultados concuerdan con rangos conocidos por la literatura siguiendo la serie de cristalización de Bowen (plagioclasa antes del o coetáneo con feldespató alcalino)

Utilizando una densidad de 2700 kg/m<sup>3</sup> (Lucassen et al., 2001) para la corteza continental, se calcula una profundidad entre 3,83 y 7,5 km, aunque, tomando en cuenta

el error del cálculo, de unos 0,6 km (15 MPa), La fuente estaría entre los 4,3 y 6,9 km de profundidad (2,6 km de espesor).

Por otro lado, la evolución en su temperatura varía a medida que la cristalización de la roca se hizo presente, determinando una temperatura máxima de formación a los 892 °C y una última condición de formación de feldespatos alcalinos y vidrio de 815 °C, denotando una fuente somera para el magma del domo Cerro La Torta. Se podría considerar la temperatura entregada por Hora et al. (2013), de 694 °C, sin embargo, este valor dista bastante de la mayoría de los resultados, en especial de la temperatura mínima del termómetro de anfíbol (752 °C), por lo que se descarta este límite mínimo.

Se debe destacar que aún no se han hecho estudios suficientes para determinar las condiciones de la fase de mayor temperatura presente, enstatita.

Se determina, además, que el porcentaje de agua del fundido es de 4,9% *wt* en promedio y una fugacidad de oxígeno ( $\log f_{O_2}$ ) de -12,06, lo que corresponde a un ambiente oxidante.

### 5.3. PETROLOGÍA

Desde el análisis petrográfico, al menos dos etapas de desequilibrio ocurrieron en el sistema debido a que la roca presenta i) piroxenos con borde de reacción de anfíbol (figura 17) y ii) anfíboles con alto nivel de reabsorción perdiendo la mayoría de su integridad, sumado a que algunos cristales presentan biotita dentro del vidrio de la reabsorción. Entonces, se puede hipotetizar una primera etapa de desequilibrio, donde el piroxeno se desestabilizó, debido al aumento de temperatura por una inyección de magma o por descompresión, y reabsorbió, creándose un borde de anfíbol con el vidrio remanente. Luego, una segunda etapa donde, por los mismos mecanismos anteriormente señalados, los cristales de anfíbol se reabsorbieron, sin embargo, no formaron ningún borde de reacción, sino que cristalizó biotita del vidrio remanente del proceso (figura 59, Anexo A, por ejemplo).

Estos desequilibrios pueden estar registrados en las zonaciones de las plagioclasas (figura 38), donde los perfiles de CaO muestran dos “*peaks*” de composición (excepto el perfil 3), indicando etapas de calentamiento del sistema para favorecer la formación de plagioclasa más rica en calcio.

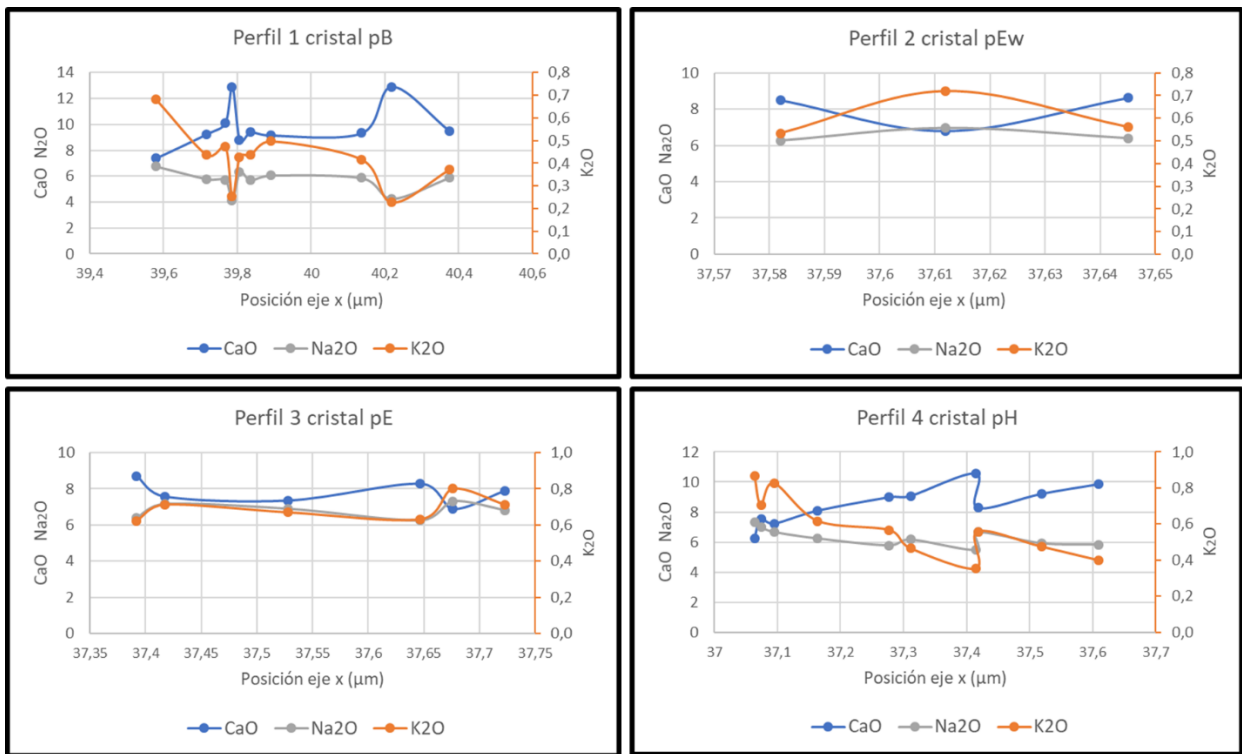


Figura 38. Gráficos de composición de CaO, Na<sub>2</sub>O y K<sub>2</sub>O (eje derecho) respecto a la posición en el eje x de los perfiles hechos en los cristales de plagioclasas, pB (perfil 1), pEw (perfil 2), pE (perfil 3) y pH (perfil 4). Se observa como el CaO se comporta de forma opuesta el K<sub>2</sub>O y Na<sub>2</sub>O. Además, se observan dos "peaks" de calcio, indicando dos momentos de recalentamiento.

Los diagramas bivariantes, especialmente los de #Mg, muestran que el proceso predominante de formación de la roca es la cristalización fraccionada, de acuerdo con los resultados de De Astis et al. (2009).

El contenido de FeO (0,73% promedio) se mantiene prácticamente constante y es variable en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, donde las inclusiones en anfíbol poseen mayor cantidad que las hospedadas en plagioclasa, debido a que el fraccionamiento de Al es mayor en este último mineral, por lo que su líquido residual (inclusión vítrea), queda empobrecido respecto a él. Lo mismo sucede con el Na<sub>2</sub>O, el cual está en mayor cantidad en las inclusiones hospedadas en anfíbol.

El K por otra parte, se comporta de manera distinta. Varía entre 4,8 y 5,6% y el promedio es de 5,25% independiente del mineral hospedante. Considerando que los índices de partición del K son 0,081 para hornblenda y 0.1 para plagioclasa (Rollinson, 1993 y referencias incluidas), el contenido de K<sub>2</sub>O se mantiene prácticamente constante, aunque siempre mostrando mayor contenido en las inclusiones de plagioclasa.

La clara separación de las inclusiones vítreas en plagioclasa y anfíbol respecto al #Mg con cuerda con el fraccionamiento del Mg en cada mineral. Debido a que las magnesio-hornblenda son ricas en magnesio, el líquido residual que forma las inclusiones

presentará menos Mg que el que forme las inclusiones en plagioclasa, mineral que prácticamente no contiene este elemento en su estructura química. Lo mismo ocurre con el Ca, el cual se fracciona más a la hornblenda que a las plagioclasas.

Por otro lado, la clasificación TAS junto con el diagrama de  $K_2O$ , indican que el fundido corresponde a un magma calco-alkalino rico en Ca, típico del ambiente de subducción de margen continental en el que se encuentra La Torta.

Las inclusiones y el vidrio de masa fundamental presentan un alto contenido de U, Th, Rb y K, el cual no califica como elemento traza, sino como elemento mayoritario. Esto evidencia la avanzada diferenciación del magma en el momento en que las inclusiones se atraparon (y, por ende, cuando se estaba formando la fase sólida).

Al contrario de los cristales de plagioclasas, sus inclusiones sí presentan valores mayores de HREE, dados por el coeficiente de partición de los elementos en el líquido. Cabe destacar, también, que los patrones son relativamente complementarios ya que, a pesar de que ambos están empobrecidos, las inclusiones presentan composiciones más diferenciadas.

Si se compara el patrón de tierras raras (normalizadas a corteza superior) de las Mg-Hbl con sus respectivas inclusiones se observa prácticamente el mismo enriquecimiento en HREE, lo que no debiera pasar si se tiene en cuenta que las inclusiones corresponden al fundido residual a medida que va cristalizando el anfíbol, quedando con los elementos que éste no fracciona. Por esto, no debiera haber HREE ya que el anfíbol las fracciona mucho más fácil.

Otro aspecto a destacar en las inclusiones en Mg-Hbl es su sorpresivo contenido, no despreciable de Ni y Cr (figura 39), elementos altamente compatibles en fases como el olivino y espinela, donde pasan a ser elementos mayoritarios y menores. Sin embargo, en el ambiente en que se encuentra este magma y el alto contenido de sílice, el fraccionamiento de olivino no es una opción, aunque sí lo es la enstatita. El único cristal analizado tiene valores de 1051 y 1324 ppm de Cr y 173 y 82 ppm de Ni, donde los valores menores corresponden a una medición más cerca del borde. Por otro lado las ulvo-espinelas tienen valores de Cr de entre 749 a 2034 ppm y entre 36 y 64 ppm de Ni (Anexo C).

Considerando que no existe un coeficiente de partición para Cr y Ni en un magma riolítico debido a su alta compatibilidad (Rollinson, 1993), la presencia de estos elementos en las inclusiones de magnesio-hornblenda (y no en plagioclasas), indican que fueron heredados desde un fundido menos diferenciado, evidenciando al menos una inyección durante el proceso de cristalización del magma del domo.

Este magma más primitivo, en una etapa temprana, además de mezclarse y aportar elementos compatibles, pudo haber producido un desequilibrio en el sistema generando la disolución casi completa de la enstatita, lo que explicaría por qué se tienen microfenocristales de este mineral en un magma con un porcentaje de sílice mayor al 70% *wt*. Estos cristales serían los sobrevivientes de este evento de disolución. Entonces, al producirse el desequilibrio el magma se enriqueció en elementos compatibles (cuyo

índice de partición es mayor que en anfíbol), los cuales entraron a la nueva fase mienral en cristalización, la magnesio-hornblenda.

El anfíbol se caracteriza por fraccionar tierras raras pesadas (Rollinson 1993), lo cual coincide con lo mostrado en el diagrama spider, sin embargo, al formarse en un fundido con un contenido excepcionalmente mayor de tierras raras, las inclusiones también atraparon estos elementos, junto con las trazas mencionadas, heredando la composición de la enstatita. Esto se ve más claro observando las concentraciones de Ni y Cr en las inclusiones y el cristal de piroxeno (Anexo C). Los valores mínimos de Ni en la enstatita es de 80 ppm aproximadamente y, en las inclusiones de Mg-Hbl coincide en este valor, pero como concentración máxima (~66 ppm) y lo mismo ocurre con el Cr; con valores mínimos de 1050 ppm para el piroxeno y un máximo de 1248 (en promedio) para las inclusiones. En otras palabras, hay una evolución continua y natural del contenido de Ni y Cr, donde este sale del piroxeno y se fracciona a la inclusión formada en anfíbol.

Además, hay que destacar que la concentración máximas y mínimas de Ni y Cr dada para las inclusiones, se dan de centro a borde en los cristales aA y aG. En los demás, siempre son menores independientes de su ubicación, por lo tanto, estos dos cristales pueden ser más antiguos.

El hecho de que este aumento en las HREE, Ni, y Cr, no suceda en las inclusiones hospedadas en plagioclasa solo se explica por los coeficientes de partición de estos elementos en el mineral. En un magma riolítico, y en general, la plagioclasa fracciona elementos más incompatibles (Rollinson 1993). Es más, hay dos muestras que sí registran contenido de Ni y Cr (Anexo C.1.1), por lo que también pudo haber ocurrido lo mismo con las plagioclasas, pero en muchísimo menor medida. Además, ocurre que los límites inferiores de Ni y Cr, coinciden con los valores máximos de estos elementos en las inclusiones en anfíbol, dando paso a una evolución continua de composición.

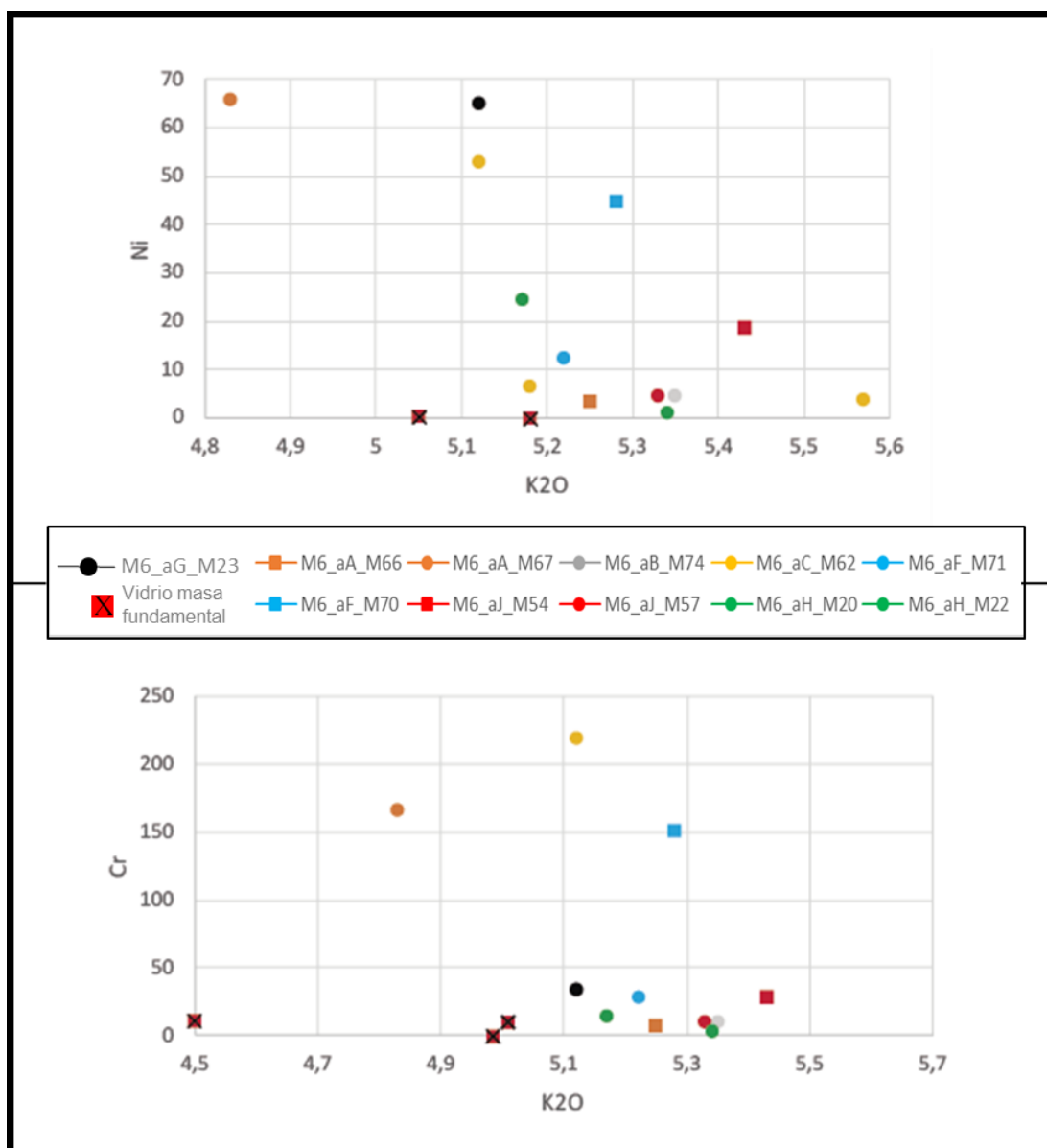


Figura 39. Gráficos bivariantes de la variación de Ni y Cr respecto al K<sub>2</sub>O de las inclusiones hospedadas en Mg-Hbl, además de mostrar que el vidrio de masa fundamental también contiene una cantidad menor de estos elementos compatibles. Los cuadrados indican inclusiones ubicadas en el centro de los cristales y los círculos, en el borde. Cada color es un cristal distinto.

Los puntos anteriores, sumados a la geotermobarometría y a un contenido promedio de sílice de 74% sin mostrar un patrón de evolución importante en su composición (diagrama TAS, figura 19), indicando que el magma del domo Cerro La Torta ya estaba altamente evolucionado, de composición riolítica (74% wt SiO<sub>2</sub> en promedio), cuando cristalizó.

Lo anterior lleva a pensar que las inclusiones vítreas registran la última etapa en la evolución del magma parental, ya que un fundido con 74% de SiO<sub>2</sub> no puede fraccionar

piroxeno ni tampoco puede fraccionar plagioclasa con alto contenido de calcio, por lo tanto, debe haber un magma anterior y más primitivo.

#### **5.4. MODELO DE FORMACIÓN**

El domo Cerro La Torta se encuentra al oeste de los cerros de Tocorpuri y del Volcán Tocorpuri, y al este de la Cordillera del Tatio. Lucchi et al. (2009) y Lahsen y Munizaga (1984) describen estos centros eruptivos como andesita rica en K, para el primero, y andesitas a dacitas, para los otros dos. De esta forma, centrándose en los edificios volcánicos al este del domo, se observa una evolución composicional de andesita a riolita, lo que puede interpretarse como una fuente magmática común que fue diferenciándose cambiando sus condiciones PT (figura 36).

La formación del volcán Tocorpuri ocurre cerca de los 0,8 Ma (Lucchi et al., 2009), expulsando material andesítico, el cual, luego de un periodo de inactividad volcánica local, se falla de forma normal (nf1), para pasar a un nuevo periodo eruptivo que creó los cerros de Tocorpuri, de composición andesítica a dacítica. Luego, hubo un periodo de fallamiento inverso en la zona (tf3 y tf4) que dio paso, hace solo 34 ka, a la erupción de La Torta (Lucchi et al., 2009), es decir, se tiene un periodo de casi 800 ka en donde el magma primitivo (andesítico) que generó la primera etapa haya cristalizado y diferenciado, llegando a convertirse en un magma riolítico.

Hay que destacar la presencia del cuerpo magmático Altiplano-Puna (APMB), el cual se encuentra a una profundidad de 10 a 25 km. bajo el nivel mar, con un 25% de fusión parcial (Ward et al., 2014). El cerro La Torta se ubica cerca del centro del área de 60000 km<sup>2</sup> que cubre este cuerpo.

Con lo anterior, sumado a los datos de geotermobarometría, se puede pensar en una cámara magmática y/o zonas de debilidades más somera que el APMB, que hizo de fuente para la erupción del domo.

Un modelo que abarque toda la información proporcionada hasta el momento consistiría en al menos cinco etapas: i) En una etapa muy temprana y no registrada, hasta el momento, hubo un magma más primitivo y profundo (andesítico) capaz de fraccionar enstatita y/o algo de magnesio-hornblenda. ii) En algún momento posterior, el efecto del APMB pudo haber calentado la corteza donde se emplazaba este magma e, incluso, activar alguna inyección de material fundido, el cual produjo un desequilibrio en el sistema, por ascenso y descompresión, disolviendo violentamente al piroxeno, quedando micro-fenocristales remanentes. iii) La nueva fase fundida enriquecida en los elementos compatibles y tierras raras pesadas de estos minerales, empezó a estabilizarse y a cristalizar, creando inclusiones en la nueva Mg-Hbl casi igual de enriquecidas en estos elementos que su mineral huésped. iv) Ocurre un periodo de cristalización fraccionada de las fases minerales actuales y sus respectivas inclusiones, llegando a la formación de cuarzo y biotita. Aquí las inclusiones van evolucionando en su composición y, de centro a borde de los cristales, va disminuyendo el contenido de Ni y Cr. v) Por último, un nuevo

desequilibrio dado por un nuevo ascenso y cambios de presión desequilibró estos anfíboles y cuarzos evidenciados en los bordes de reabsorción (figura 80, Anexo A.3.9).

Las plagioclasas al encontrarse zonadas evidencian su participación en todas las etapas al ser andesinas, es decir, de composición intermedia, pero ricas en calcio, sobre todo en las dos etapas de desequilibrio, donde registran su mayor contenido de este elemento (figura 39).

El magma andesítico que se propone pudo haber venido de la fuente del volcán Tocarpori, dando paso a una posible conexión de fuentes magmáticas o incluso, una sola más grande que la determinada por geotermobarometría (figuras 40 y 41).

El rango de profundidad definido avala una cristalización a diferentes presiones dentro de un cuerpo magmático pequeño y somero.

El magma constituyente de La Torta asciende por dos fallas inversas de dirección NNE-SSW y manteo hacia el este (tf3 y tf4) (Lucchi et al., 2009), por lo que la fuente magmática estaría desplazada hacia el este del domo y no directamente bajo él (figuras 36 y 37).

De Astis et al. (2009) propone procesos de “*mingling*” para explicar la diferencia de composiciones en su zona de estudio debido al alto contenido de elementos LIL y HFS, estos últimos incompatibles en silicatos, en composiciones de roca total. Con las inclusiones vítreas se ve un alto contenido de estos elementos, sobre todo de Pb, K, Rb, Th, U y, en menor medida, Cs, por lo que nuevamente existe la posibilidad de una intrusión magmática más primitiva.



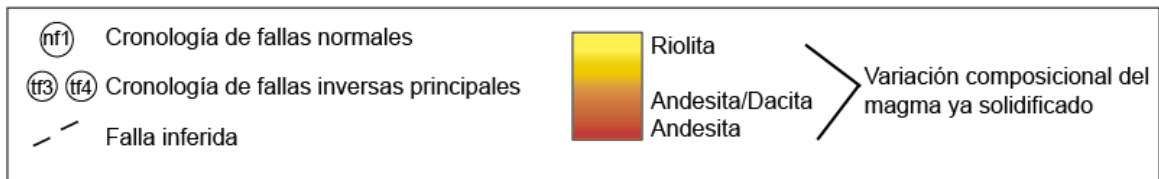
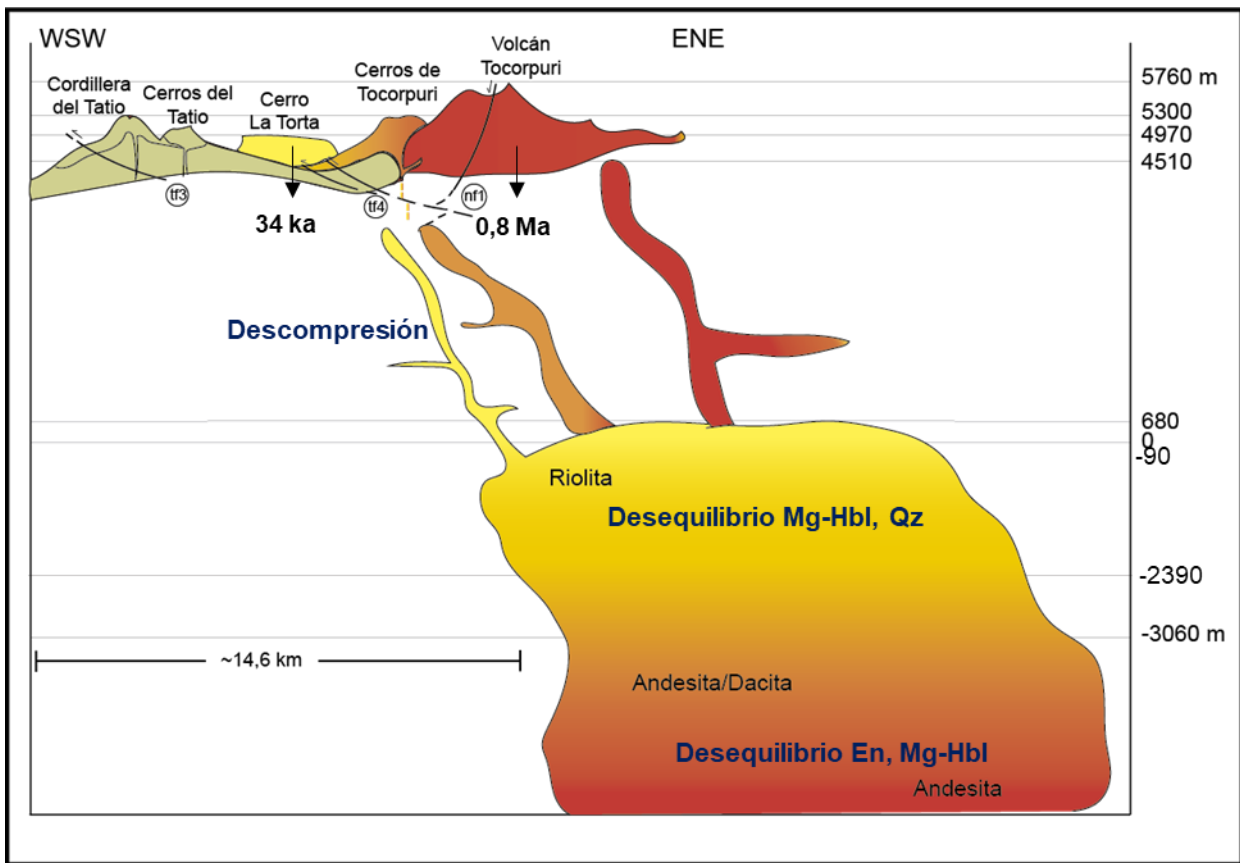


Figura 40. Sección esquemática del modelo propuesto para la profundidad de la cámara magmática común que formó el domo Cerro La Torta y el volcán y cerros de Tocorpuri. Ésta se ubicaría a ~90 m. bajo el nivel del mar (114 MPa, con un máximo de 680 m.s.n.m) donde los siguientes 2,6 km, en profundidad, correspondería a la zona de riolita cristalizando a diferentes presiones mientras asciende el magma, llegando a los ~2390m. bajo el nivel del mar (185 MPa, con un máximo de 3060 m.), para luego erupcionar. Bajo esta profundidad la composición de la cámara es más dacítica a andesítica, siendo la fuente de los centros volcánicos más antiguos. El gradiente de colores cálidos muestra la evolución composicional de los edificios volcánicos adyacentes al domo (Cerros de Tocorpuri y Volcán Tocorpuri) de andesita – andesita/dacita – riolita. El eje X no está a escala.

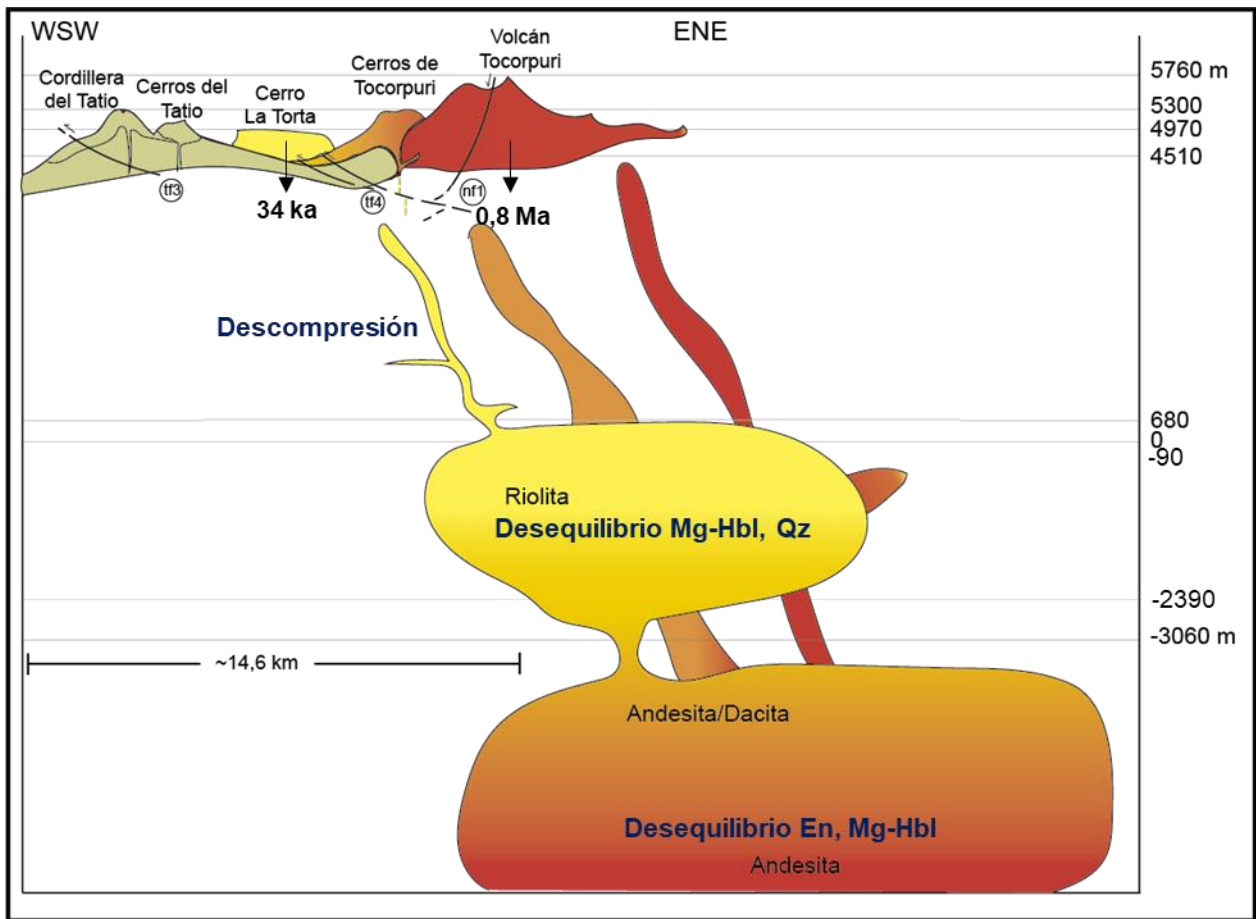


Figura 41, Sección esquemática para el modelo de dos fuentes magmáticas. La primera es más profunda, antigua y primitiva, dando origen a los cerros y volcán Tocopuri de composiciones andesítica y andesítica/dacítica, respectivamente gracias a la diferenciación del magma. Luego, un dique alimentador, propició la formación de una nueva fuente más somera, a sobre los 2390 m. bajo el nivel del mar (185 MPa), cristalizando a distintas presiones mientras el magma asciende hasta un mínimo de 114 MPa, equivalentes a 90 m. bajo la superficie del mar, donde finalmente erupciona a través de las debilidades de la corteza. La simbología es la misma que en la figura 40. El eje X no está a escala.

## CAPÍTULO 6. CONCLUSIÓN

El Cerro La Torta corresponde a un domo volcánico definido macroscópicamente como una dacita de anfíbol y biotita, debido a la nula presencia de feldespatos alcalinos. Sin embargo, químicamente, se sabe que su alto contenido, en roca total, de sílice es de 70%, clasificándose como una riolita.

A partir del estudio de la química mineral de la roca, se determina que el piroxeno corresponde a enstatita y el anfíbol, a magnesio-hornblenda; la plagioclasa es mayoritariamente andesina, así como el escaso feldespato alcalino, es sanidina. Por otra parte, los óxidos de Fe-Ti resultan ser ulvo-espinelas e ilmenitas.

El estudio de las inclusiones vítreas determinó un magma riolítico rico en potasio, con un promedio de 74,5% *wt* de sílice variando entre 71 y 77% *wt* y un contenido de potasio es de 5,3% *wt*, en promedio, variando entre 5 y 6% *wt*.

Las condiciones de cristalización del domo, dado por los geotermobarómetros, son las siguientes: i) La fuente magmática es somera ubicada entre los 4,3 y 6,9 km bajo la superficie donde sobreyace el domo. ii) Lo anterior equivale a una presión entre 114 y 185 MPa. iii) La temperatura de cristalización de las distintas fases y sus respectivas inclusiones varía entre 949 y 723 °C en promedio.

La fugacidad de oxígeno del fundido,  $\log f_{O_2}$ , se determina en -12,3, determinando un ambiente oxidante, y un porcentaje de agua de 4,9% *wt*, un valor normal para un magma riolítico.

Las inclusiones estudiadas registran un último evento de cristalización de fases minerales debido a que un magma de 74% de sílice no puede fraccionar piroxeno, por lo que la fuente real está más profunda y menos diferenciada. La gran presencia de andesina indica que este magma parental real, es andesítico.

Se establecen dos modelos de fuente magmática para La Torta. i) Fuente magmática común y más profunda que los 2,6 km de espesor, que en un principio (0,8 Ma) tenía composición andesítica a dacítica/andesítica, erupcionando el volcán Tocorpuri y, posteriormente, los Cerros de Tocorpuri. Este magma contenía enstatita y magnesio-hornblenda que por un calentamiento provocado por otro cuerpo magmático más primitivo se disolvieron violentamente, enriqueciendo el sistema en Ni, Cr y tierras raras pesadas, quedando escasos micro-fenocristales de enstatita. Las nuevas fases de Mg-Hbl asimilaron estos elementos tanto en su cristal como en sus inclusiones. Posteriormente, el magma fue ascendiendo y cristalizando fraccionadamente a fases minerales como cuarzo y biotita, registrando un decaimiento en la concentración de los elementos compatibles de las inclusiones de centro a borde. Luego de un periodo de residencia suficiente para formar fenocristales de hasta un cm de largo, ocurre una descompresión y recalentamiento debido a la fuente de calor aportada por el APMB, que creó las texturas de reabsorción en cuarzo y anfíbol. Las plagioclasas son testigo de toda esta evolución

registrada en sus zonaciones, donde se ven dos “*peaks*” de Ca, es decir, dos momentos de recalentamiento. ii) Fuente magmática netamente riolítica alimentada por otra más profunda y primitiva que dio origen a los otros dos edificios volcánicos adyacentes y que empezó a diferenciarse, sufriendo los mismos procesos anteriores.

La ubicación lateral de la fuente de magma está desplazada hacia el este, aunque sin determinar exactamente cuánto. Esto se debe a que las fallas inversas bajo el domo, pueden ser los conductos por donde terminó de ascender el magma hasta la superficie.

El mayor descubrimiento de este estudio es que las inclusiones vítreas analizadas registran la última etapa de evolución del magma parental del domo Cerro La Torta. Es por esto que se recomienda un mayor estudio de la enstatita y sus inclusiones vítreas debido a que, dada la composición actual de 74% de sílice, claramente este mineral cristalizó de un magma con una composición menos diferenciada, andesítica, probablemente, debido a la presencia de andesina.

También se debiera prestar mayor atención a las texturas de desequilibrio en piroxenos y anfíboles, así como en los cristales de cuarzo, los cuales están totalmente redondeados en sus bordes.

Por último, para corroborar uno de los dos modelos, es necesario estudiar las inclusiones vítreas del Volcán Tocorpuri y los Cerros de Tocorpuri para determinar sus condiciones de formación y su relación con el domo Cerro La Torta, además de ahondar en el estudio de los domos dacíticos similares que hay en la zona.

## BIBLIOGRAFÍA

Baker, M. C. W. (1977). *Geochronology of upper Tertiary volcanic activity in the Andes of North Chile*. *Geologische Rundschau*, 66(1), 455-465.

Bidart, N. (2014). *Petrología y geoquímica de lavas recientes, al sureste del Campo Geotermal del Tatio*. Memoria para optar al título de geólogo. Santiago de Chile. 162 páginas.

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*, 71, 4-19.

Charrier, R, Pinto, L, Rodríguez, M. (2007). *Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile*. In Moreno, T, Gibbons, W. *The Geology of Chile*. The Geological Society. Londres, 21-144.

De Astis, G., Lucchi, F., Tranne C. A., Rossi P. L. (2009). *Evidence for different processes of magma evolution in El Tatio volcanic region (22°16' to 22°30'S, Central Volcanic Zone, Andes)*. In: Amorosi A.H.B.U y Sabado L. (eds) *Advances in Application of sequence stratigraphy in Italy*, *GeoActa*, publicación especial, 2. 31-58.

De Silva, S. L. (1989). *Geochronology and stratigraphy of the ignimbrites from the 21 30' S to 23 30' S portion of the central Andes of northern Chile*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 37(2), 93-131.

De Silva, A. L., Self, S, Francis, P.W, Drake, R. E., Ramirez, C. (1994). *Effusive silicic volcanism in the Central Andes: The Chao dacite and other young lavas of the Altiplano-Puna Volcanic Complex*. *Journal of Geophysical Research*, 99(B9), 17.805-17.825.

Francis, P. (1993). *Volcanoes*. Segunda edición. Editorial Oxford University Press. Reino Unido.

Galland, O., Cobbold, P. R., de Bremond d'Ars, J., & Hallot, E. (2007). *Rise and emplacement of magma during horizontal shortening of the brittle crust: Insights from experimental modeling*. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B6).

Godoy, B., Wörner, G., Le Roux, P., de Silva, S., Parada, M. Á., Kojima, S., González-Maurel, O., Morata, D. Polanco, E., Martínez, P. (2017). *Sr-and Nd-isotope variations along the Pleistocene San Pedro–Linzor volcanic chain, N. Chile: Tracking the influence of the upper crustal Altiplano-Puna Magma Body*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 341, 172-186.

Guest, J.E. (1969). *Upper Tertiary ignimbrites in the Andean Cordillera of part of the Antofagasta province of northern Chile*. *Geological Society of America Bulletin*, 80, 337-362.

- Harker, A. (1909). *The natural history of igneous rocks*. Macmillan.
- Holland, T., & Blundy, J. (1994). *Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry*. *Contributions to mineralogy and petrology*, 116(4), 433-447.
- Hora, J. M., Kronz, A., Möller-McNett, S., & Wörner, G. (2013). *An Excel-based tool for evaluating and visualizing geothermobarometry data*. *Computers & geosciences*, 56, 178-185.
- Jochum, K. P., Weis, U., Stoll, B., Kuzmin, D., Yang, Q., Raczek, I., Jacob, D. E., Stracke, A., Birbaum, K., Frick, D. A., Günther, D., Enzweiler, J. (2011). *Determination of reference values for NIST SRM 610–617 glasses following ISO guidelines*. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 35(4), 397-429.
- Lahsen, A. (1969). *Geología del área comprendida entre El Tatio y los Cerros de Ayquina*. Corporación del Fomento y la Producción (CORFO).
- Lahsen, A. (1976). *La actividad geotermal y sus relaciones con la tectónica y el volcanismo en el norte de Chile*. I Congreso Geológico Chileno. Actas. Santiago, Chile.
- Lahsen, A., (1982). Upper Cenozoic volcanism and tectonism in the Andes of northern Chile. *Earth-Science Reviews*. 18(3-4), 285-302.
- Lahsen, A., Munizaga, F. (1979). *Nuevos antecedentes cronológicos del volcanismo cenozoico superior de Los Andes del norte de Chile, entre los 19°00' y los 22°30' lat S*. Segundo Congreso Geológico Chileno. Arica, 1, F61-F82.
- Le 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.
- Lahsen, A., Rojas, J., Morata, D., Aravena, D., 2015. *Geothermal exploration in Chile: country update*. Proceedings World Geothermal Congress 2015. Melbourne, Australia.
- Lepage, L. D. (2003). *ILMAT: an Excel worksheet for ilmenite–magnetite geothermometry and geobarometry*. *Computers & Geosciences*, 29(5), 673-678.
- Locock, A. J. (2014). An Excel spreadsheet to classify chemical analyses of amphiboles following the IMA 2012 recommendations. *Computers & Geosciences*, 62, 1-11.
- Lucassen, F., Becchio, R., Harmon, R., Kasemann, S., Franz, G., Trumbull, R., Wilke H-G., Romer R. L., Dulski, P. (2001). *Composition and density model of the continental crust at an active continental margin—the Central Andes between 21 and 27 S*. *Tectonophysics*, 341(1), 195-223.
- Lucchi, F., Tranne, C.A., Rossi, P.L., Gallardo, C., De Astis, G., Pini, G.A. (2009). *Volcanic and tectonic history of the El Tatio area (central Andes, northern Chile): explanatory notes to the 1:50.000 scale geological map*. In: Amorosi A.H.B.U y Sabado

L. (eds) Advances in Application of sequence stratigraphy in Italy, GeoActa, publicación especial, 2. 1-29.

Marinovic, N, Lahsen, A. (1984). *Hoja de Calama, región de Antofagasta*. Santiago de Chile: Servicio Nacional de Geología y Minería.

McDonough, W. F., & Sun, S. S. (1995). The composition of the Earth. *Chemical geology*, 120(3-4), 223-253.

Morata, D. (2014). ¿Chile: un País geotérmico en un futuro inmediato? En *Anales de la Universidad de Chile*. 5, 71-86.

O'Neill H. St. C., Pownceby M. I. V. (1993). *Thermodynamic data from redox reactions at high temperature. I. An experimental and theoretical assessment of the electrochemical method using stabilizing zirconia electrolytes, with revised values for the Fe-FeO, Co-CoO, Ni-NiO and Cu-Cu<sub>2</sub>O oxygen buffers, and new data for the W-WO<sub>2</sub> buffer*. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 114(3), 296-314.

Paton, C., Hellstrom, J., Paul, B., Woodhead, J., & Hergt, J. (2011). *Iolite: Freeware for the visualization and processing of mass spectrometric data*. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 26(12), 2.508-2.518.

Pearce, J.A. (1983). *Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins*. En: Hawkesworth, C.J. & NORRY, M.J. eds: *Continental Basalts and Mantle Xenoliths*. Shiva Publishing, Cambridge, 230-249.

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. (2008). *Thermometers and barometers for volcanic systems*. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 69(1), 61-120.

Ramírez, C.F., (1979). *Geología del cuadrángulo Rio Grande y sector sur oriental del cuadrángulo Barros Arana, Provincia El Loa, II Región*. Memoria de prueba, Departamento de Geología, Universidad de Chile.

Renzulli A., Menna, M., Tibaldi A., Flude S. (2006). *New data of the Surface geology, petrology and Ar-Ar geochronology of the Altiplano-Puna volcanic complex (northern Chile) in the framework of future geothermal exploration*. XI Congreso Geológico Chileno. Actas, 2, Geodinámica Andina. Antofagasta.

Ridolfi, F., & Renzulli, A. (2012). *Calcic amphiboles in calc-alkaline and alkaline magmas: thermobarometric and chemometric empirical equations valid up to 1,130° C and 2.2 GPa*. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 163(5), 877-895.

Ridolfi, F., Renzulli, A., & Puerini, M. (2010). *Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: an overview, new thermobarometric formulations and application to subduction-related volcanoes*. Contributions to Mineralogy and Petrology, 160(1), 45-66.

Ringwood. A.E. (1962). *A model for the upper mantle*. Journal of Geophysical Research, 67(2). 857-867.

Ringwood. A.E. (1966). *The chemical composition and origin of the Earth*. In Advances in Earth Sciences, 65, 287-356.

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

Roobol, M. J., Francis, P. W., Ridley, W. I., Rhodes, M., Walker, G. P. L. (1974). Physico-chemical characters of the Andean volcanic chain between latitudes 21° and 22° South. Paper presentado en el Symposium Intemacional de Volcanología, Int. Assoc of Volcanol and Chem of Earth's Inter., Santiago, Chile, Sept.9 -14th.

Salisbury M. J., Jicha B. R., de Silva S. L., Singer B. S., Jiménez N. C., Ort M. H. (2010). *<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar chronostratigraphy of Altiplano-Puna volcanic complex ignimbrites reveals the development of a mayor magmatic province*. Geological Society of America Bulletin, 123, 821-840.

Sanchez-Alfaro, P., Sielfeld, G., Van Campen, B., Dobson, P., Fuentes, V., Reed, A., Palma-Behnke, R., Morata, D. (2015). *Geothermal barriers, policies and economics in Chile—Lessons for the Andes*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 51, 1390-1401.

Smith, V. C., Shane, P., & Nairn, I. A. (2005). *Trends in rhyolite geochemistry, mineralogy, and magma storage during the last 50 kyr at Okataina and Taupo volcanic centers, Taupo Volcanic Zone, New Zealand*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 148(3), 372-406.

Taylor, S. R., McLennan, S. M. (1985). *The continental crust: its composition and evolution*. United States: Blackwell Scientific Pub., Palo Alto, CA.

Tibaldi, A. (2005). *Volcanism in compressional tectonic settings: Is it possible?* Geophysical Research Letters, 32(6), 114-135.

Tibaldi, A., Corazzato, C., & Roviada, A. (2009). *Miocene–Quaternary structural evolution of the Uyuni–Atacama region, Andes of Chile and Bolivia*. Tectonophysics, 471(1), 114-135.

Ward, K. M., Zandt, G., Beck, S. L., Christensen, D. H., & McFarlin, H. (2014). *Seismic imaging of the magmatic underpinnings beneath the Altiplano-Puna volcanic complex from the joint inversion of surface wave dispersion and receiver functions*. Earth and Planetary Science Letters, 404, 43-53.



# ANEXO A: IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE INCLUSIONES VÍTREAS MUESTRA M6

## A.1. PLAGIOCLASA

### A.1.1. CRISTAL pA

Pertenece a un aglomerado de plagioclasas. Presenta integridad regular debido a sus múltiples fracturas, al igual que su estructuralidad, por la forma redondeada que posee. Además, se observa zonación concéntrica, desde el centro, a nícoles cruzados (figura 42).

#### *Familias de inclusiones vítreas*

F1: Tamaño de 7 por 7  $\mu\text{m}$  y 9 por 10  $\mu\text{m}$ , con una burbuja que ocupa el 25%. En el resto de las inclusiones se ve cristalizado el vidrio (figura 42).

F2: Homogénea, con una burbuja que ocupa el 20% de la inclusión. Su tamaño es de 6 por 5  $\mu\text{m}$  (figura 42).

F3: Inclusión muy grande, de 85  $\mu\text{m}$  de largo por 39  $\mu\text{m}$  de ancho. Presenta un 14% de minerales opacos de forma masiva y purulenta, además de un 13% de minerales tabulares traslúcidos (figura 42).

F4: Perfectamente redondas y totalmente vítreas, con un tamaño de 6  $\mu\text{m}$ . Se ubican en el centro y este del cristal.

F5: Una inclusión de 45 por 50  $\mu\text{m}$  que se compone de un cristal prismático color verdoso a traslúcido correspondiente al 35%. El vidrio se encuentra recristalizado.

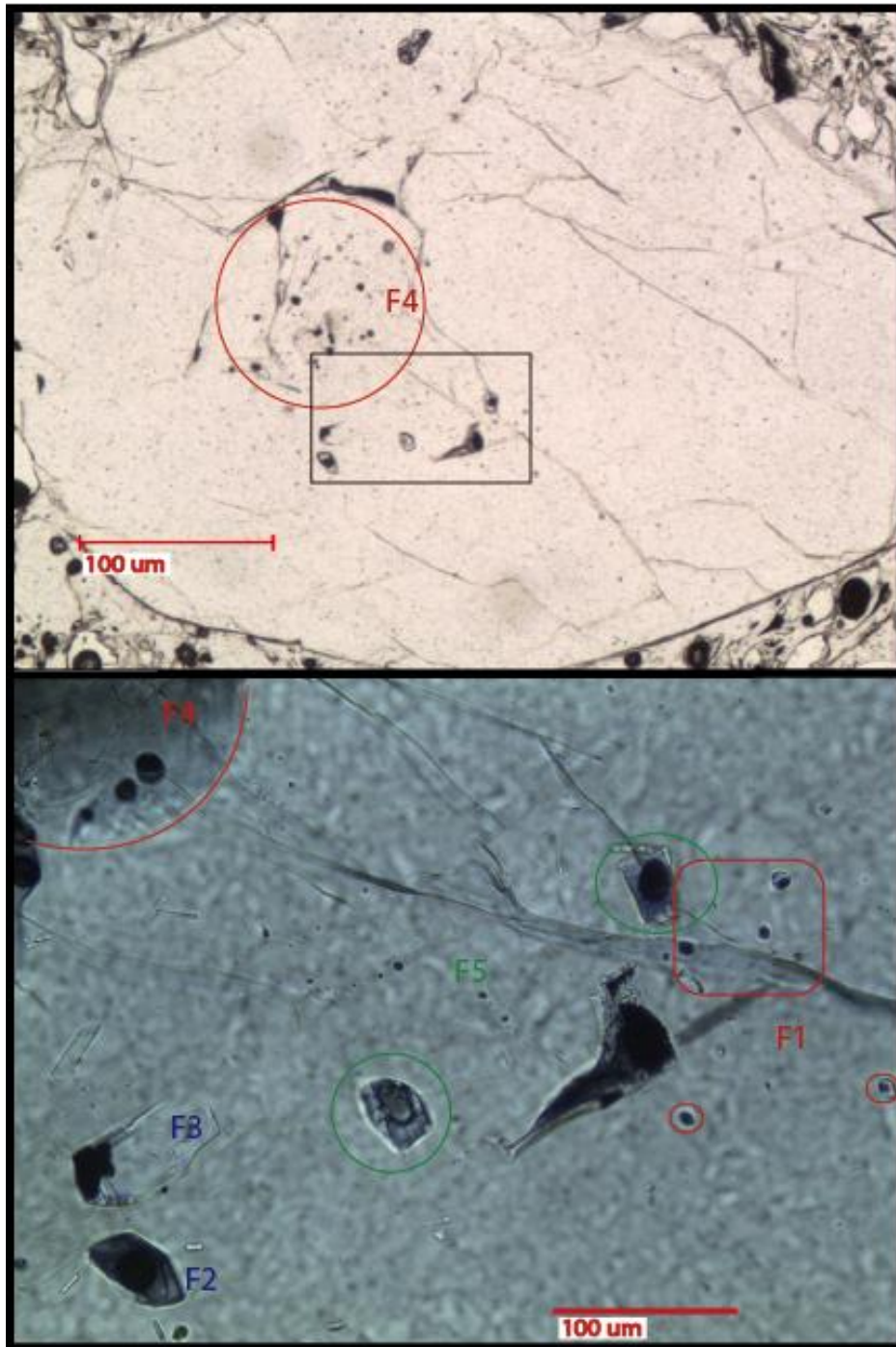
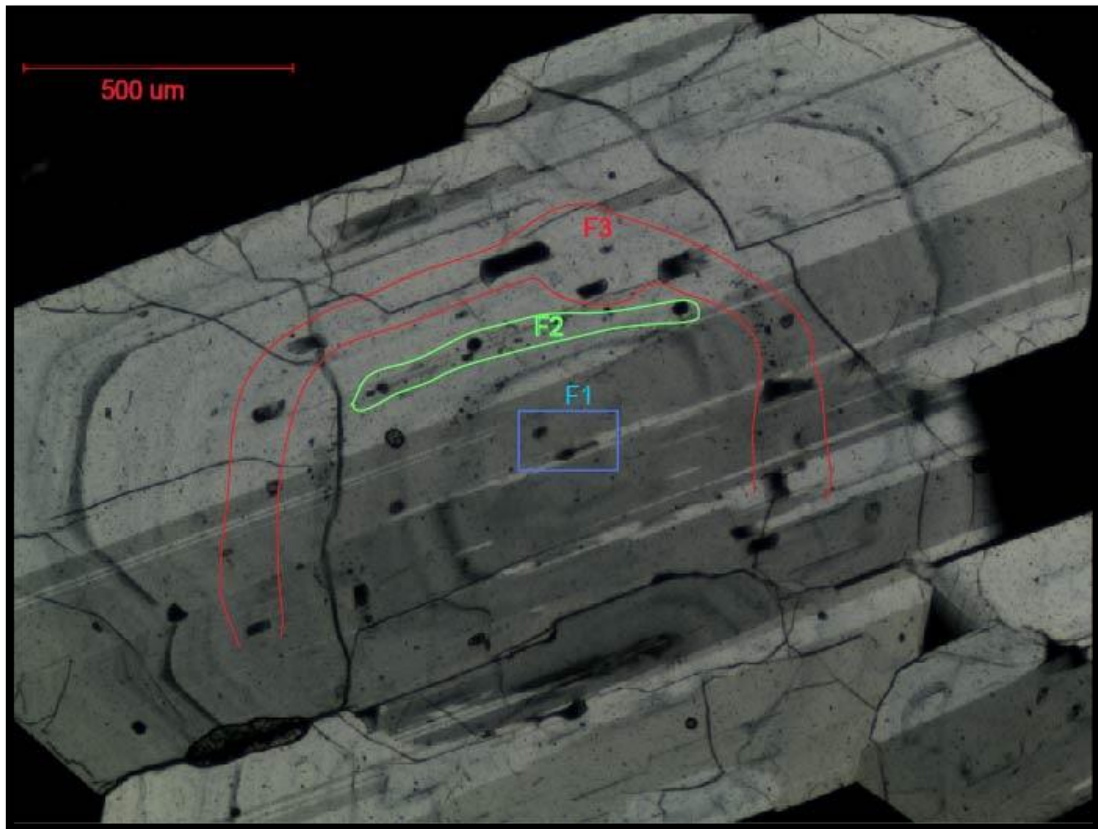


Figura 42. Arriba, cristal pA visto en aumento de 5x a nícoles paralelos. Se observa F4 y el recuadro negro corresponde a la imagen de abajo, donde se muestran las demás familias.

### A.1.2. CRISTAL pB

Cristal tabular de buena estructuralidad de 1 mm de largo por 0,6 mm de ancho, con buena integridad (presenta pequeñas fracturas). Presenta zonación concéntrica e inclusiones vítreas en toda su extensión, además de bordes de reabsorción e inclusiones de ortopiroxeno de 6  $\mu\text{m}$  de largo (figura 43).



*Figura 43. Cristal pB en un aumento de 5x a nícoles cruzados. Se observa la macla polisintética y la zonación concéntrica, así como las inclusiones vítreas más grandes y las familias a las que pertenecen.*

#### *Familias de inclusiones vítreas*

F1: Ubicadas en el centro del cristal, con un tamaño de 40  $\mu\text{m}$ , en diferentes planos y con forma alargadas a redondeadas. Se presentan cristalizadas con una burbuja en su centro, la cual ocupa el 50% de la inclusión, sin presencia de minerales (figura 43).

F2: Inclusiones opacas ubicadas en la primera zonación. Son cuadradas con tamaños variados menores a 10  $\mu\text{m}$ . Se ven completamente negras. Se observa que también se encuentran en las demás zonaciones (figura 43).

F3: En la segunda zonación. Son alargadas, con tamaños entre 20 y 100  $\mu\text{m}$ , ocupando, la burbuja, 1/3 respecto al vidrio, ya que no se observan minerales (figura 43).

F4: De color marrón claro, ubicadas en la segunda zonación. Presenta un mineral opaco correspondiente al 24% y una burbuja, al 3%. Se ven solo un par de ellas. Tamaño de 14 por 8  $\mu\text{m}$ .

F5: De color marrón claro, ubicada también la segunda zonación. Sin embargo, sólo posee opacos que ocupan el 3% de la inclusión. Tamaño de 17 por 14  $\mu\text{m}$ .

F6: Ubicadas en la tercera zonación, son muy pequeñas (menos de 3  $\mu\text{m}$ ) y cuantiosas.

F7: Ubicadas en la tercera zonación, con tamaños de 6 por 7  $\mu\text{m}$ ; homogéneas y con una burbuja correspondiente al 22%. Se encuentran todas agrupadas en un solo lugar.

F8: Ubicada hacia el borde del cristal, en la parte este, fuera de todas las zonaciones. Es muy parecida a F1, con el vidrio cristalizado; sin embargo, la burbuja ocupa un 33% de la inclusión. Su tamaño es de 15 por 12  $\mu\text{m}$ .

### A.1.3. CRISTAL pC

Este cristal presenta zonación concéntrica, al igual que pB. Sin embargo, su integridad es regular debido a las numerosas fracturas que presenta, teniendo, sí, una buena estructuralidad. Su tamaño es de 2mm en el lado más largo. Se observan bordes íntegros, exceptuando la parte inferior izquierda, donde hay cristales de biotita en borde de reacción y reabsorción (figura 44).

#### *Familias de inclusiones vítreas*

F1: Ubicadas desde la primera zonación hacia afuera. Son redondeadas y tan pequeñas que solo se ven negras (2  $\mu\text{m}$ ) (figura 44).

F2: Entre la primera y segunda zonación, todas dentro del mismo plano. Contienen una burbuja, correspondiente a 1/3 de cada inclusión, sin presencia de minerales en su interior. Son de formas redondeadas y alargadas con tamaños entre 20 y 100  $\mu\text{m}$  (figura 44).

F3: Ubicada en la tercera zonación, con un tamaño máximo de 20  $\mu\text{m}$  que va disminuyendo a lo largo de la banda. Son más abundantes que las familias anteriores y su burbuja ocupa el 50% de cada inclusión.

F4: Ubicadas también en la tercera zonación, con un tamaño de 20  $\mu\text{m}$  y una burbuja que ocupa el 75% de cada inclusión, sin presentar minerales.



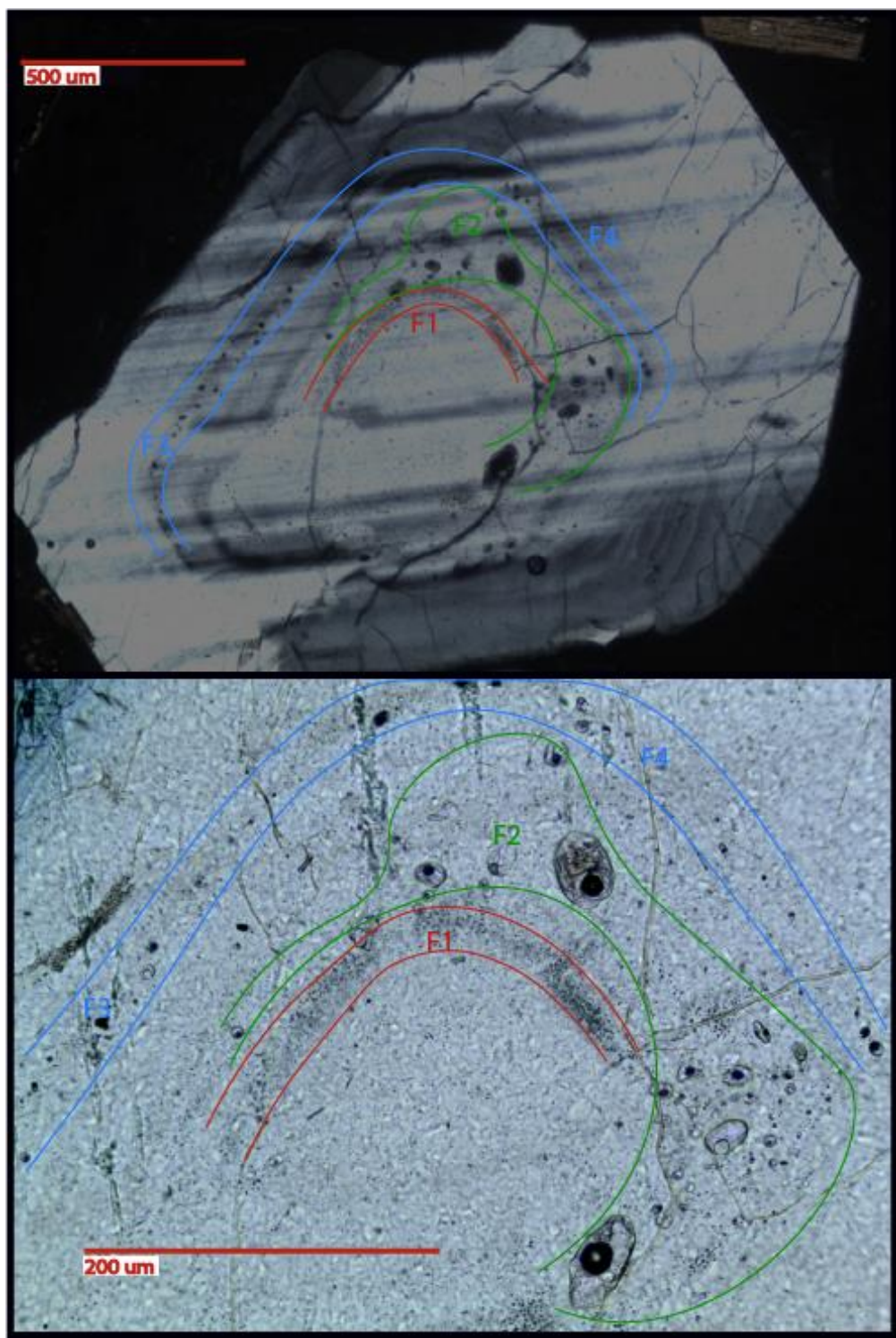


Figura 44. Arriba, cristal pC en un aumento de 5x a nícoles cruzados. Se observa la zonación concéntrica acompañada de inclusiones vítreas, además de la macla polisintética. Abajo, familias F1, F2, F3 y F4 vistas en nícoles paralelos. F1 se observa casi en cada zonación, siguiendo su forma.

#### A.1.4. CRISTAL pD

Exhibe buena integridad, pero su estructuralidad es mala (cristal anhedral). Se observa macla tipo carsbald y periclina, presentando tres bandas de zonación concéntrica y un tamaño de 1,8 mm de largo. Algunos bordes están corroídos por el vidrio de la masa fundamental (figura 45).

##### *Familias de inclusiones vítreas*

F1: De forma cuadrada de 9 por 7  $\mu\text{m}$ . Corresponde a una sola inclusión que tiene un 31% de burbuja, sin minerales (figura 45).

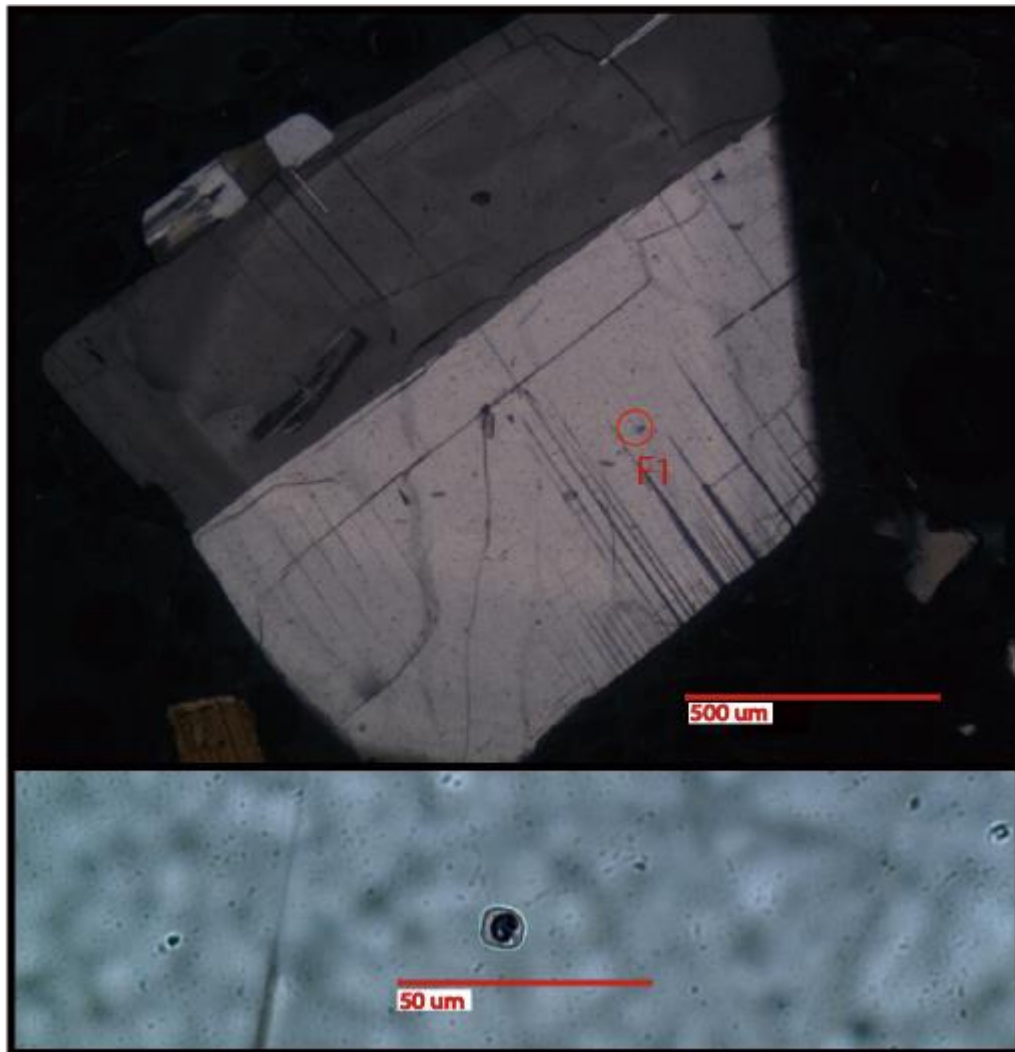


Figura 45. Arriba, cristal pD visto en un aumento de 5x a nícoles cruzados. Se observan las maclas Carsbald y periclina, junto con una leve zonación y la posición de F1. Abajo, familia F1 visto en nícoles paralelos.

### A.1.5. CRISTAL pE

Este cristal está dentro de un aglomerado de plagioclasas, donde todas tienen inclusiones. Presenta una buena estructuralidad (subhedral) e igual integridad. Se observan 3 bandas de zonación y macla polisintética. Su tamaño es de 1mm de largo (figura 46).

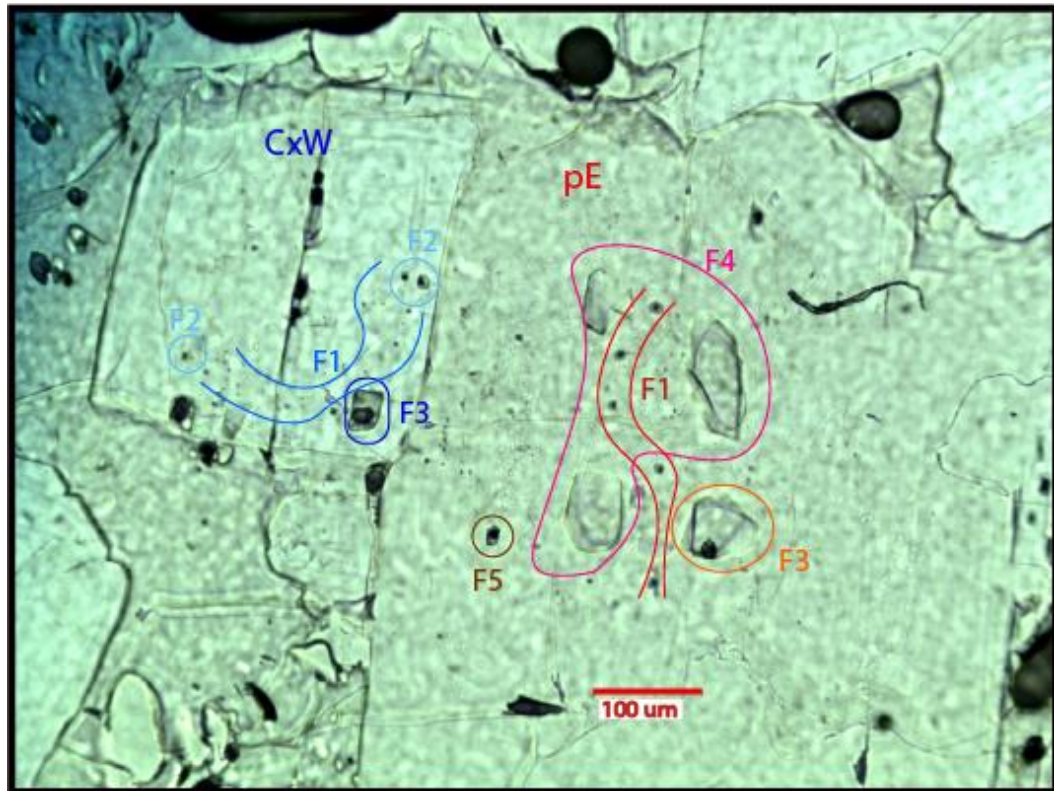


Figura 46. Cristal pE visto en nícoles paralelos con un aumento de 20x. Se observa el cristal central (pE) y el cristal CxW (cristal oeste), los cuales forman un aglomerado de plagioclasas. En ambos se indican las familias de inclusiones vítreas descritas.

#### *Familias de inclusiones vítreas*

Todas las familias se distribuyen en el centro y norte del cristal.

F1: Son cuadradas de 7 a 5  $\mu\text{m}$  de largo, con una burbuja en el centro, ocupando el 25% de cada inclusión. No se observan minerales (figura 46).

F2: Tienen un tamaño de 2  $\mu\text{m}$  y una burbuja que ocupa entre el 25 y 30% de las inclusiones (figura 46).

F3: La burbuja ocupa el 9% de la única inclusión observable, con un tamaño de 46 por 59  $\mu\text{m}$  (figura 46).



F4: Tres inclusiones de entre 50 y 100  $\mu\text{m}$  de largo y de 30 a 70  $\mu\text{m}$  de ancho. No presentan burbuja, pero son homogéneas (figura 46).

F5: Ubicada también en el borde oeste del cristal. Tiene un tamaño de 20  $\mu\text{m}$  y una burbuja correspondiente a 1/3 de cada inclusión (figura 46).

*Cristal en el borde oeste:*

F1: Tamaño de 2  $\mu\text{m}$  con una burbuja correspondiente a 1/3 de cada inclusión (figura 46).

F2: Tamaños variables hasta 20  $\mu\text{m}$ , con la burbuja ocupando el 20% de cada una de ellas (figura 46).

F3: Mucho más grandes, llegando a medir 38 por 28  $\mu\text{m}$ . Posee una burbuja correspondiente al 24% y varios minerales tabulares traslúcidos que ocupan el 35% (figura 46).

#### A.1.6. CRISTAL pF

Este cristal se encuentra en el centro de un aglomerado de tres plagioclasas. Posee bordes íntegros a oscilatorios por el crecimiento de los otros cristales y pequeñas fracturas hacia los bordes del cristal, teniendo buena estructuralidad e integridad. Exhibe macla polisintética y un tamaño de 1,1 mm (figura 47).

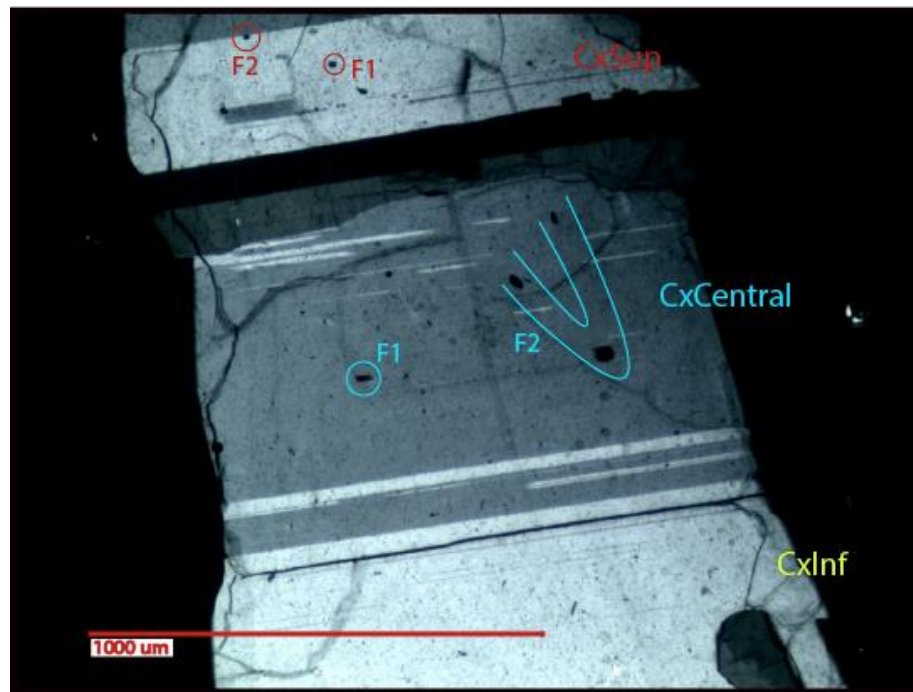


Figura 47. Cristal pF visto en nícoles cruzados con un aumento de 5x. Se observan los 3 cristales diferenciados por sus maclas y bordes oscilatorios.



## *Familias de inclusiones vítreas*

### *Cristal central*

F1: Forma alargada de 38  $\mu\text{m}$  de largo por 15  $\mu\text{m}$  de ancho, con una aglomeración de minerales opacos que ocupa un tercio de cada inclusión (figura 47 y 48b).

F2: Homogéneas, de forma tabular y dimensiones promedio de 13 por 7  $\mu\text{m}$  (figura 47).

### *Cristal superior*

F1: Tamaño de 8  $\mu\text{m}$  de largo y 6  $\mu\text{m}$  de ancho y forma alargada a lo largo de las líneas de las maclas. La burbuja ocupa el 36% de cada inclusión (figura 47 y 48c).

F2: Se observan totalmente cristalizadas con un tamaño de 10  $\mu\text{m}$  de largo por 6  $\mu\text{m}$  de ancho (figura 47 y 48c).

### *Cristal inferior*

F1: Alargada de 15  $\mu\text{m}$  de tamaño y con una burbuja correspondiente al 32 a 35% de cada inclusión (figura 48a).

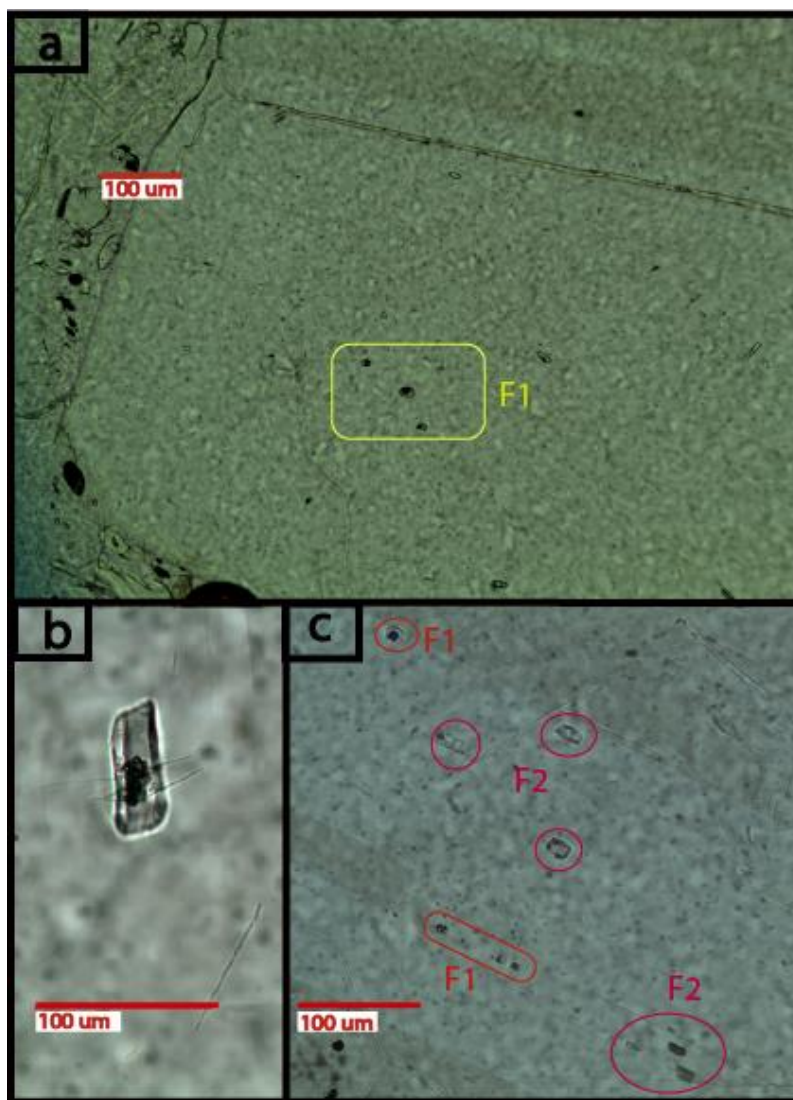


Figura 48. a) F1 en cristal inferior, CxInf, visto a n ıcoles paralelos con aumento de 10x. b) F1 en cristal central, CxCentral, en aumento de 50x a n ıcoles paralelos. Se observan minerales opacos como aglomerados. c) Familias F1 y F2 en el cristal superior, CxSup, a n ıcoles paralelos en aumento de 20x.

### A.1.7. CRISTAL pG

A n ıcoles paralelos pareciera ser un solo cristal, pero a cruzados, se observa que son dos en paragénesis. El límite entre ellos se define por la diferencia de extinción, maclas y zonaciones. Se describe el cristal de 700  $\mu\text{m}$  de tamaño, el cual se observa euهدral y con poca presencia de fracturas (figura 49).

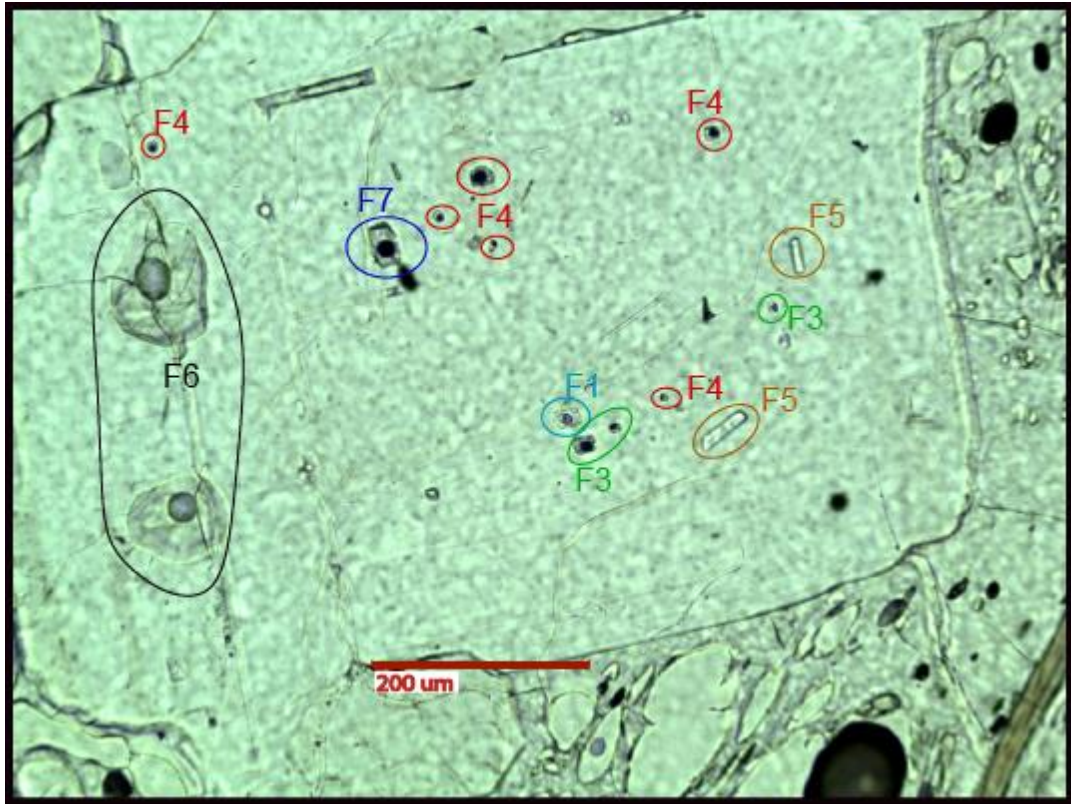


Figura 49. Cristal pG en aumento de 10x a nícoles paralelos, mostrando la ubicación de las familias.

#### *Familias de inclusiones vítreas*

F1: Tiene un tamaño de 28 por 21  $\mu\text{m}$  y una aglomeración de minerales opacos correspondientes al 17% de las inclusiones (figura 49).

F2: Forma tabular de 7  $\mu\text{m}$  de largo, donde la misma aglomeración de minerales opacos de F1 ocupa, ahora 1/3 de cada inclusión (figura 49).

F3: Tamaños entre 10 a 20  $\mu\text{m}$ , con una burbuja que corresponde al 25% de cada inclusión (figura 49).

F4: Tamaños entre 4 y 40  $\mu\text{m}$ , con una burbuja ocupando el 50% de las inclusiones (figura 49).

F5: Inclusiones tabulares y homogéneas, sin burbuja, ubicadas en la parte este del cristal. Su tamaño es de 50 a 40  $\mu\text{m}$  de largo y 10  $\mu\text{m}$  de ancho (figura 49).

F6: Mucho más grandes que las anteriores, de 100  $\mu\text{m}$  de largo. Se observa el espacio dejado por una burbuja correspondiente 1/6 de la inclusión, debido a que la atraviesa una fractura, por lo que no puede ser utilizada para los análisis venideros (figura 49).

F7: Ubicadas al este de F6, se componen de un 20% de burbuja, estando cristalizado el resto de la inclusión. Sus tamaños van entre 20 y 40  $\mu\text{m}$  de largo y 30 y 20  $\mu\text{m}$  de ancho (figura 49).

#### A.1.8. CRISTAL pH

Exhibe buena estructuralidad e integridad dentro de un aglomerado de plagioclasas más pequeñas, siendo éste, el más grande con 2mm de largo. Se encuentra levemente zonada y con bordes carcomidos por la masa fundamental (figura 50).

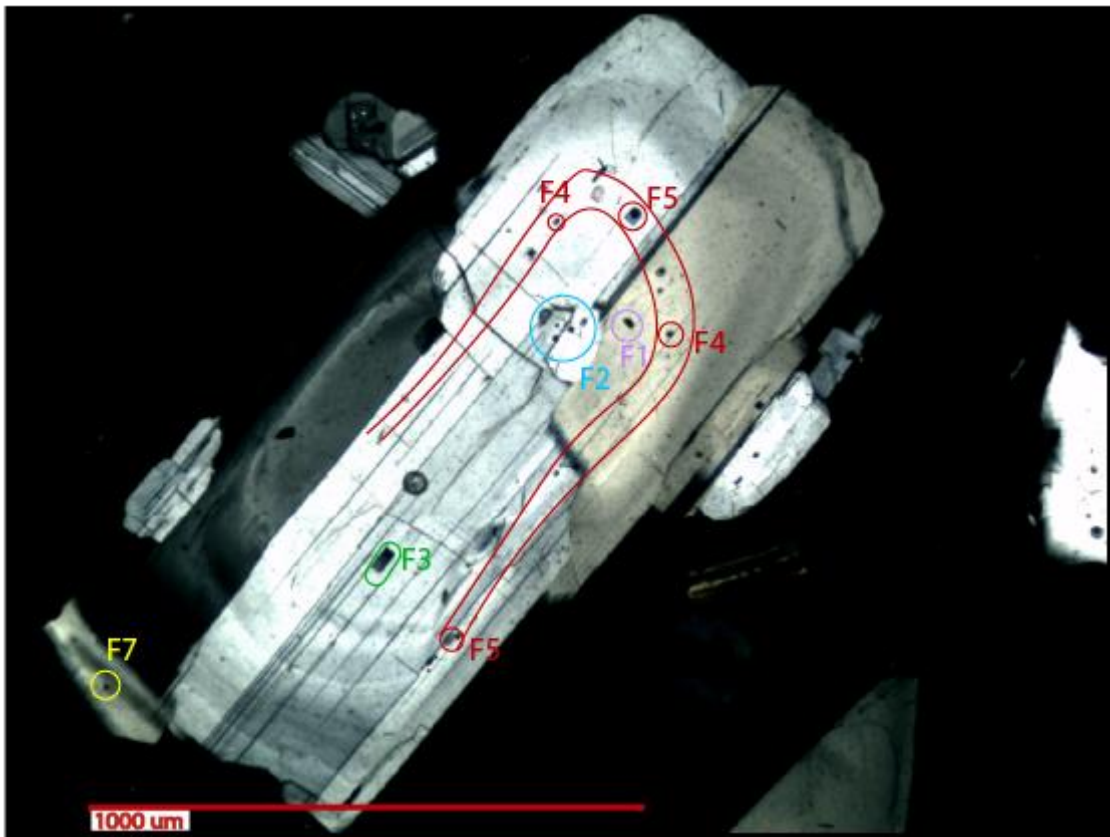


Figura 50. Cristal pH visto en nícoles cruzados en aumento de 5x, mostrando la posición de las familias.

#### *Familias de inclusiones vítreas*

Todas las inclusiones son alargadas siguiendo la forma del cristal, sus zonaciones y la orientación de las maclas (figura 50 y 51).

F1: En la parte centro superior del cristal, con una burbuja que corresponde al 25% de cada inclusión. Se observa cristalizada y con un tamaño de 20  $\mu\text{m}$  (figura 50 y 51).



F2: Tamaños entre 10 a 15  $\mu\text{m}$ , ubicadas en el mismo lugar que F1, pero la burbuja corresponde al 50% de cada inclusión (figura 50 y 51).

F3: Dos inclusiones de forma tabular, con una burbuja que corresponde al 25 a 29% de éstas y el resto, cristalizado de forma tabular (figura 50 y 51).

F4: Ubicadas en una banda de zonación llegando a borde del cristal. Miden 2  $\mu\text{m}$ , con una burbuja que ocupa el 25% (figura 50 y 51).

F5: Se encuentran en la misma zonación que F4, pero en otro plano. Tienen una burbuja que corresponde al 50% y un tamaño de 20  $\mu\text{m}$  (figura 50 y 51).

F7: Ubicadas en el borde inferior, con un tamaño aproximado de 15  $\mu\text{m}$  y una burbuja correspondiente a 1/3 de cada inclusión (figura 50 y 51).

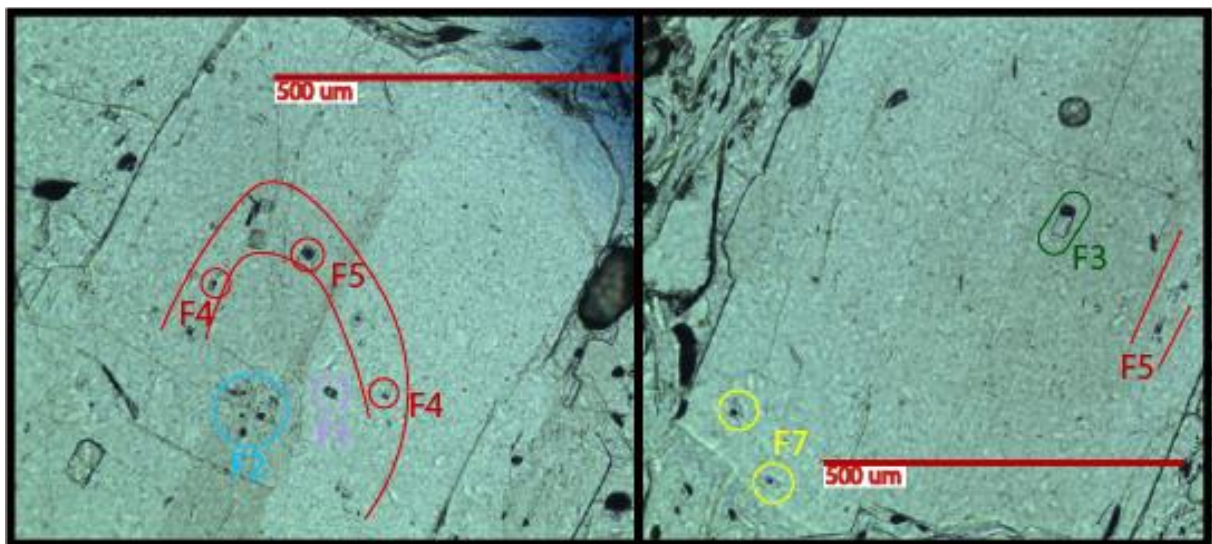


Figura 51. Cristal pH en aumento de 10x. A la izquierda se observa la parte superior y a la derecha, la parte inferior siguiendo la orientación de la imagen anterior. En ambas se indican las familias de inclusiones vítreas descritas.

#### A.1.9. CRISTAL pl

Cristal mayor de un aglomerado con muy buena estructuralidad, de forma tabular con cristales menores de plagioclasas que nuclearon heterogéneamente. Uno de ellos presenta textura *sieve* y los otros, crecieron a partir de la estructura interna del cristal mayor, presentando la misma extinción y continuidad de maclas (policarsbald). Presenta zonación concéntrica (figura 52).

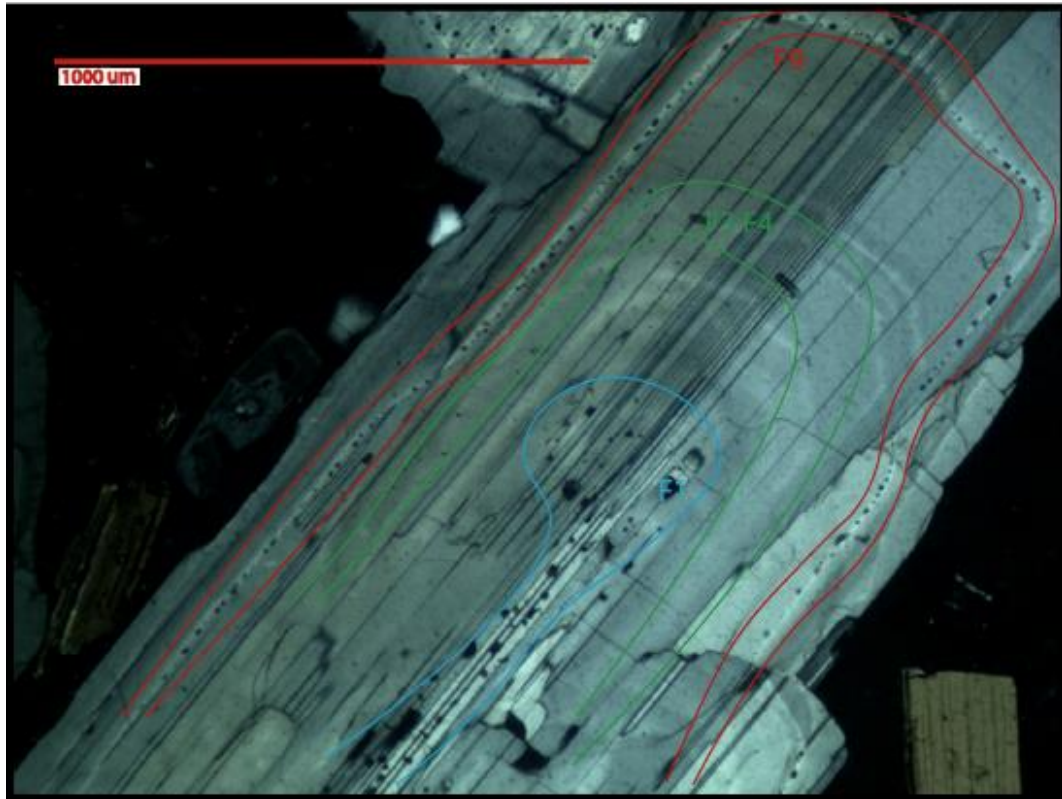


Figura 52. Cristal pl en un aumento de 5x a nícoles cruzados. Debido al tamaño del cristal y el campo de visión de la cámara, no se muestra completo. Se observan las zonaciones y las inclusiones que crecieron a partir de ellas.

### *Familias de inclusiones vítreas*

F1: Alineadas a través del eje C al centro del cristal (figura 52 y 53c)

F1.1: Se componen de una burbuja que ocupa 1/3 de las inclusiones y no tienen minerales, sin embargo, el vidrio se cristalizó. Su radio varía entre 2 y 4  $\mu\text{m}$ .

F1.2: Poseen una burbuja correspondiente al 22 a 25% de las inclusiones, también tiene vidrio cristalizado y un tamaño entre 2 por 2 a 5 por 3  $\mu\text{m}$ .

F1.3: Poseen una burbuja ocupando el 38% de las inclusiones, sin presentar minerales extras, solo vidrio cristalizado. Sus tamaños varían entre 3 por 4 y 2 por 2  $\mu\text{m}$ .

F1.4: Se compone de una burbuja y un mineral traslúcido tabular que corresponden 1/3 y un 25% de las inclusiones. Su tamaño es de 4 por 3  $\mu\text{m}$ .

F1.5: Es una inclusión única con un mineral tabular verde musgo, traslúcido que ocupa el 11%, además de una burbuja correspondiente al 45%. Sus lados más largos miden 4  $\mu\text{m}$  y el más corto, 2  $\mu\text{m}$ , presentando una forma de máscara.

F1.6: Sin burbuja, pero con minerales opacos y traslúcidos correspondientes al 60 y 12% respectivamente. El vidrio restante se encuentra cristalizado. Su tamaño es de 10  $\mu\text{m}$  de largo y entre 4 y 3  $\mu\text{m}$  de ancho.

F1.7: Una inclusión con una burbuja y minerales traslúcidos tabulares correspondientes al 20 y 7% respectivamente. Su tamaño es de 4 por 4  $\mu\text{m}$ .

F1.8: Una inclusión de 2 por 2  $\mu\text{m}$  con una burbuja correspondiente al 28%. Sin minerales.

F1.9: Totalmente vítreas, sin burbujas ni minerales, con tamaños entre 3 por 3 y 15 por 18  $\mu\text{m}$ .

F1.10: Inclusión con 1/3 de mineral opaco y vidrio alterado (se ve rosáceo). Su tamaño es de 10  $\mu\text{m}$  de largo y 5  $\mu\text{m}$  en su parte más ancha.

F1.11: Burbuja y minerales traslúcidos tabulares correspondientes al 43 y 29% respectivamente. Su tamaño es de 4 por 3  $\mu\text{m}$ .

F2: Se ubican en línea, perpendicular a las maclas, en el borde de F1. Son muy pequeñas, de menos de 1  $\mu\text{m}$  y algunas presentan burbujas y otras no (figura 53c).

Las siguientes familias, F3 a F8, se ubican entre F1 y la última zonación que es dibujada por inclusiones vítreas también. Su disposición no revela un orden.

F3: Sin burbuja ni minerales. A nícoles cruzados y paralelos se ven verdosos a gris claro y traslúcidas, de forma tabular con extremos redondeados. El tamaño varía entre 60 y 72  $\mu\text{m}$  de largo y entre 15 y 18  $\mu\text{m}$  de ancho (figura 52 y 53a).

F4: Una inclusión homogénea con una burbuja correspondiente al 4%. Se ubica yuxtapuesta a una de las inclusiones de F3, con un tamaño de 3 por 3  $\mu\text{m}$  (figura 52 y 53a).

F5: Única inclusión que presenta, aparentemente, vidrio cristalizado siguiendo la forma tabular de ésta, más una burbuja correspondiente al 28%. Su tamaño es de 16 por 18  $\mu\text{m}$  (figura 52 y 53b, c).

F6: Totalmente vítreas recristalizadas, observándose de color negro con textura "manchada". El tamaño de estas inclusiones es de 14 por 28  $\mu\text{m}$  en promedio, ubicándose alrededor de F1.

F7: Burbuja es el 10%, aunque se ve con dificultad en el aumento mayor de 50x. Se observa cristalizada, con un tamaño de 16 por 18  $\mu\text{m}$ , ubicada en la parte inferior del cristal.

F8: Consisten en un mineral opaco y minerales traslúcidos, ocupando 1/3 y 13% de la inclusión, respectivamente. Se encuentra opuesta a F7 en diagonal hacia el norte del corte transparente.

F9: Se encuentran en la última zonación definida por inclusiones vítreas, hacia afuera. Todas las familias se ubican por toda esta zonación (figura 52).

F9.1: Homogéneas con una burbuja correspondiente al 40 a 42%. La inclusión más grande es de 12 por 8  $\mu\text{m}$  y la más pequeña, de 4 por 2  $\mu\text{m}$ . La mayoría tiene formas prismáticas de bordes redondeados (figura 53d).

F9.2: Homogéneas, con una burbuja que ocupa entre el 25 y 27%. La más grande es de 13 por 7  $\mu\text{m}$ , sin embargo, la mayoría no supera los 6  $\mu\text{m}$  de largo por 4  $\mu\text{m}$  de ancho.

F9.3: Contienen una burbuja correspondiente al 5 a 6%, no tiene minerales opacos, pero parecen recristalizadas. Tienen un tamaño de 7 por 6  $\mu\text{m}$  con bordes redondeados.

F9.4: No tienen burbuja, pero sí una aglomeración de minerales opacos correspondientes al 37%. Son pseudocirculares de radio 2  $\mu\text{m}$ .

F9.5: Tiene una burbuja correspondiente al 51% con lo que pareciera ser un cristal tabular traslúcido ocupando el 24% (podría ser vidrio cristalizado). Su tamaño es de 10 por 6  $\mu\text{m}$  con forma alargada y bordes redondeados.

F9.6: Se componen de una burbuja y un mineral opaco correspondientes al 15% y 29%, respectivamente. Su tamaño es de 10 por 8  $\mu\text{m}$  y son de forma alargada tabular.

F9.7: Totalmente vidrio recristalizado, viéndose como manchas negras. La más grande mide 17 por 10  $\mu\text{m}$ , pero el promedio es de 8 por 8  $\mu\text{m}$  (figura 53d).

F9.8: Homogéneas con una burbuja que ocupa entre el 32% y 34% de las inclusiones. Su tamaño promedio es de 7 por 8  $\mu\text{m}$ , donde la más grande mide 15 por 7  $\mu\text{m}$ .

F9.9: Inclusiones con un 34% de burbuja y un 37% de un mineral traslúcido. Sus tamaños son, en promedio de, 15 por 7  $\mu\text{m}$ .

F9.10: Inclusiones en menor cantidad con una burbuja correspondiente al 26% a 28% más un mineral tabular traslúcido que ocupa el 14 a 16%. Su tamaño promedio es de 7 por 8  $\mu\text{m}$ .

F9.11: Inclusiones de 11 por 7  $\mu\text{m}$ , en promedio, con una burbuja correspondiente al 35% a 36%. Parecieran tener un mineral traslúcido o simplemente es vidrio cristalizado.

F9.12: Sin burbujas y con un 14% a 15% de minerales opacos aglomerados. Su tamaño es de 17 por 10  $\mu\text{m}$  en promedio.

F9.13: Homogéneas con una burbuja entre el 44% y 45% y tamaños de 10 por 7  $\mu\text{m}$ .

F9.14: Homogéneas con una burbuja entre el 50% y 52% y un tamaño de 7 por 9  $\mu\text{m}$  en promedio.

F9.15: Inclusiones con una aglomeración de minerales opacos que llega al 20% con el resto de la inclusión, aparentemente, recristalizada. Tienen un tamaño de 12 por 7  $\mu\text{m}$ .

F9.16: Homogéneas, de 6 por 6  $\mu\text{m}$  y una burbuja correspondiente al 55%.



F9.17: Inclusiones aparentemente homogéneas con una burbuja correspondiente al 20% con tamaños variados, siendo de 8 por 7  $\mu\text{m}$  la más pequeña y de 30 por 6  $\mu\text{m}$  y 13 por 11  $\mu\text{m}$  las más grandes (figura 53d).

F9.18: Homogénea con una burbuja correspondiente al 60% y un tamaño de 6 por 4  $\mu\text{m}$ .

F9.19: Inclusiones con un 44% de burbuja y 18% de mineral traslúcido, de 12 por 7  $\mu\text{m}$ .

F9.20: Inclusión con un 30% de burbuja y 15% de minerales opacos y un tamaño de 14 por 10  $\mu\text{m}$ .

F9.21: Inclusión con minerales opacos ocupando el 35% y un tamaño de 11 por 8  $\mu\text{m}$ .

Las siguientes familias se encuentran fuera de la zonación anterior hasta llegar al borde del cristal.

F10: Presenta un 20% de burbuja y un tamaño de 25 por 25  $\mu\text{m}$ , siendo hexagonal. Se encuentra en la parte sur del cristal (figura 53f).

F11: Justo al norte de F10 y sur de F15, es homogénea, con un 31% de burbuja y un tamaño de 6 por 5  $\mu\text{m}$ . y una más grande de 31 por 13  $\mu\text{m}$  (figura 53e, f).

F12: Se ubican al este de F10, mostrando una burbuja que ocupa entre el 27% y 28%. Tienen forma de óvalos alargados de 15 por 4  $\mu\text{m}$  y 16 por 17  $\mu\text{m}$  (figura 53e, f).

F13: Tiene la misma forma que F12 y se ubica al suroeste de ésta, pero la burbuja corresponde solo al 8% de la inclusión. Su tamaño es de 17 por 6  $\mu\text{m}$ .

F14: Se encuentra al este de F13, es homogénea con una burbuja ocupando el 42% y un tamaño de 6 por 5  $\mu\text{m}$  y de 8 por 3  $\mu\text{m}$  (figura 53f).

F15: Son tres inclusiones de 30 por 15  $\mu\text{m}$  aproximadamente con una burbuja correspondiente al 15% (figura 53e).

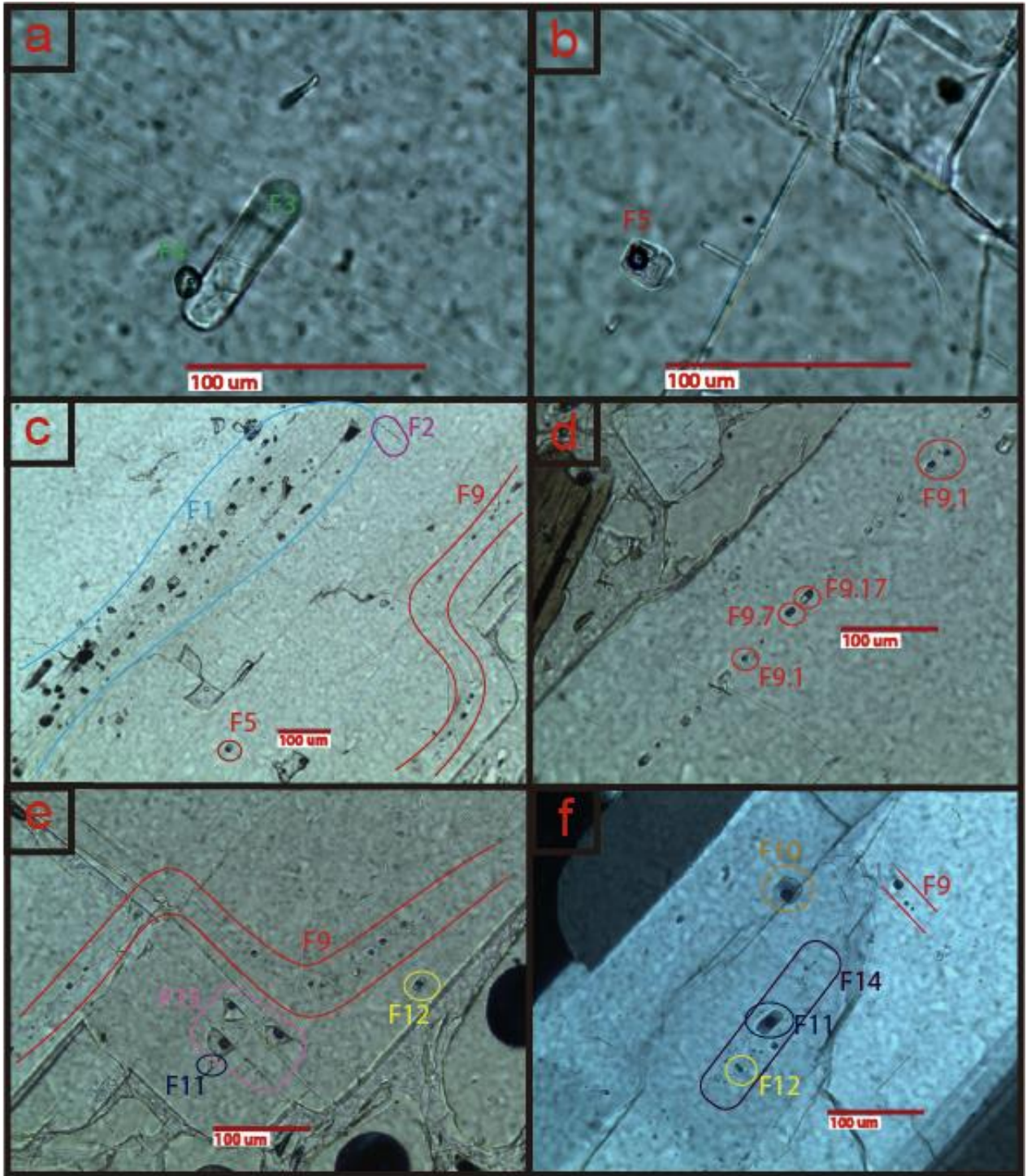


Figura 53. Cristal pl en nı́coles paralelos. a) Familias F3 y F4. b) F5 que tambien se observa en c), entre F1 y F9 y al norte de F2. d) Subfamilias de F9. e) EN el borde inferior este del cristal se observa la continuacion de F9 y las familias F15, F12 y F11. f) Hacia mas el borde del cristal, fuera de F9, F10, F11, F12 y F14.

### A.1.10. CRISTAL pJ

Cristal de estructuralidad e integridad buena, exhibiendo una zonación concéntrica intensa. Su tamaño es de 1,5 mm (figura 54).

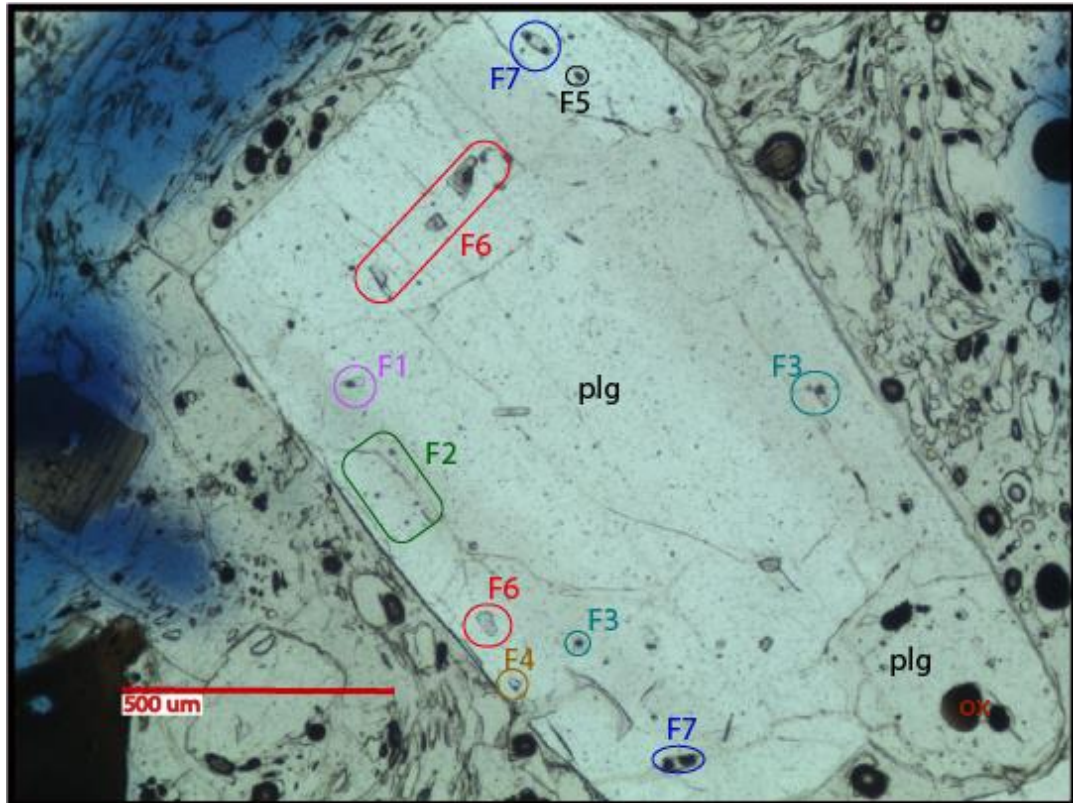


Figura 54. Cristal pJ visto en un aumento de 5x a nícoles paralelos. Se observa que en la parte inferior derecha hay otro cristal de plagioclasa, el cual no fue descrito. Además, se indican las familias de inclusiones vítreas descritas.

#### *Familias de inclusiones vítreas*

F1: Sólo es una inclusión de 50  $\mu\text{m}$ , con una burbuja correspondiente al 40%. Pareciera observarse un pequeño cristal (figura 54).

F2: Sus tamaños varían entre 6 y 16  $\mu\text{m}$ , con una burbuja que ocupa el 50% de cada inclusión (figura 54).

F3: Ubicadas en el borde, tienen un tamaño de 50  $\mu\text{m}$  y una burbuja correspondiente a 1/3 (figura 54).

F4: Ubicadas, también en los bordes, con un tamaño de 30  $\mu\text{m}$  y una burbuja que ocupa 15% de cada inclusión (figura 54).

F5: En el borde del cristal y totalmente vítreas. Su tamaño varía entre 50 y 100  $\mu\text{m}$  (figura 54).

F6: Inclusiones totalmente homogéneas de 30  $\mu\text{m}$  de largo promedio por 20  $\mu\text{m}$  de ancho (figura 54).

F7: Se ubican en esquinas opuestas del cristal; superior derecha e inferior izquierda. Miden 0,2 mm de largo, con forma alargada, y poseen dos burbujas que ocupan el 24% y 52%. De esta forma, podrían ser familias distintas (figura 54).

#### A.1.11. CRISTAL qC

Es uno de los pocos cristales que presenta bordes prismáticos bien conservados, presentando buena estructuralidad. Su integridad también es buena, exhibiendo fracturas menores. Su tamaño es de 311 por 635  $\mu\text{m}$ . Sin embargo, luego de medir su composición relativa en SEM, se determinó que el cristal corresponde a una **plagioclasa** (figura 70).

##### *Familias de inclusiones vítreas*

F1: Poseen una burbuja correspondiente al 20% y un tamaño de 5 por 4  $\mu\text{m}$  y 4 por 3  $\mu\text{m}$ . Una se observa cristalizada y la otra no (figura 55).

F2: Numerosas y ubicadas en todo el cristal. Se observan totalmente cristalizadas y algunas con burbujas correspondientes a menos de 1% de las inclusiones. Tienen forma alargada, de 7 por 1  $\mu\text{m}$  y se encuentran sin orientación (figura 55).



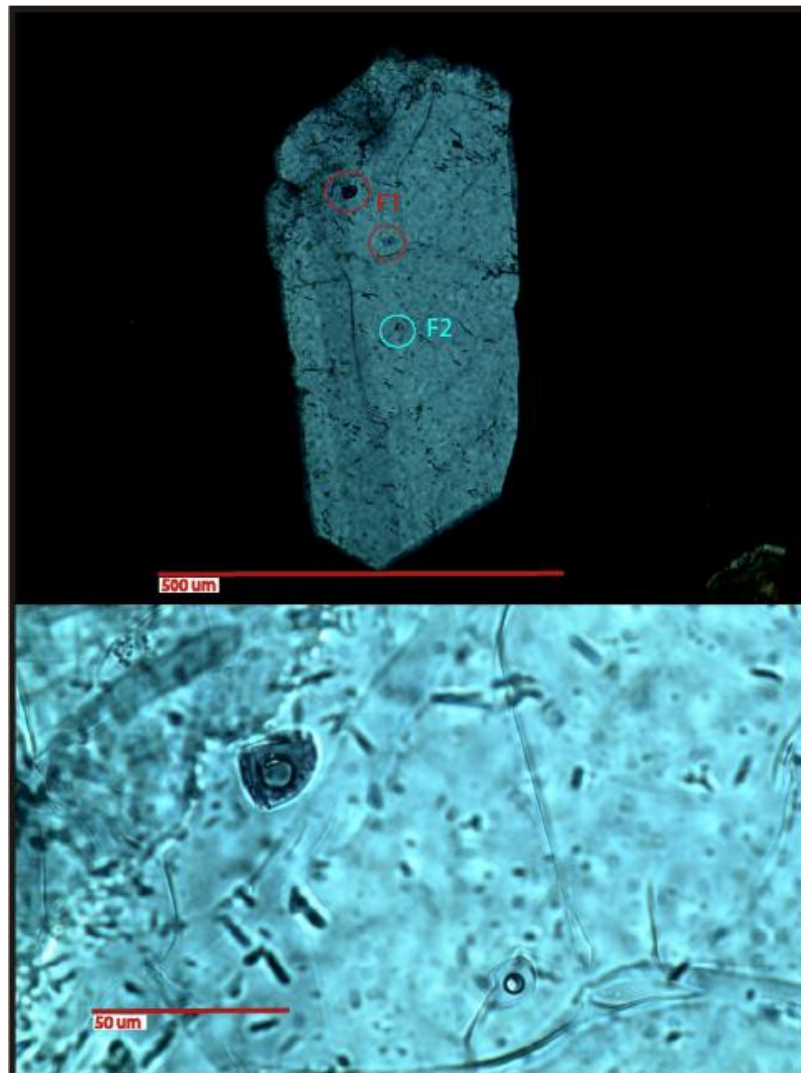


Figura 55. Arriba, cristal qC visto en aumento de 10x a nícoles cruzados. Se observan sus bordes rectos e integridad buena. Abajo, F1 de la imagen superior, pero en un aumento de 50x y a nícoles paralelos.

## A.2. ANFÍBOL

### A.2.1. CRISTAL Aa

Cristal ehedral prismático típico de un anfíbol, de ángulos de  $60^\circ$  y  $120^\circ$ , con un clivaje muy marcado. Posee tres inclusiones opacas mayores (óxidos de hierro), de 87, 40 y  $20 \mu\text{m}$  de radio. En la parte inferior del óxido de hierro más grande se observa que la masa fundamental ha entrado al cristal por disolución, mostrando también, bordes carcomidos por ésta. Además, presenta inclusiones de biotita y hematita. El tamaño del

crystal es de 1220 por 605  $\mu\text{m}$  en sus longitudes máximas y mínimas (figura 56). Exhibe una macla que pasa por el medio del cristal a lo largo de éste.

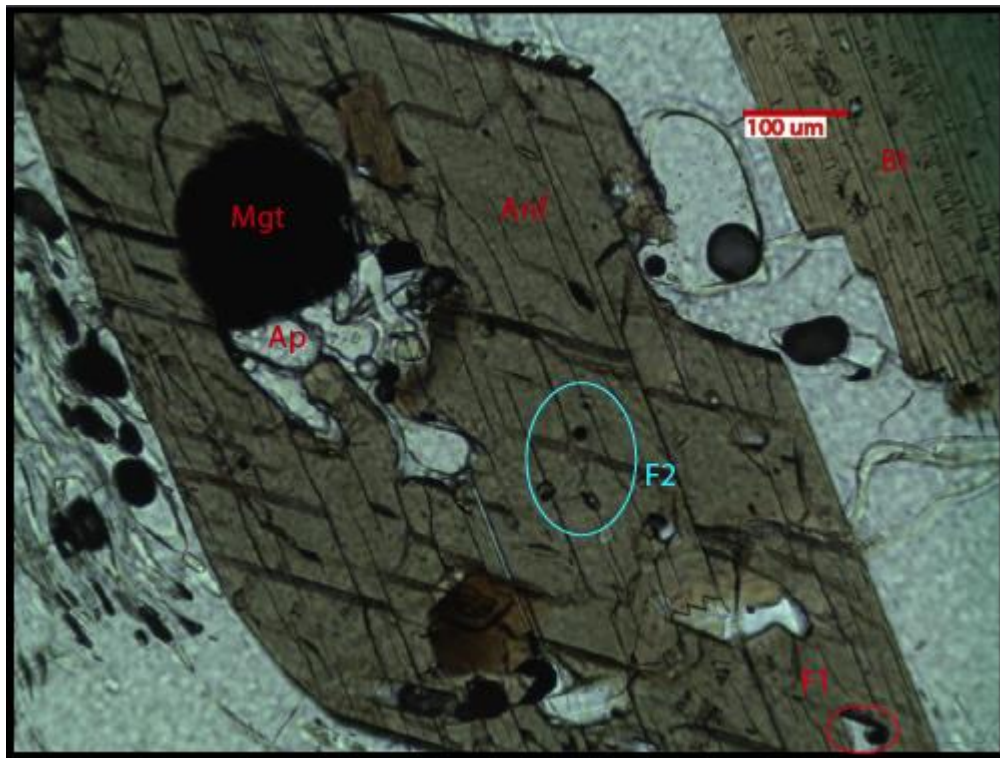


Figura 56. Cristal aA visto en aumento de 10x a nícoles paralelos. El cristal de la derecha es una biotita.

#### *Familias de inclusiones vítreas*

F1: Inclusión en forma cónica, siguiendo el clivaje, ubicada en la parte inferior del cristal. Tiene un tamaño de 60  $\mu\text{m}$  y una burbuja que ocupa el 25% de ésta. Posee un cristal muy pequeño, adyacente a la burbuja, de 37 por 31  $\mu\text{m}$  (figura 56 y 57).

F2: Más pequeñas que la familia anterior, de 15  $\mu\text{m}$ , con una burbuja que corresponde al 15%, ubicadas al este del cristal, hacia la parte con borde de descomposición (figura 56 y 57).

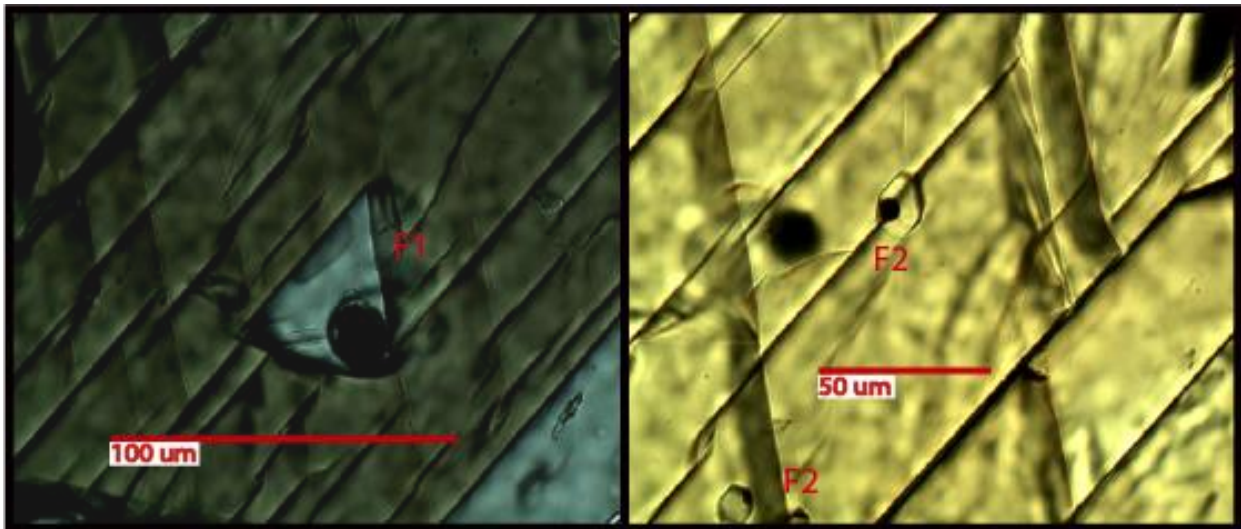


Figura 57 F1 vista a nicoles paralelos. Se observa la forma en triángulo debido al clivaje del cristal. F2 vista en nicoles paralelos.

F3: Son sólo 2 inclusiones ubicadas bajo el óxido de hierro de menor tamaño. Sus dimensiones son de 2  $\mu\text{m}$  con una burbuja correspondiente al 25%. Su tamaño menor a 3  $\mu\text{m}$  impide que esta familia pueda ser analizada.

F4: Son 2 inclusiones ubicadas en las puntas verticales (a lo ancho del cristal) con una burbuja correspondiente al 10%. Tienen forma hexagonal y un tamaño de 2  $\mu\text{m}$ , por lo que no es posible su análisis.

F5: Inclusión con 1/3 de óxido de hierro, con un tamaño de 20  $\mu\text{m}$ .

#### A.2.2. CRISTAL aB

Cristal de integridad y estructuralidad buenas, con bordes de descomposición a causa de la masa fundamental vítrea. Presenta inclusiones opacas de óxidos de hierro y macla diagonal y su tamaño es de 506 por 279  $\mu\text{m}$  (figura 58).



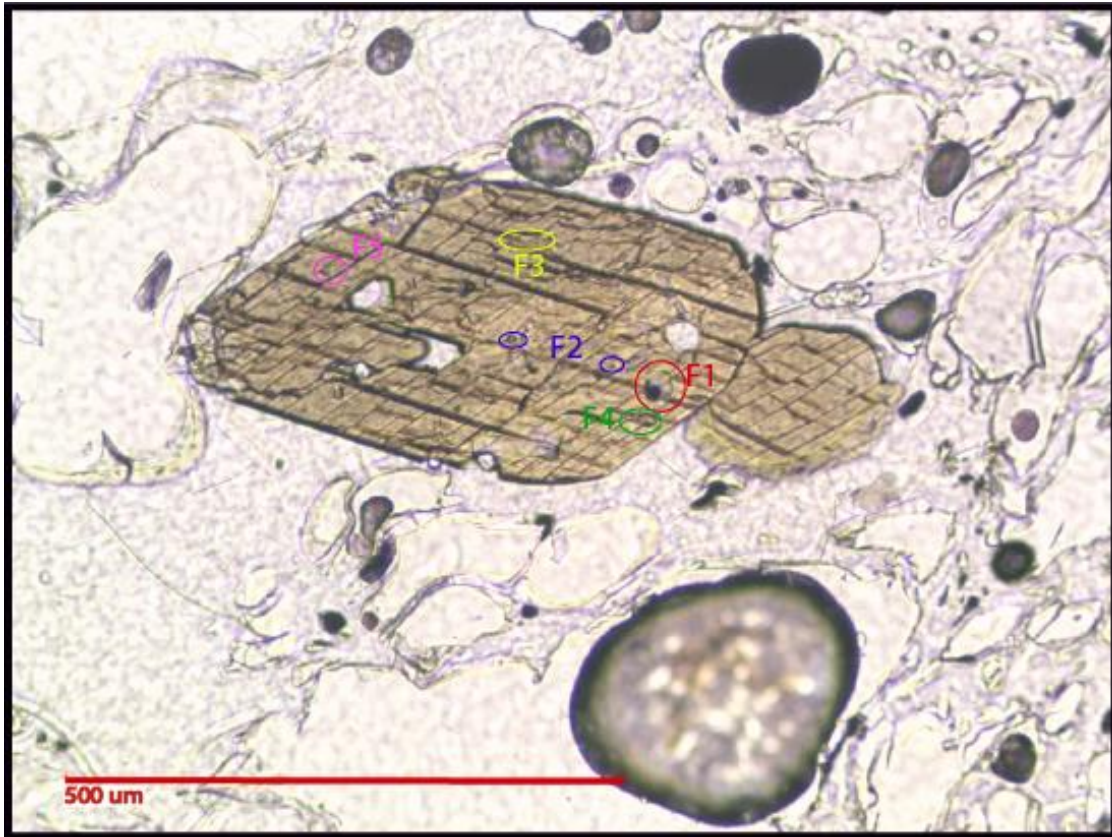


Figura 58. Cristal aB visto en n ocoles paralelos con aumento de 10x. Presenta un marcado clivaje y un borde de reacci on con otro cristal de anfíbol.

#### *Familias de inclusiones vítreas*

F1: Se compone de una sola inclusión, la cual es la más grande de todo el cristal. Tiene una burbuja correspondiente al 20% y un tamaño de 38 por 21  $\mu\text{m}$  (figura 58).

F2: Inclusión rectangular de 9 por 4  $\mu\text{m}$  y una burbuja correspondiente al 30% (figura 58).

F3: Posee una burbuja que ocupa entre el 5% y 15% de las inclusiones, la cuales tienen tamaños de 4 por 3  $\mu\text{m}$ , por lo que no son útiles para este estudio. Se ubican por todo lo ancho del cristal, al oeste de la inclusión F1 (figura 58).

F4: Se ubica al oeste de la inclusión más grande (F1), con un tamaño de 13 por 16  $\mu\text{m}$ . Se compone de una burbuja (15%) y un cristal traslúcido (40%) (figura 58).

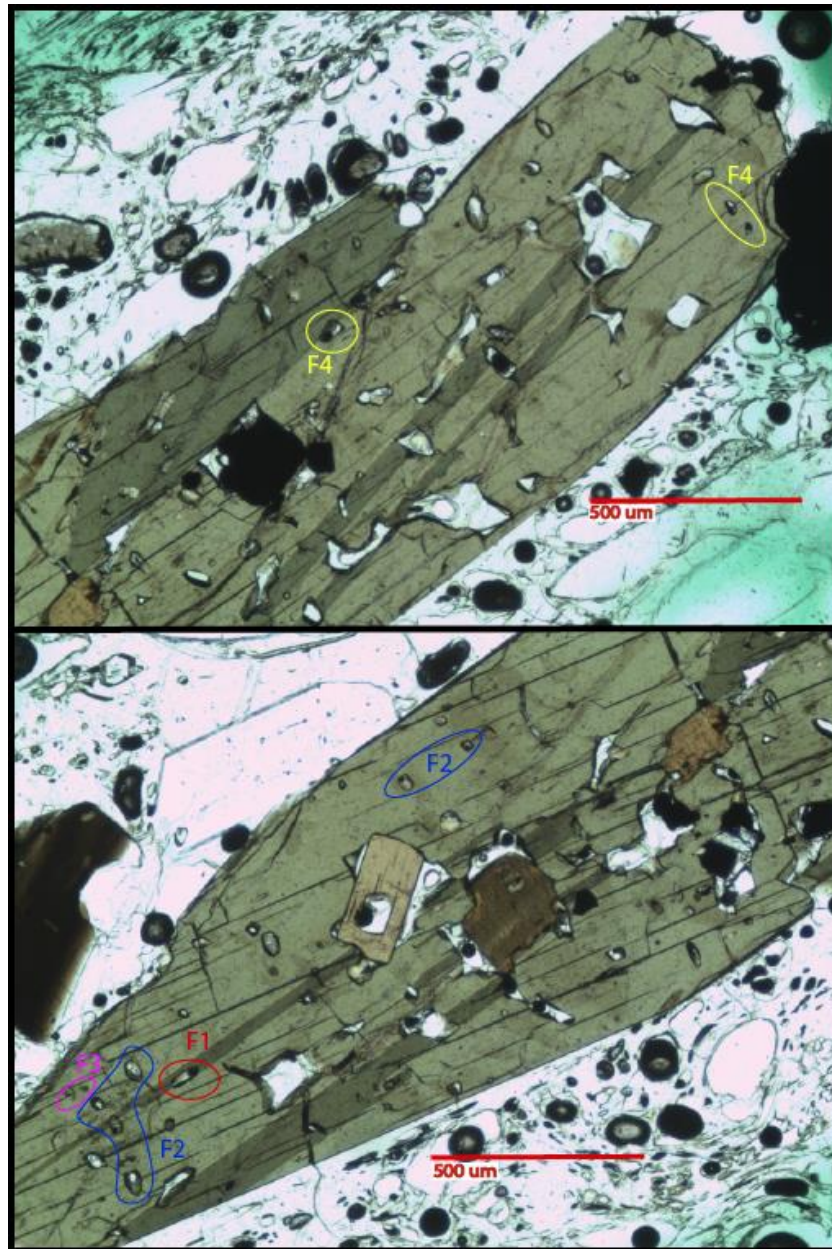
F5: Ubicada en el extremo oeste, se compone de dos burbujas correspondientes al 30%. Su forma sigue el clivaje y tiene un tamaño de 4 por 2  $\mu\text{m}$ , por lo que no es útil para este estudio (figura 58).

F6: Variadas inclusiones menores que no se distinguen en el aumento máximo disponible (50x), con tamaños de 2 a 3  $\mu\text{m}$  (figura 58).



### A.2.3. CRISTAL aC

Cristal prismático alargado, con óxidos de hierro y biotitas a modo de inclusiones y con dimensiones de 4 mm de largo por 1 mm en su parte más ancha. Exhibe maclas diagonales y bordes de descomposición con óxidos de hierro en su parte superior (figura 59). Presenta un gran número de inclusiones vítreas aptas para este análisis y también, con signos de fugas tipo reloj de arena.



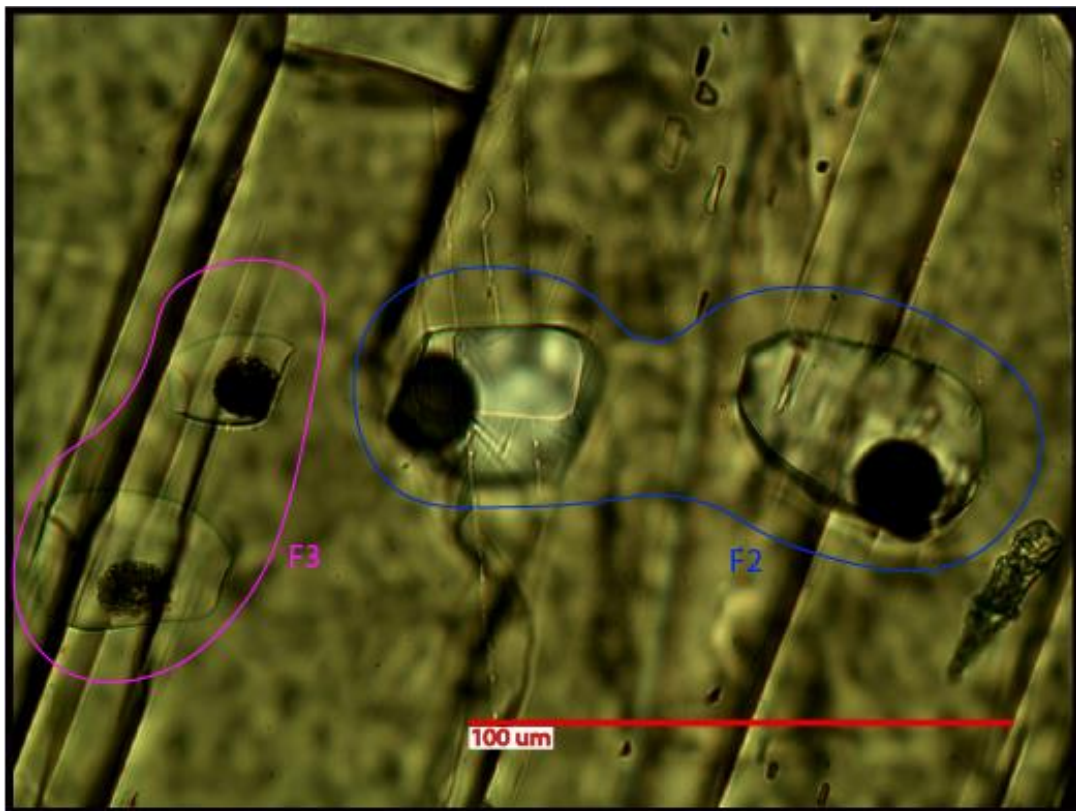
*Figura 59. Cristal aC visto en nícoles paralelos con un aumento de 5x. la imagen superior corresponde al extremo más ancho del cristal (su hábito es acicular) y la imagen inferior es la continuación. Se observan las inclusiones de biotita y óxidos de hierro, junto con descomposición del mineral por la masa fundamental.*

### *Familias de inclusiones vítreas*

F1: La burbuja ocupa el 30% de las inclusiones, las cuales tienen un tamaño entre 36 y 41  $\mu\text{m}$  en el lado más largo y entre 20 y 41  $\mu\text{m}$  en el lado más corto. Se ubican al lado este del cristal.

F2: Ubicadas en la parte central hacia el oeste del cristal, poseen un 20% de burbuja y tamaño variable entre 12 y 75  $\mu\text{m}$  de largo y, 9 y 31  $\mu\text{m}$  de ancho (figura 59 y 60).

F3: Inclusiones que presentan un 15% de minerales opacos como aglomerados circulares. Sus tamaños son de 35 por 24 y 49 por 27  $\mu\text{m}$  (figura 59 y 60).



*Figura 60. F2 F3 a nícoles paralelos, vistas a 50x. Corresponden al mismo lugar de las familias en la figura anterior.*

F4: Se encuentra hacia la parte superior del cristal, con una burbuja ocupando el 30%. Su tamaño es de 30 por 18  $\mu\text{m}$  aproximadamente (figura 59).

F5: Se ubica en la parte central oeste del cristal, tiene una burbuja que ocupa el 15% de la inclusión, la cual tiene un tamaño de 32 por 27  $\mu\text{m}$ . Se ven 3 cristales de vidrio.

F6: Tiene un tamaño de 28 por 18  $\mu\text{m}$  y se compone de un 10% de burbuja y 8% de cristales traslúcidos.



F7: Una inclusión ubicada en la parte noroeste del cristal que tiene un tamaño de 74  $\mu\text{m}$  de largo por 50  $\mu\text{m}$  de ancho. Se compone de un 10% de burbuja y un 15% de minerales opacos.

F8: Posee una burbuja que ocupa el 10% más minerales opacos de forma purulenta ocupando el 33%. Su tamaño es de 49 por 42  $\mu\text{m}$ .

F9: Inclusiones totalmente homogéneas de 50 por 36  $\mu\text{m}$  ubicadas en los bordes del cristal.

#### A.2.4. CRISTAL aD

Se presenta en un aglomerado de plagioclasa, óxidos de hierro y biotita. Su integridad y estructuralidad son regulares, presentando fracturas profundas. Sus dimensiones son 335  $\mu\text{m}$  de largo por 67  $\mu\text{m}$  de ancho (figura 61).

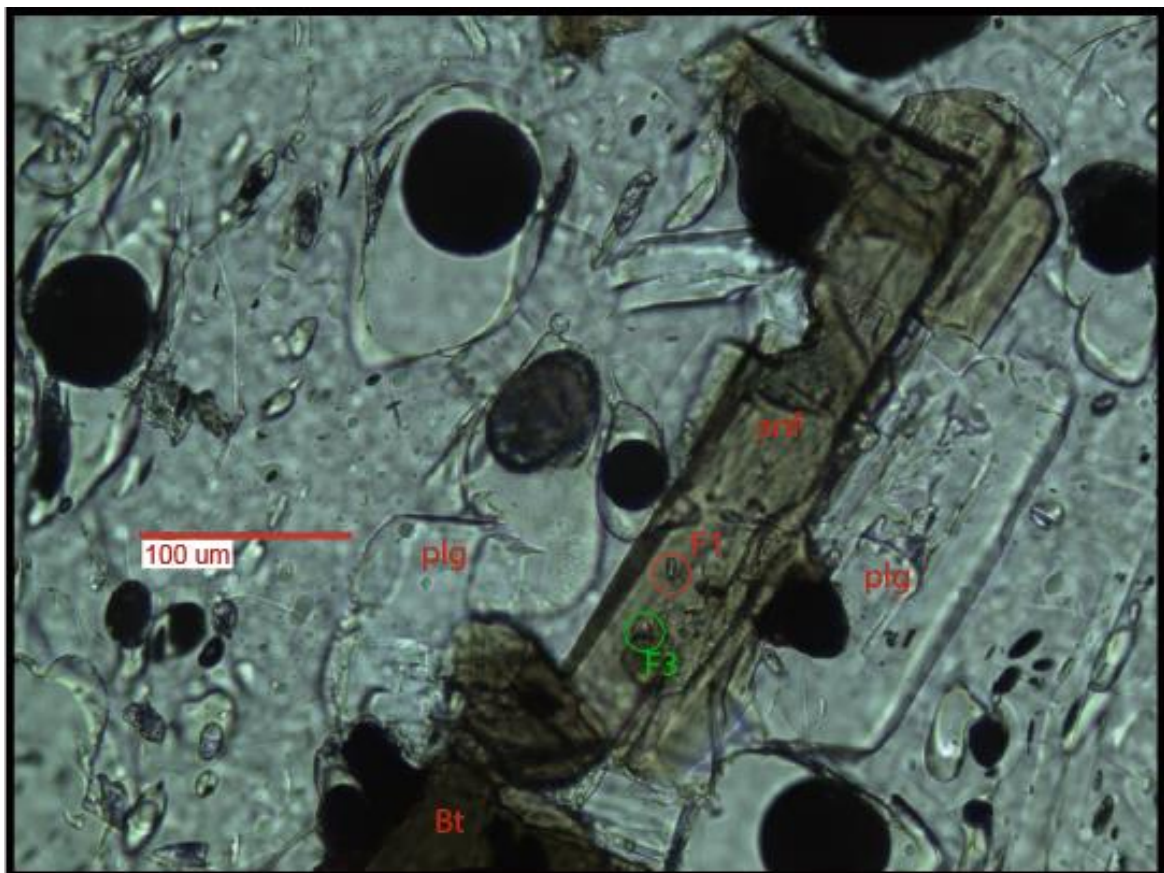


Figura 61. Cristal aD visto en aumento de 20x a nícoles cruzados. Se observa el aglomerado donde aD se ubica en la parte derecha sobre la plagioclasa.

### *Familias de inclusiones vítreas*

F1: Forma rectangular de 9 por 4  $\mu\text{m}$  y una burbuja correspondiente al 15% (figura 61 y 62).

F2: Numerosas y alineadas, de forma tabular de 1  $\mu\text{m}$  a 4  $\mu\text{m}$  de largo. Algunas presentan burbuja y en otras no se identifica nada claro debido a su pequeño tamaño, lo que las hace no aptas para el estudio (figura 62).

F3: Inclusión de forma triangular con una burbuja correspondiente al 4%, homogénea. Su tamaño es de 10  $\mu\text{m}$ , en su parte más larga, por 9  $\mu\text{m}$  en su parte más ancha. Se ubica al oeste de F1 en la parte inferior del cristal (figura 61 y 62).

F4: Es de forma circular con radio de 4  $\mu\text{m}$  y tiene una burbuja que ocupa el 40% de la inclusión.

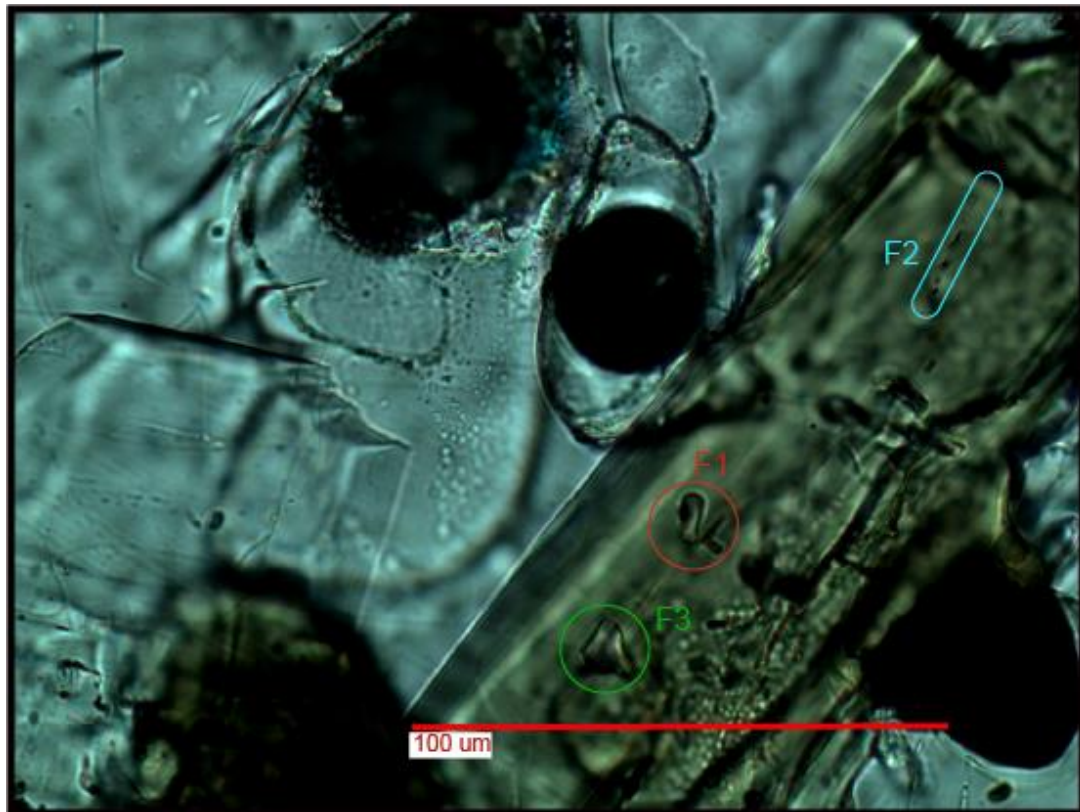


Figura 62. F1 F2 y F3 visto en nicoles paralelos, en aumento de 50x.

#### A.2.5. CRISTAL aE

Cristal de estructuralidad mala e integridad buena, de 605  $\mu\text{m}$  de largo por 396  $\mu\text{m}$  de ancho y se ubica en la parte inferior del corte transparente (figura 63).

Presenta una macla a lo largo y unas más pequeñas y alargadas, marrón oscuro, completando el ángulo del clivaje e inclusiones de óxidos de hierro.

#### *Familias de inclusiones vítreas*

F1: Inclusiones con una burbuja correspondiente al 10%, sin opacos y con tamaños de 9 por 9  $\mu\text{m}$  y 41 por 21  $\mu\text{m}$ . Se disponen en la parte más ancha del cristal a lados opuestos (figura 63).

F2: Tres inclusiones adyacentes ubicadas en la parte norte de cristal con tamaños de 12 por 8  $\mu\text{m}$ , 14 por 11  $\mu\text{m}$  y 5 por 4  $\mu\text{m}$ . Poseen una burbuja que ocupa el 5% (figura 63).

F3: Son pequeñas en comparación a las familias anteriores, de 7 a 4  $\mu\text{m}$  de largo por 3 a 2  $\mu\text{m}$  de ancho. Tienen una burbuja correspondiente al 50% (figura 63).



Figura 63. Cristal aE visto en nícoles paralelos en aumento de 20x. Se observan las maclas pequeñas alargadas y algunas de las inclusiones vítreas más grandes.



## A.2.6. CRISTAL aF

Cristal ehuedral de integridad media de 3 mm de largo por 1,1 mm de ancho. Presenta embahiamientos, bordes de reacción de biotita ehuedral y de descomposición debido a la masa fundamental, además de inclusiones opacas de óxidos de hierro importantes y un cristal de circón en el borde sureste (figura 64).

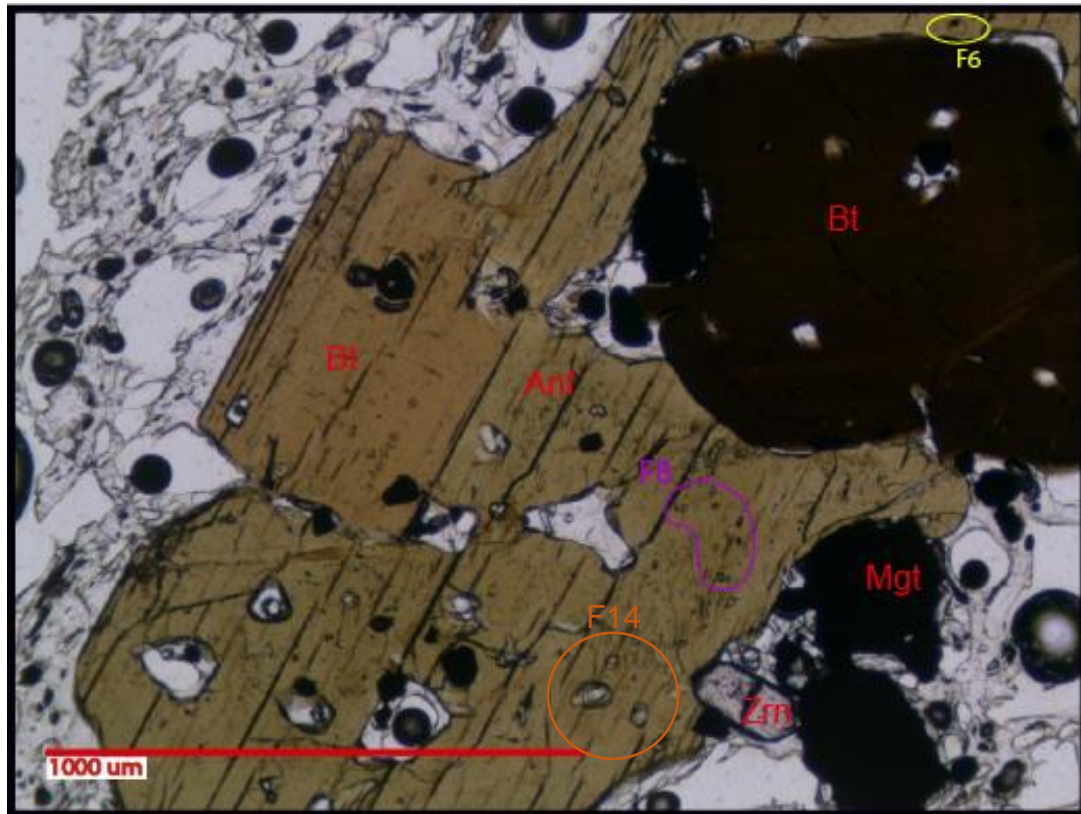


Figura 64. Cristal aF en nícoles paralelos a 5x. Se puede observar un cristal de biotita creciendo en borde de reacción al lado oeste y un gran cristal anhedral del mismo mineral más al centro del cristal. Bajo éste, en el borde del cristal de anfíbol, se observa un circón de color rosa pálido y forma prismática.

### *Familia de inclusiones vítreas*

F1: Inclusiones muy pequeñas y numerosas, de 2 a 10  $\mu\text{m}$  de tamaño. Son alargadas y se encuentran orientadas de forma oblicua por todo el cristal. Contienen una burbuja que ocupa el 10%.

F2: Presentan una burbuja correspondiente al 5% y un tamaño de 17  $\mu\text{m}$  de largo, siendo elongadas y orientadas (figura 65).

F3: Ubicadas sobre la biotita central, tienen un tamaño de 2 a 12  $\mu\text{m}$ , siendo totalmente vítreas. También se orientan de forma oblicua respecto al cristal (figura 65).

F4: Presentan una burbuja que ocupa el 20% y un cristal traslúcido y tabular correspondiente al 24%. Son redondeadas con tamaños de 30 por 36  $\mu\text{m}$  (figura 65).

F5: Tienen sólo una burbuja que ocupa el 15% y un tamaño de 18 por 11  $\mu\text{m}$  a 9 por 5  $\mu\text{m}$ . Se ubican al norte del cristal central de biotita y del cristal de óxidos de hierro más grande.

F6: 20% de las inclusiones corresponden a una burbuja. Sus dimensiones son 35 por 30  $\mu\text{m}$  y se ubican al norte la biotita central (figura 64 y 65).

F7: Presenta un 10% de burbuja y tres cristales opacos que no superan el 1%. Podría haber hasta siete cristales, pero el enfoque del microscopio no lo permite. Las dimensiones son de 20 por 17  $\mu\text{m}$ .

F8: Son alargadas con una burbuja en una esquina que ocupa el 35%. Tienen tamaños de 15 por 10  $\mu\text{m}$  y 8 por 3  $\mu\text{m}$ , ubicándose en el lado este de la biotita central y sobre el óxido de hierro mayor (figura 64).

F9: Se orientan oblicuamente, al igual que F1 y F2, pero, la burbuja no supera el 1%.

F10: Se componen de una burbuja (5%), un cristal tabulara traslúcido (20%) y un mineral opaco (5%). Su tamaño es de 19 por 11  $\mu\text{m}$ .

F11: Se ubica sobre F10 con un tamaño de 15 por 15  $\mu\text{m}$ . Posee un cristal traslúcido que ocupa el 35% y una burbuja que corresponde al 5%.

F12: Consiste en una inclusión que exhibe siete componentes oscuros que no quedan bien diferenciados entre burbuja u opaco. Se encuentra en la parte inferior del cristal, sobre una hematita. Sus dimensiones son de 20 por 17  $\mu\text{m}$ .

F13: Inclusión con 2 burbujas que ocupan el 22% de ésta y se encuentra sobre el cristal central de biotita, hacia el oeste. Su tamaño es de 34 por 26  $\mu\text{m}$ .

F14: Inclusiones totalmente homogéneas de tamaño 40 por 30  $\mu\text{m}$  aproximadamente, ubicadas bajo F8 (figura 64).

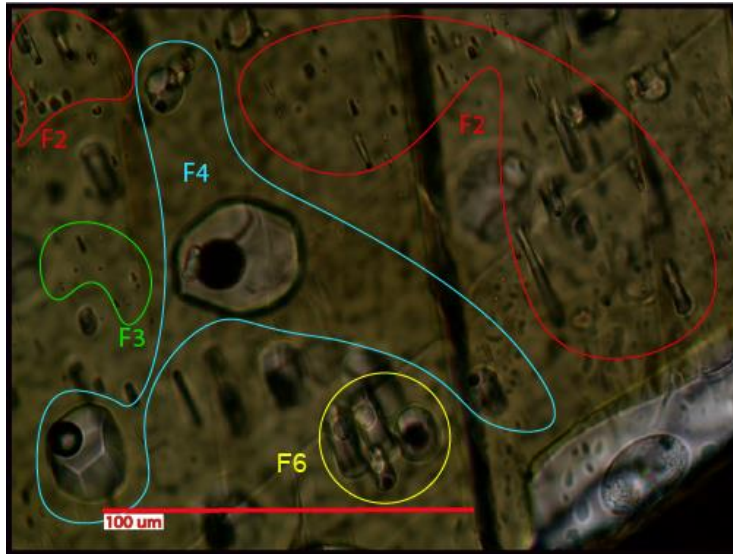


Figura 65. Parte superior del cristal aF, en aumento de 20x, a n ciles paralelos, donde se observan las familias F2, F4 y F6.

#### A.2.7. CRISTAL aG

Cristal color marrón amarillento que presenta el marcado clivaje característico de los anfíboles. Su integridad es buena, aunque presenta un borde de reacción con un cristal anhedral de óxido de hierro. Por otro lado, su estructuralidad es excelente, formando un cristal ehedral con forma de "diamante". Su tamaño es de 383  $\mu\text{m}$  en su parte más larga y de 206  $\mu\text{m}$  en su parte más ancha (figura 66).

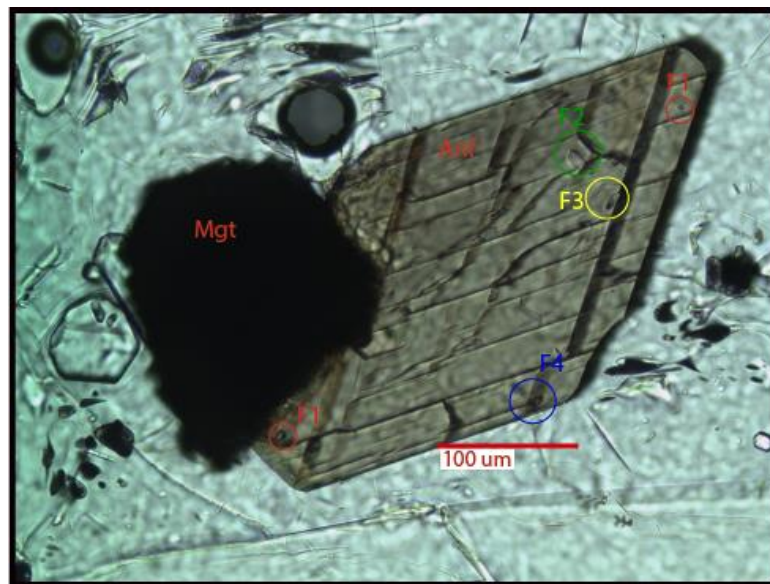


Figura 66. Cristal aG visto en aumento de 20x a n ciles paralelos. Se observa el gran cristal de óxido de hierro en borde de reacción y su marcado clivaje, así como su forma de diamante.



### *Familia de inclusiones vítreas*

F1: Se ubica en la parte superior e inferior del cristal, con un diámetro de 5 y 10  $\mu\text{m}$  y una burbuja correspondiente al 4% (figura 66).

F2: Es una inclusión que tiene un 20% de burbuja y una forma rectangular redondeada de 3 por 1  $\mu\text{m}$ . Se encuentra al norte del cristal, bajo una fractura horizontal. Debido a su tamaño, esta familia no es apta para el estudio (figura 66).

F3: Tienen la misma forma que F2, pero con tamaños de 8 por 4  $\mu\text{m}$  y un 25% de burbuja. Se encuentran al sureste de F2 y orientadas de forma perpendicular a ésta (figura 66).

F4: Tiene una burbuja correspondiente al 10%. Su tamaño es de 13 por 18  $\mu\text{m}$  y se ubica en el extremo este del cristal (figura 66).

### A.2.8. CRISTAL aH

Cristal color marrón amarillento claro, de integridad mala debido a descomposición de éste por intrusión de masa fundamental y una inclusión de biotita por borde de descomposición. Su estructuralidad es regular, mostrando su marcado clivaje característico. Su tamaño es de 649  $\mu\text{m}$  de largo por 378  $\mu\text{m}$  de ancho (figura 67).

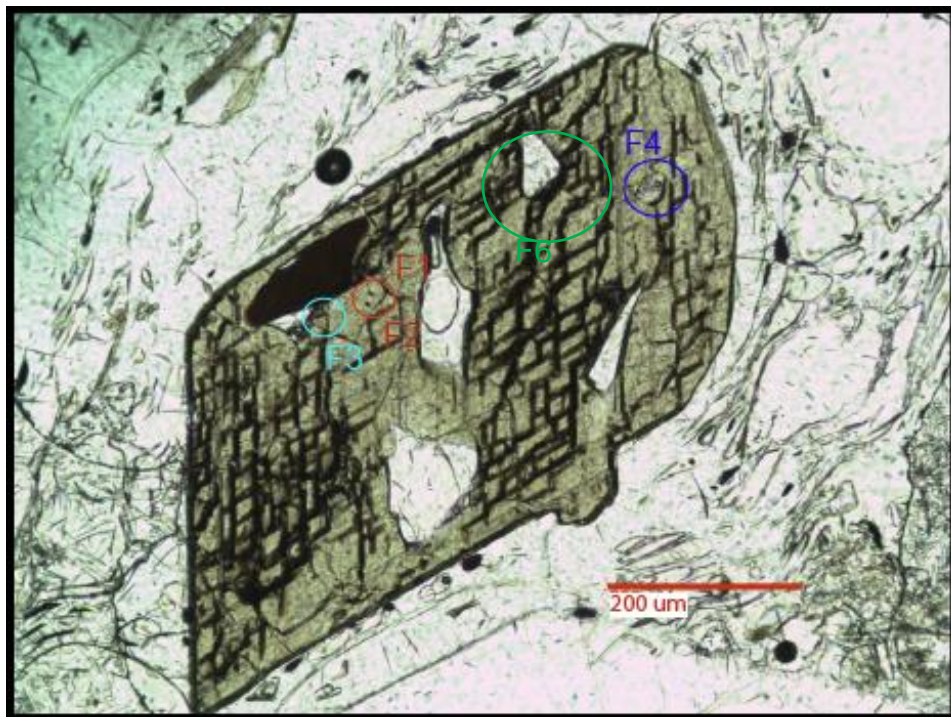


Figura 67. Cristal aH visto en aumento de 10x a *nícoles paralelos*. Se observa el marcado clivaje, así como las intrusiones de masa fundamental y la inclusión de biotita en la parte superior.

### *Familias de inclusiones vítreas*

F1: Una inclusión ubicada al sur de la biotita atrapada por el cristal, rectangular, de 5 por 3  $\mu\text{m}$ . Posee una burbuja que ocupa el 12% y cristales traslúcidos y globulares que ocupan el 25% (figura 67 y 68).

F2: Ubicada al oeste de F1, tiene un tamaño de 5 por 3  $\mu\text{m}$  y una burbuja que ocupa el 10% (figura 67 y 68).

F3: Se trata de un cúmulo de inclusiones muy pequeñas, menores a 3  $\mu\text{m}$ , en las que, apenas, se distingue una burbuja y una pareciera ser totalmente vítrea (figura 67 y 68).

F4: Inclusión de 38 por 33  $\mu\text{m}$  con una burbuja que ocupa el 15% (figura 67).

F5: Se ubica en el costado este del cristal con un tamaño de 12 por 10  $\mu\text{m}$ . Tiene una burbuja correspondiente al 5% y un cristal opaco de 1  $\mu\text{m}$  de diámetro. Puede que esté abierta la inclusión debido a que una fractura muy cercanamente, pero no se distingue si la cruza o no.

F6: Inclusión totalmente homogénea, ubicada a la izquierda de F4 hacia el borde superior del cristal. Su tamaño es de 90 por 50  $\mu\text{m}$  (figura 67).



Figura 68. F1 F2 y F3 de la imagen anterior, con aumento de 20x.

### A.2.9. CRISTAL al

Cristal subhedral con integridad mala, está muy fracturado. se encuentra en borde de reacción a partir de un cristal de plagioclasa de mayor tamaño. Su forma es tabular con extremos prismáticos que reflejan el clivaje característico de los anfíboles, y presenta una macla por todo el largo del cristal. Además, presenta inclusiones opacas de óxidos de hierro. Su tamaño es de 1506  $\mu\text{m}$  de largo por 339  $\mu\text{m}$  de ancho (figura 69).

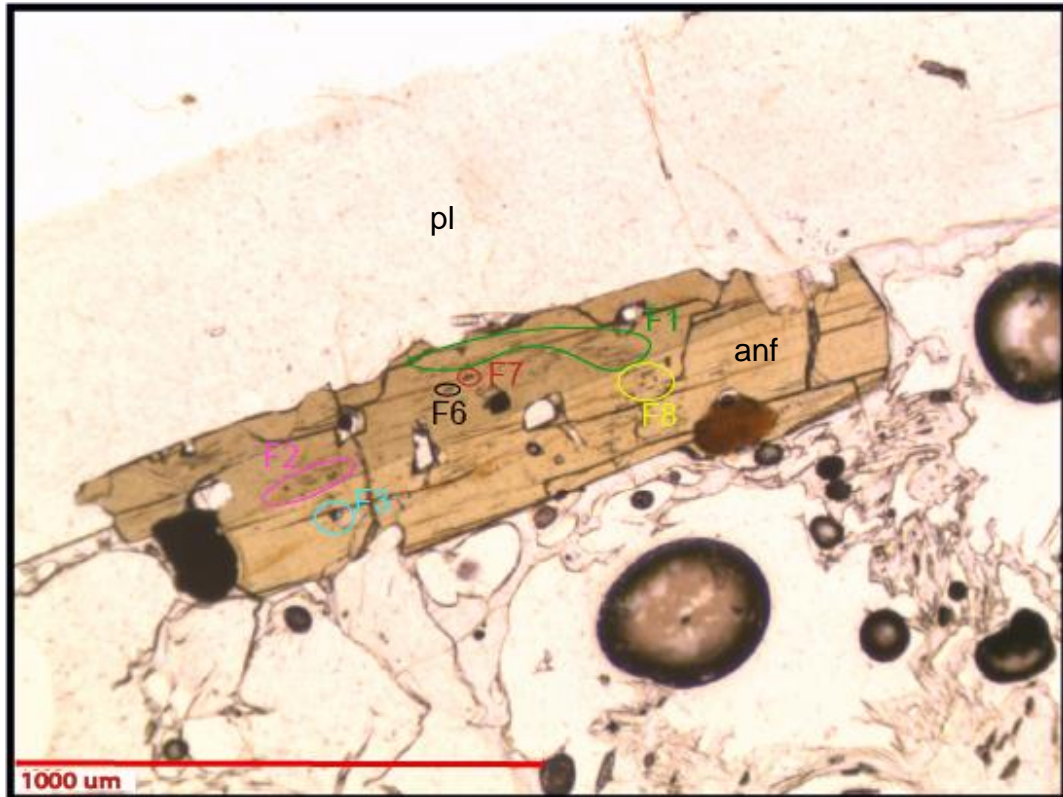


Figura 69. Cristal al visto en aumento de 5x a nícoles paralelos. Se observa el cristal de plagioclasa a partir del cual creció y su mala integridad.

#### *Familia de inclusiones vítreas*

F1: Ubicadas en todo en cristal, orientadas paralelas al lado más largo. Son alargadas, de tamaño entre 20 y 5  $\mu\text{m}$  de largo por 2  $\mu\text{m}$  de ancho, por lo que no sirven para ser analizadas. Algunas son totalmente vítreas y otras tiene una burbuja del 20%. Hacia el este van desapareciendo (figura 69 y 70).

F2: Ubicada sobre el óxido de hierro, hacia el este, tiene tamaños de 13 por 7  $\mu\text{m}$  y 12 por 13  $\mu\text{m}$ . Se componen de una burbuja y un cristal traslúcido correspondientes al 3% y 6% respectivamente (figura 69).



F3: Se compone una burbuja que ocupa el 50%. Su tamaño es de 22 por 11  $\mu\text{m}$  y se encuentra al este del óxido de hierro, al norte de F2 (figura 69).

F4: Poseen una burbuja que ocupa del 40% a 50% de las inclusiones, con tamaños de 23 por 16  $\mu\text{m}$  y 88 por 70  $\mu\text{m}$ . Sin embargo, se encuentran abiertas por fracturas, por lo que no sirven para el estudio.

F5: Tiene un tamaño de 8 por 2  $\mu\text{m}$ , por lo que no sirve para este estudio. Se ubica al oeste del espacio de masa fundamental del cristal y tiene una burbuja que ocupa el 30%.

F6: Se ubica al noroeste del óxido de hierro más pequeño, con un tamaño de 15 por 10  $\mu\text{m}$  y una burbuja correspondiente al 10% de la inclusión (figura 69).

F7: Exhibe una burbuja (5%) y un cristal marrón tabular (40%). Su tamaño es de 21 por 9  $\mu\text{m}$  y se ubica al este de F6 (figura 69 y 70).

F8: Son cuatro inclusiones con un cristal tabular dispuesto de forma diagonal. Tienen forma rectangular y tamaños de 18 por 7  $\mu\text{m}$ , 11 por 4  $\mu\text{m}$ , 22 por 7  $\mu\text{m}$  y 18 por 11  $\mu\text{m}$ . Se componen de una burbuja y un cristal traslúcido correspondientes a 15% y 40%, 10% y 20%, 5% y 5%, y 5% y 40% respectivamente (figura 69 y 70).

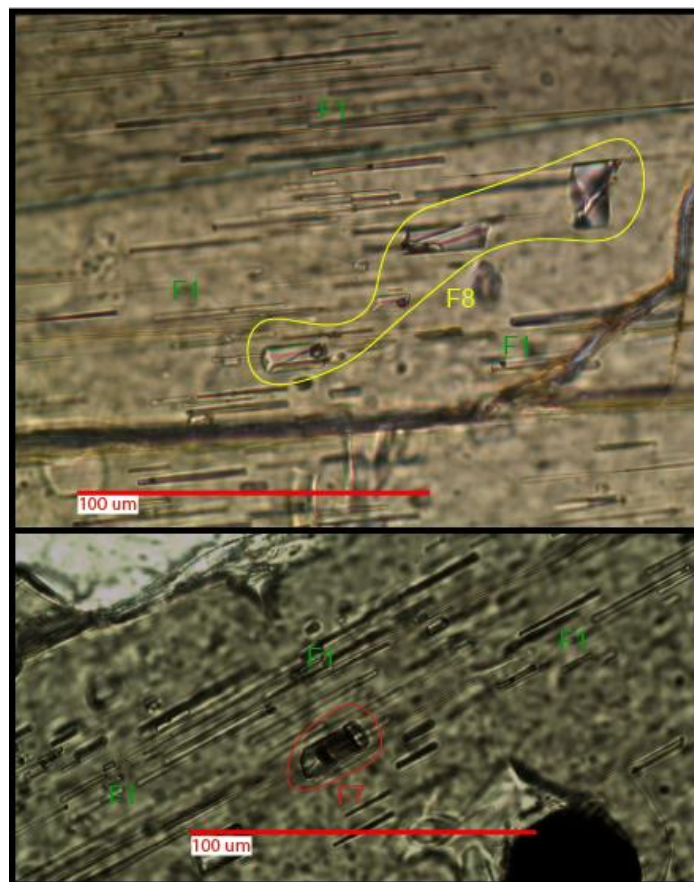


Figura 70. Arriba, familia F8 rodeada de F1. Abajo, F7 rodeada de F1. Se observa el mineral marrón tabular. Ambas poseen un aumento de 20x.

## A.2.10. CRISTAL aJ

Cristal de muy mala integridad presentando fracturas profundas y descomposición de éste por la masa fundamental vítrea. Además, se observa textura poikilítica con plagioclasa y biotita, cuarzo y óxidos de hierro y bordes de reacción con este último mineral. Exhibe una macla “tipo Carsbald” y clivaje en una dirección. Sus dimensiones son de 4mm de largo por 1,5 mm en su parte más ancha (figura 71). Además, presenta varias inclusiones del tipo “hour glass”.

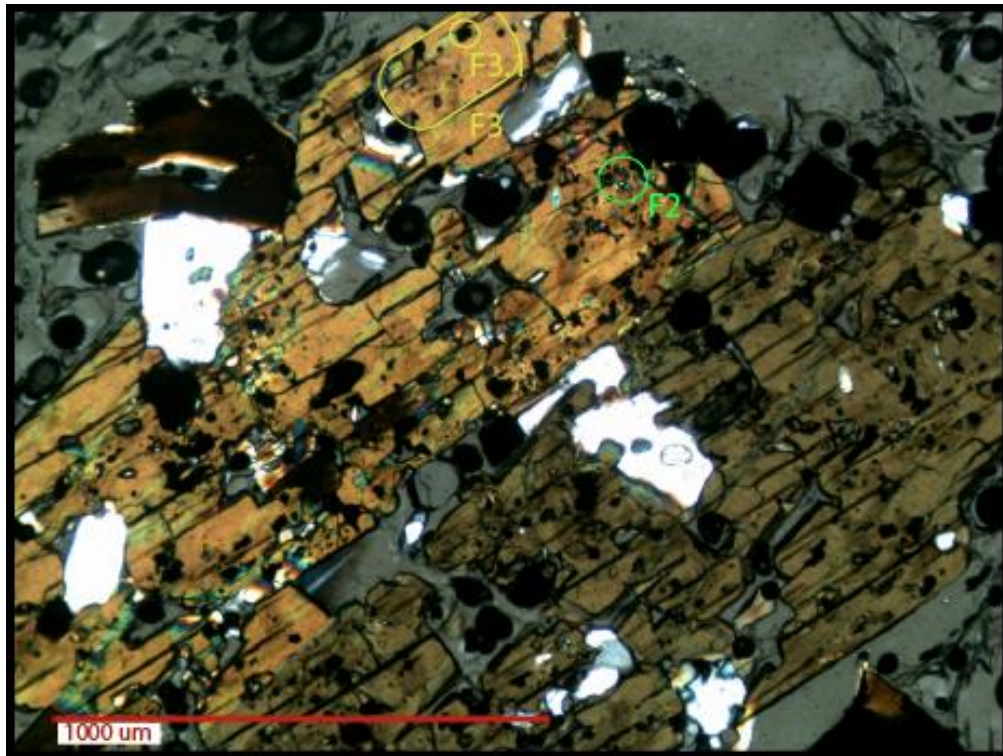


Figura 71. Parte más ancha del cristal aJ visto en aumento de 5x a nícoles cruzados. Se observa la “macla Carsbald” y la mala integridad del cristal.

### *Familia de inclusiones vítreas*

F1: Aglomeraciones de inclusiones de 4 a 12  $\mu\text{m}$  que tienden a estar alrededor de una más grande, mayor a 20  $\mu\text{m}$  (figura 72b).

F1.1: Ubicadas en todo el cristal, tiene un tamaño de 4 a 12  $\mu\text{m}$  y forma tabular. Su burbuja corresponde al 10% a 13% de cada inclusión.

F1.2: Una inclusión de 33 por 30  $\mu\text{m}$  con una burbuja y un cristal traslúcido que ocupan el 15% y 2%, respectivamente.

F1.5: Se ubica al oeste de F1.3, con un tamaño de 25 por 12  $\mu\text{m}$  y una burbuja y un mineral traslúcido correspondientes al 10% y 38%, respectivamente.

F2: Única inclusión con tres burbujas correspondientes al 23% y dos cristales opacos, al 1%. Se encuentra en la parte más ancha del cristal, bajo F3.1 (figura 72b).

F3: Inclusiones con un gran mineral opaco en su interior, ocupando entre el 55 y 65%. Sus tamaños varían entre 5 y 14  $\mu\text{m}$  de largo y entre 3 y 8  $\mu\text{m}$  de ancho (figura 72a).

F3.1: Su tamaño es de 33 por 56  $\mu\text{m}$ , con un mineral opaco que ocupa el 45%. Presenta una posible fase de inmiscibilidad y una burbuja correspondientes al 8% en total. Se clasifica como subfamilia de F3 debido a que se encuentra dentro de ésta geográficamente hablando y cumple con la característica de presentar un opaco grande (figura 72a).

F4: Ubicada en la zona de F3.1, es triangular, de 16  $\mu\text{m}$ , en su parte más larga, por 10  $\mu\text{m}$  en su parte más corta; con una burbuja correspondiente al 5%.

F5: Ubicada bajo F4, tiene una burbuja que ocupa el 15% y un tamaño de 21 por 24  $\mu\text{m}$ .

F6: Inclusión cristalizada de 45 por 22  $\mu\text{m}$  que exhibe una burbuja correspondiente al 15% y un cristal tabular traslúcido, al 25%.

F7: Inclusiones de 20 por 20  $\mu\text{m}$  con una burbuja ocupando 1/3 de éstas. Se ubican en el extremo angosto del cristal.

F8: Inclusiones de 80 por 45  $\mu\text{m}$ , con una burbuja correspondiente al 20% de éstas. Se ubican hacia la parte más angosta del cristal.

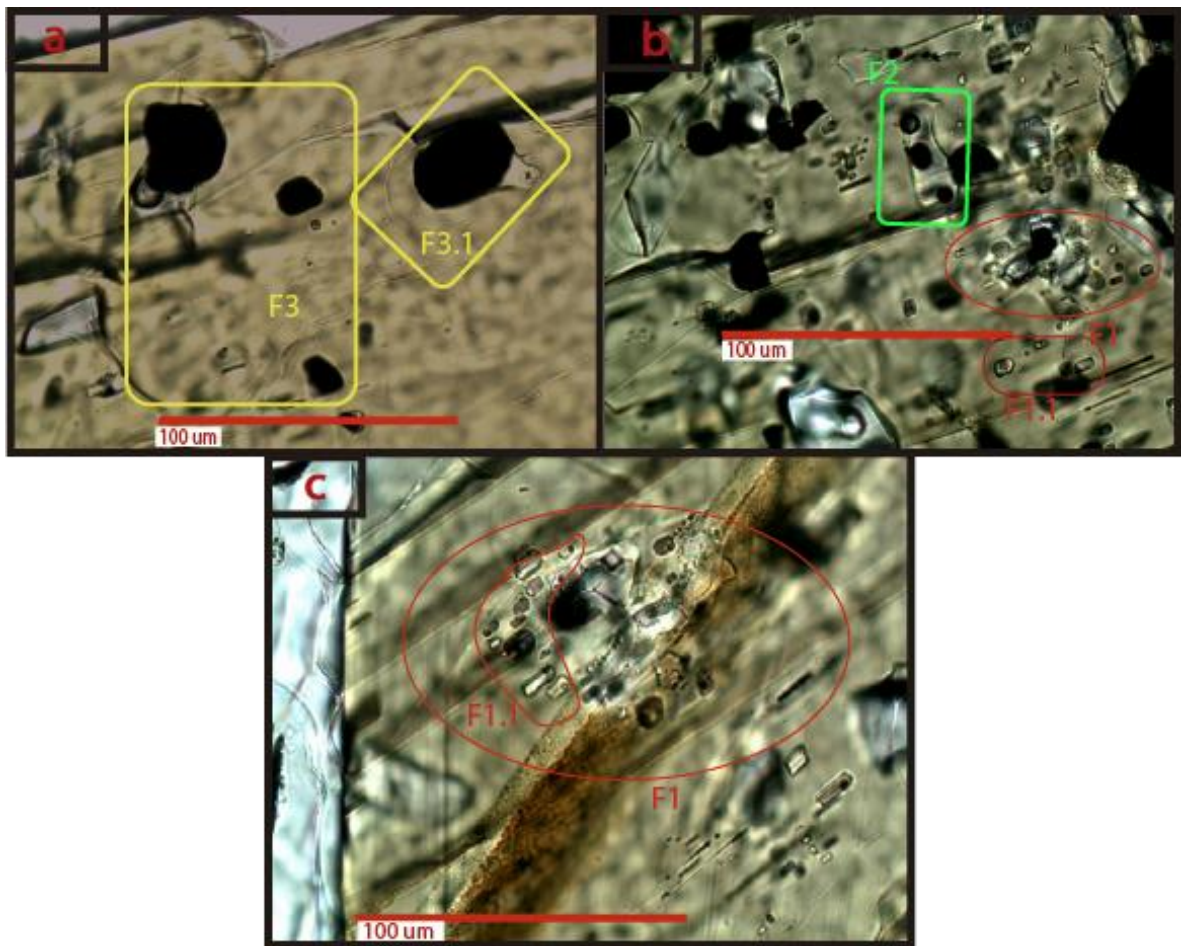


Figura 72. a) Familias F3 y F4 mostradas en la figura anterior. b) F2 y F1 en un lugar distinto a c) que también corresponde a F1. Aquí se observa la aglomeración.

### A.3. CUARZO

#### A.3.1. CRISTAL qA

Cristal de integridad mala debido a sus múltiples fracturas rellenas con masa fundamental vítrea e inclusiones de vidrio por bordes de descomposición. Su estructuralidad también es mala gracias a la presencia de embahiamientos. Sus dimensiones son 1,7 mm en su parte más larga, por 1,2 mm en su parte más corta (figura 73).

#### *Familias de inclusiones vítreas*

F1: Es la única familia que existe, con tamaños de 63 por 44  $\mu\text{m}$  y 31 por 31  $\mu\text{m}$ . Están totalmente cristalizadas, llegando a verse oscuras, con una burbuja que ocupa entre el 15 y 20% (figura 73).



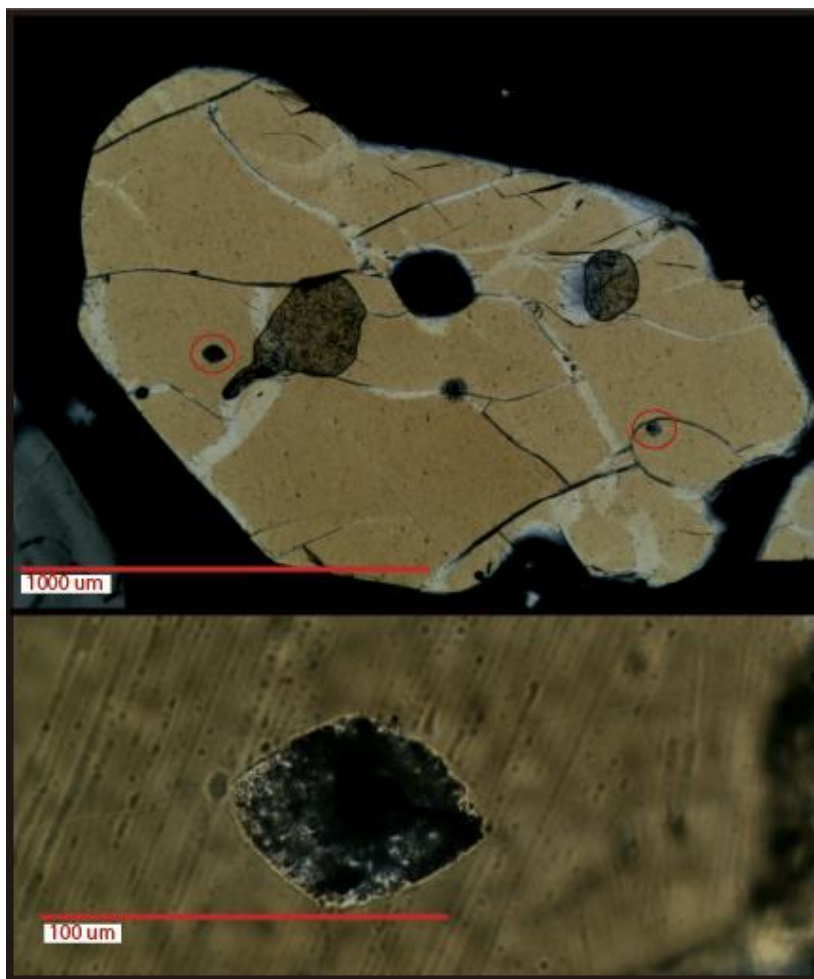


Figura 73. En la parte superior se observa el cristal qA visto en aumento de 5x a nícoles cruzados. Se observa el profundo fracturamiento del cristal y los embahiamientos, además de la ubicación de F1. Abajo, F1 vista en aumento de 50x a nícoles cruzados.

### A.3.2. CRISTAL qB

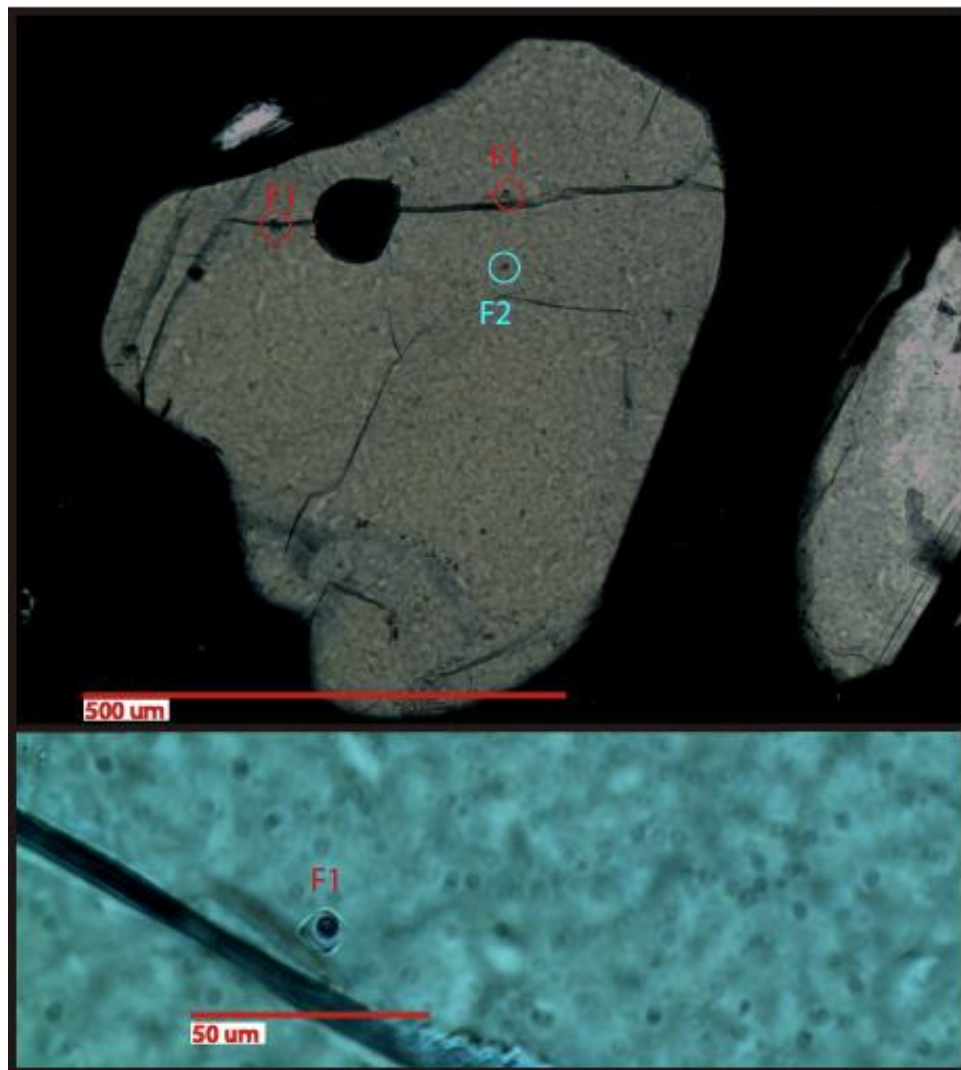
Cristal con bordes redondeados debido a embahiamientos por reabsorción, mostrando una mala estructuralidad, pero integridad media, mermada por un par de fracturas profundas. Su tamaño es de 118  $\mu\text{m}$  en su parte más larga y de 141  $\mu\text{m}$  en su parte más ancha (figura 74).

#### *Familias de inclusiones vítreas*

F1: Conformada por una sola inclusión ubicada al este del espacio relleno con vidrio, en la parte más ancha del cristal. Mide 9 por 8  $\mu\text{m}$ , exhibiendo forma rómbica y una burbuja que ocupa el 25% (figura 74).



F2: Se ubica al sur de F1, al sureste del espacio relleno de vidrio. Posee bordes redondeados, de 7 por 4  $\mu\text{m}$  de tamaño y una burbuja correspondiente al 15% (figura 74).



*Figura 74. Arriba, cristal qB visto en  $\acute{n}$ icoles cruzados, en aumento de 10x. Se observan fracturas profundas rellenas con masa fundamental vítrea, así como sus embahamientos. Abajo, F1 vista en aumento de 50x. a  $\acute{n}$ icoles paralelos.*

### A.3.3. CRISTAL qC

Corresponde a una plagioclasa por lo que fue descrita en el apartado de éste mineral (figura 55, página 91).

#### A.3.4. CRISTAL qD

Cristal de mala estructuralidad, sin poder observar bordes prismáticos. Presenta reabsorción reflejado en embahiamientos y una baja integridad debido a las fracturas que permiten el ingreso de masa fundamental vítrea al cristal. Su tamaño es de 767  $\mu\text{m}$  por 1503  $\mu\text{m}$  en su largo y ancho más largos, respectivamente (figura 75).

##### *Familias de inclusiones vítreas*

F1: Inclusión rómbica, con dimensiones de 11 por 13  $\mu\text{m}$  en sus diagonales. Posee una burbuja correspondiente al 14% y se ubica entre los dos espacios rellenos con masa fundamental (figura 75).

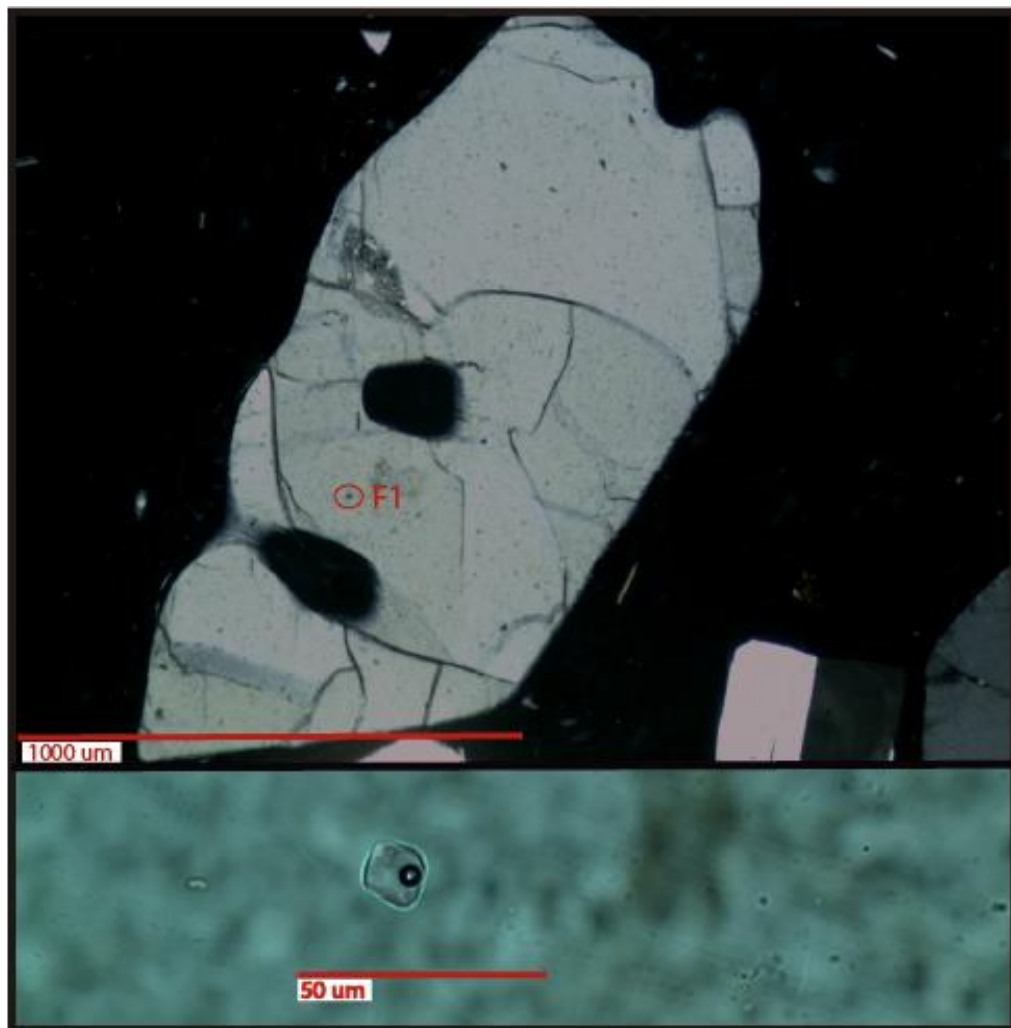


Figura 75. Arriba, cristal qD visto a nícoles cruzados, en aumento de 5x. Se observan fracturas con relleno de vidrio, así como reabsorciones dentro del cristal por la misma masa fundamental vítrea. Abajo, F2 visto en aumento de 50x. Se observa homogénea.

### A.3.5. CRISTAL qE

Cristal con integridad muy mala debido a importantes fracturas que permiten el acceso de masa fundamental dentro del cristal, además de reabsorción dentro de éste. Su estructuralidad es mala, también, debido a los embahiamientos por bordes de reabsorción presentes. Sus dimensiones más grandes son de 2,7 por 2,5 mm (figura 76).

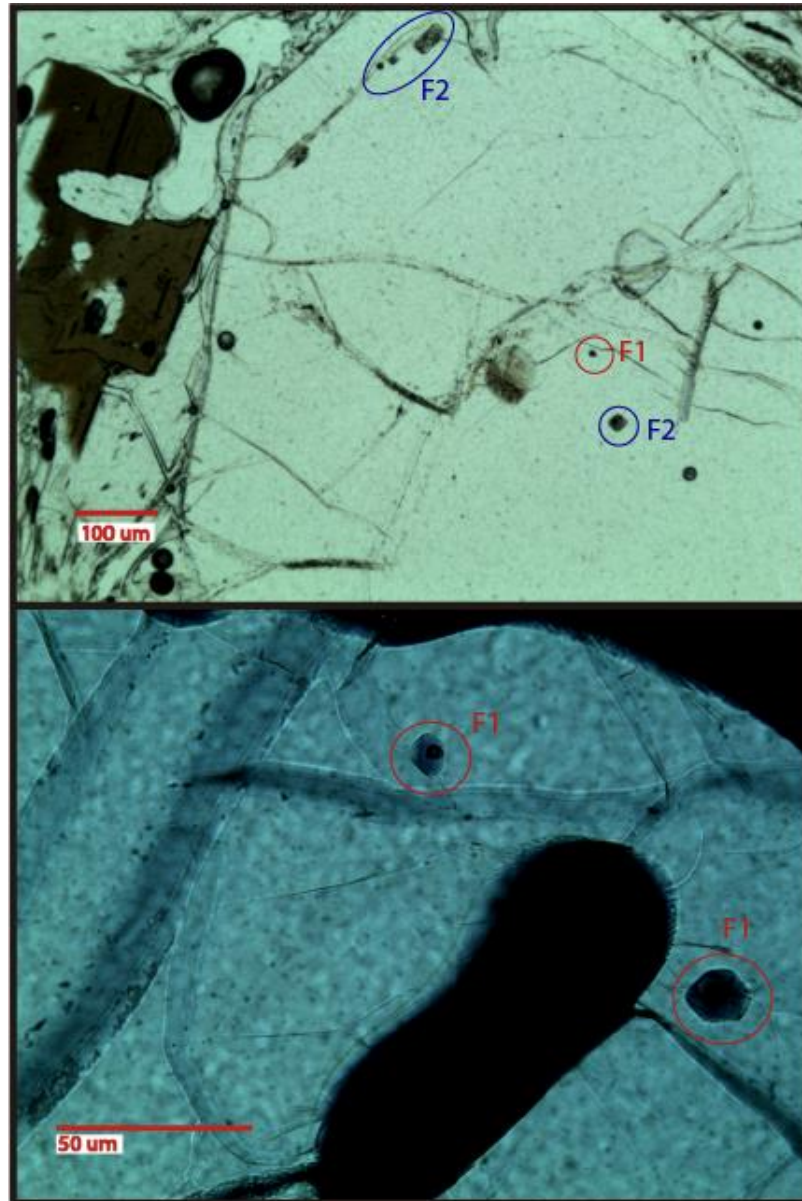


Figura 76. Cristal qE visto en aumento de 5x, a nícoles paralelos. Se observan las fracturas y zonas de reabsorción mencionadas, además de las familias F1 y F2. Abajo, F1 vista en nícoles cruzados en la parte este del cristal, en aumento de 50x. Se observa su forma hexagonal.

#### *Familias de inclusiones vítreas*

F1: Inclusiones hexagonales, ubicadas en la parte noreste del cristal, con una burbuja correspondiente al 15% y un tamaño de 26  $\mu\text{m}$  de largo por 22  $\mu\text{m}$  de ancho (figura 76).

F2: Totalmente vítreas, por lo que se observan negras con formas rectangulares y rómbicas, en el centro y oeste del cristal. Sus tamaños varían entre 43 por 43  $\mu\text{m}$ . 79 por 38  $\mu\text{m}$  y 22 por 16  $\mu\text{m}$  (figura 76).

F3: Ubicadas al sur de F1 y F2, tienen un tamaño de 5 por 2  $\mu\text{m}$  y una burbuja correspondiente al 10%.

#### A.3.6. CRISTAL qF

Cristal de integridad regular, donde la mitad inferior se encuentra fracturada, con intrusión de masa fundamental vítrea. Como todos los demás cristales de cuarzo, presenta embahiamientos por reabsorción. Su tamaño es de 901  $\mu\text{m}$  de largo por 763  $\mu\text{m}$  de ancho (figura 77).

#### *Familias de inclusiones vítreas*

F1: Una sola inclusión con un 25% de burbuja y con forma cuadrada de 7  $\mu\text{m}$  de lado (figura 77).

F2: Completamente vítrea (oscura), aunque se observa una posible burbuja correspondiente al 20%. Su forma es rectangular con lados de 20 y 13  $\mu\text{m}$  y se ubica al este de F1 (figura 77).

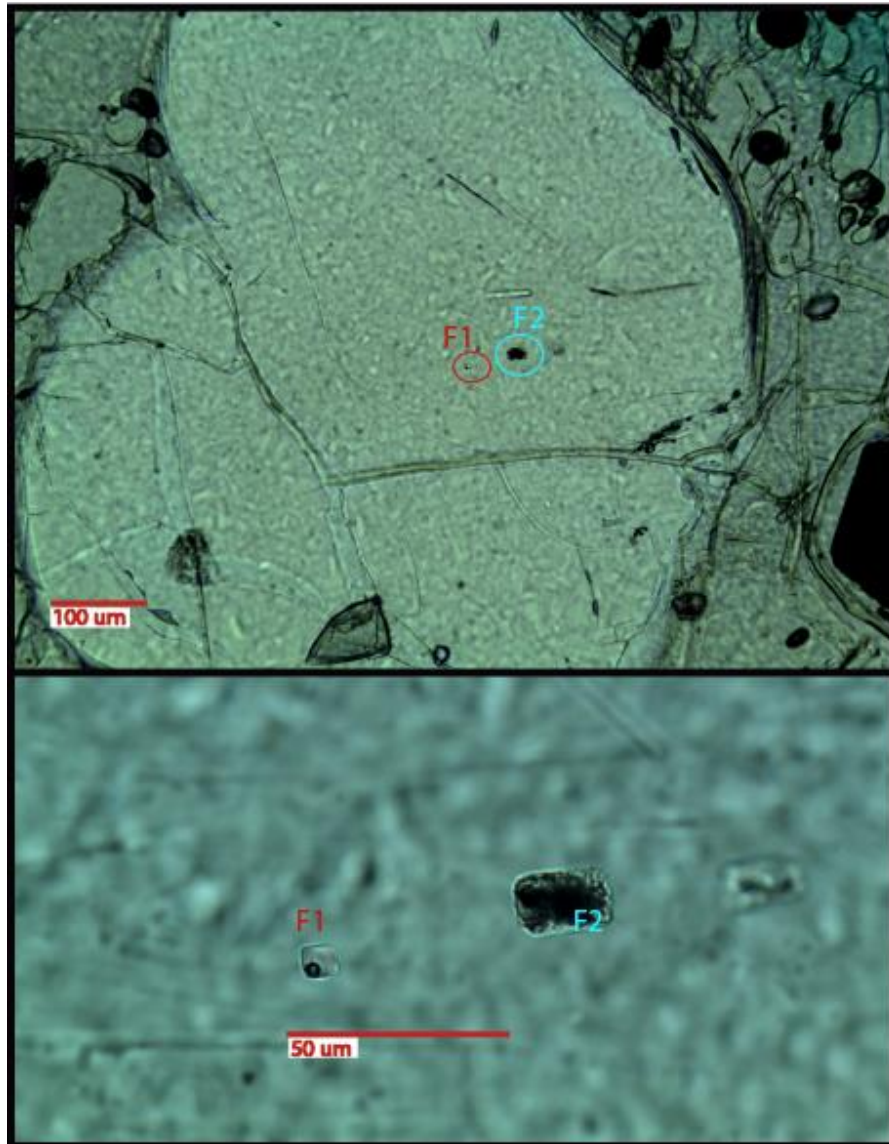


Figura 77. Arriba, cristal qF visto en aumento de 10x, a nícoles paralelos. Se observa su mala integridad y estructuralidad. Abajo, F1 y F2 en aumento de 50x, a nícoles paralelos.

### A.3.7. CRISTAL qG

El cristal presenta embahiamientos debidos a reabsorción, denotando una mala estructuralidad, como también lo es su integridad (fracturamiento con intrusión de masa fundamental vítrea). Su largo más extenso mide 1353  $\mu\text{m}$  (1,3 mm) y su ancho, 718  $\mu\text{m}$  (figura 78).

#### *Familias de inclusiones vítreas*

F1: Numerosas inclusiones menores en la parte norte del cristal. Se alinean, formando figuras redondas. Poseen burbuja, sin embargo, el aumento máximo disponible en el microscopio no permite medirlas correctamente. Sus tamaños son de 1 a 3  $\mu\text{m}$ .



F1.1: Burbuja corresponde al 50%.

F1.2: Burbuja corresponde al 25%.

F2: Inclusión con forma romboidal, con una burbuja correspondiente al 45% y un tamaño de 4 por 4  $\mu\text{m}$  en sus diagonales (figura 78).

F3: Sobre la vesícula que exhibe este cristal, se encuentra una inclusión de 8 por 6  $\mu\text{m}$ , con una burbuja correspondiente al 10% y un posible mineral que ocuparía el 30%. Se observa recristalizada y de color oscuro (figura 78).

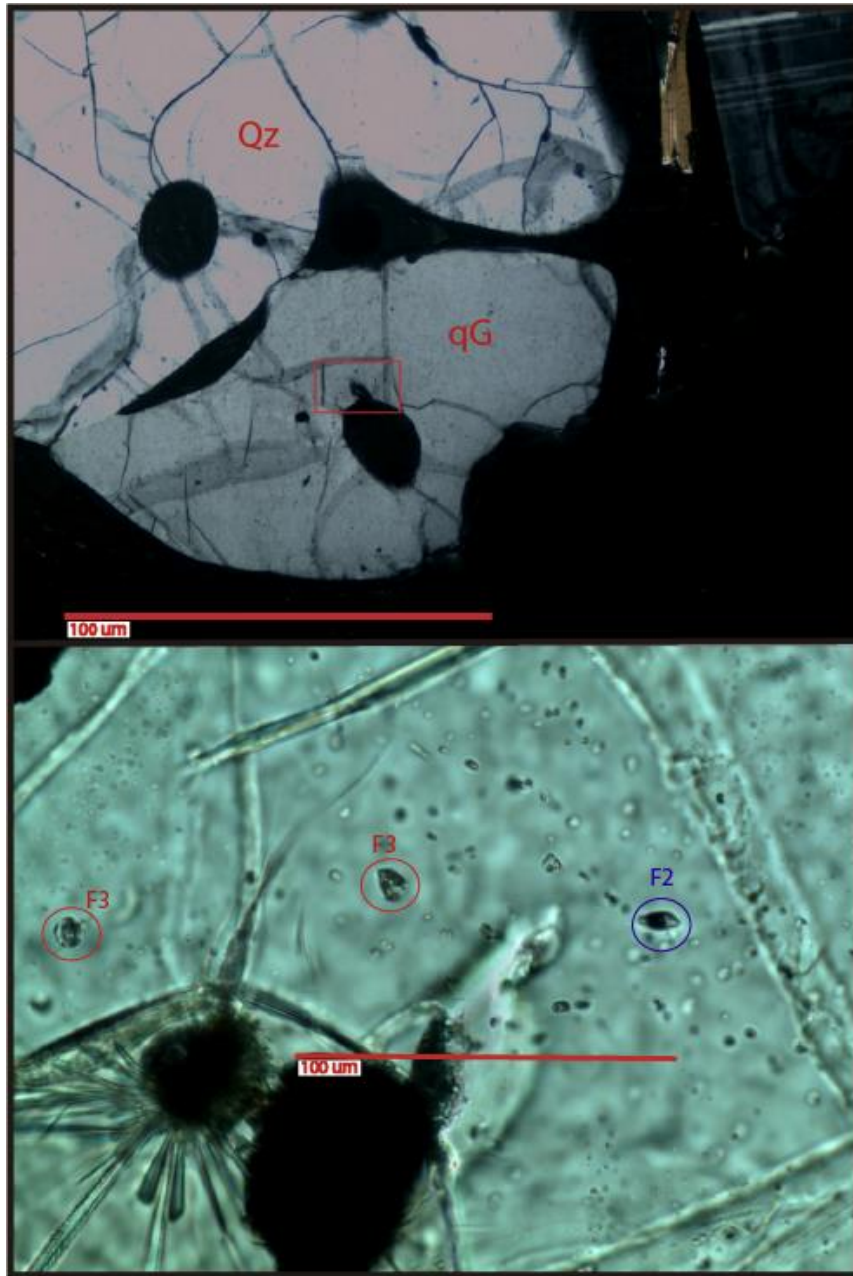


Figura 78. Arriba, cristal qG visto en *nícoles* cruzados, en aumento de 5x. Se observa su forma irregular debido a procesos de reabsorción. Abajo, F2 y F3 en aumento de 50x, a *nícoles* paralelos.

### A.3.8. CRISTAL qH

Se encuentra dentro de un cúmulo de plagioclasa y cuarzo. El cristal qH, propiamente tal, es el cuarzo más pequeño, en el que es posible observar una inclusión vítrea grande (~40  $\mu\text{m}$  de largo). Su tamaño es de 279 por 142  $\mu\text{m}$ , exhibiendo buena integridad y estructuralidad regular (figura 79).

#### *Familias de inclusiones vítreas*

F1: Es la inclusión más grande, ubicada en el centro del cristal, con un tamaño de 47 por 27  $\mu\text{m}$  y una burbuja que ocupa el 20%. Se observa el vidrio totalmente recristalizado (figura 79).

F2: De forma alargada de 18 por 6  $\mu\text{m}$ , con una burbuja que ocupa el 5%. Se encuentra al norte de F1 (figura 79).

F3: Inclusión de 4 por 3  $\mu\text{m}$  con forma pseudoprismática a rómbica, con una burbuja correspondiente al 10% (figura 79).

F4: Ubicada al oeste de F2, tiene un tamaño de 4 por 2  $\mu\text{m}$  y una burbuja correspondiente al 15% (figura 79).

F5: Serie de inclusiones muy pequeñas ubicadas al este del cristal y alineadas en el borde este de F1. Sus tamaños varían entre 1 y 4  $\mu\text{m}$  (figura 79).



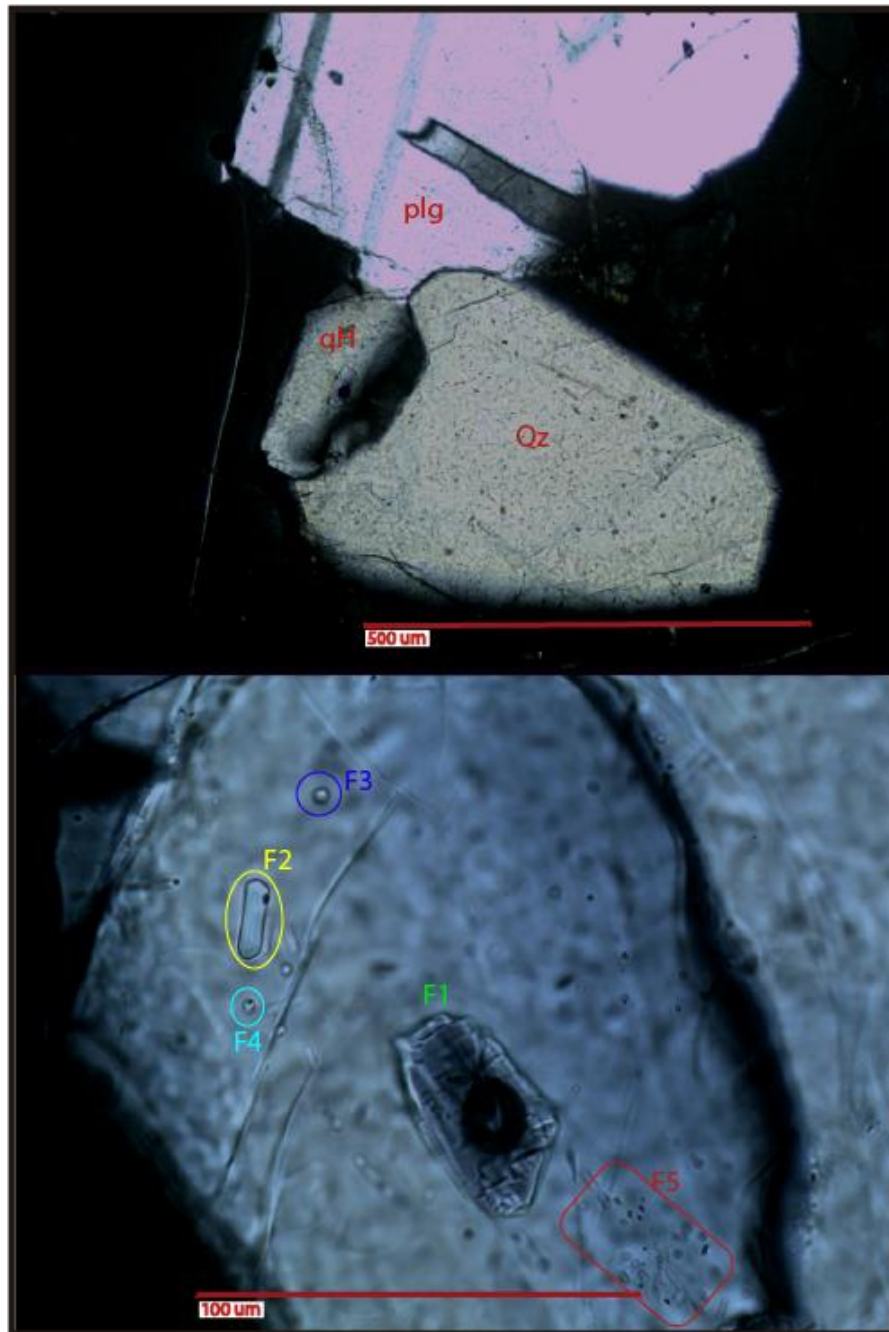


Figura 79. Arriba, Aglomerado de cristales (a 10x y nícoles cruzados) de plagioclasa y cuarzo al que pertenece qH. Abajo, F1, F2, F3, F4, F5 vistas en aumento de 50x a nícoles cruzados.

### A.3.9. CRISTAL ql

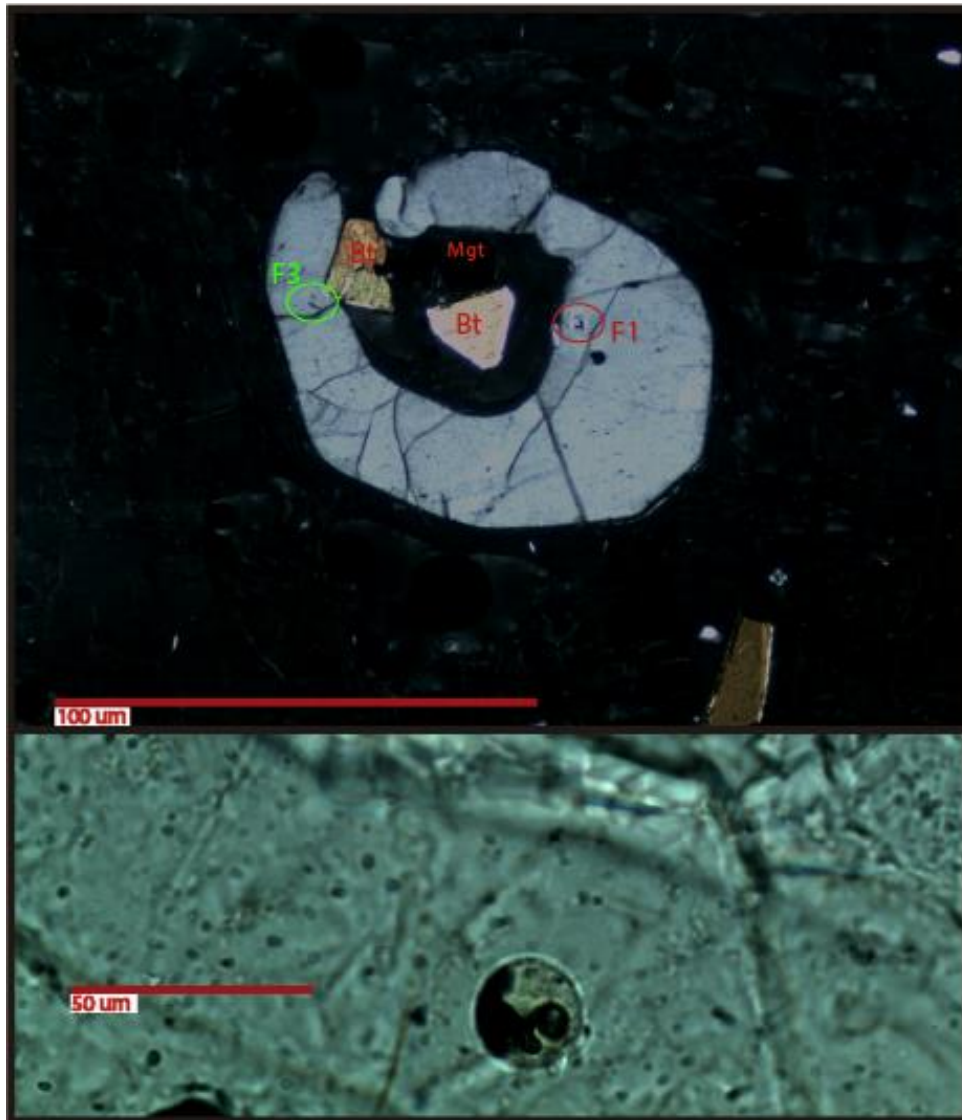
Cristal con un gran borde de reabsorción que creó un embahiamiento que rodea cristales de biotita y óxidos de hierro y titanio. Posee numerosas fracturas con intrusión de masa fundamental vítrea. Su tamaño es de 731 μm de ancho por 971 μm de largo (figura 80).

### *Familias de inclusiones vítreas*

F1: De forma circular con una burbuja correspondiente al 10% y minerales opacos, al 40%, lo cuales se presentan como aglomerado. Su radio es de 11  $\mu\text{m}$  (figura 81).

F2: Ubicadas en todo en cristal con tamaños menores a 1  $\mu\text{m}$ , sin poder distinguir burbujas o minerales.

F3: Inclusión irregular de 5 por 4  $\mu\text{m}$ , con un mineral transparente que ocupa el 23% y una burbuja (¿u opaco?), el 5% (figura 82).



*Figura 80. Arriba, cristal qI visto en n ocles cruzados, en aumento de 5x. Se observa su gran embahamiento y forma irregular. Abajo, F1 vista en n ocles paralelos, en aumento de 50x. Se observa la burbuja a la derecha de la inclusión y la aglomeración de minerales opacos hacia el hemisferio izquierdo.*

### A.3.10. CRISTAL qJ

Cristal con integridad regular a mala debido a las fracturas con intrusión de masa fundamental y reabsorción dentro de éste, al igual que su estructuralidad, al presentar bordes con embahiamientos. Sus dimensiones son 461  $\mu\text{m}$  y 266  $\mu\text{m}$  de largo, en cada lado, y 352  $\mu\text{m}$  de ancho máximo (figura 81).

#### *Familias de inclusiones vítreas*

F1: Una inclusión rómbica de lado 8  $\mu\text{m}$  y una burbuja correspondiente al 25%. Se ubica al oeste del gran espacio relleno con masa fundamental (figura 81).

F2: Tres inclusiones sin burbuja ni minerales, solo es vidrio recristalizado. Son rectangulares de 3 por 2  $\mu\text{m}$ , 3 por 1  $\mu\text{m}$ , 2 por 1  $\mu\text{m}$  y se ubican al norte y sur de la vesícula (figura 81).

F3: Numerosas inclusiones menores de tamaño cercano a 1  $\mu\text{m}$ . Se observan totalmente vítreas, sin poder distinguir minerales ni burbujas.

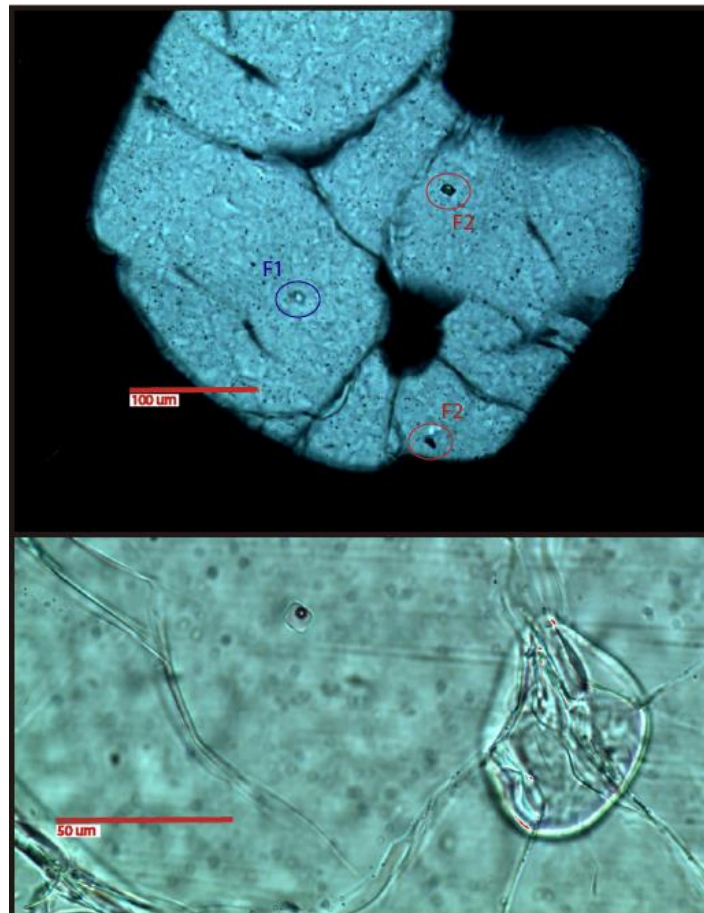


Figura 81. Arriba, cristal qJ visto en nicoles cruzados, en aumento de 20x. Se observan las fracturas profundas y bordes redondeados y la posición de las familias. Abajo, F1 en aumento de 50x, a nicoles paralelos.

## **ANEXO B: UBICACIÓN DE PUNTOS MEDIDOS EN EMP**

En este anexo se muestra la ubicación espacial de los puntos medidos en EMP, sirviendo de guía para el anexo C.



## B.1. MUESTRA M6

### B.1.1. PLAGIOCLASA

#### B.1.1.1 Cristal pB

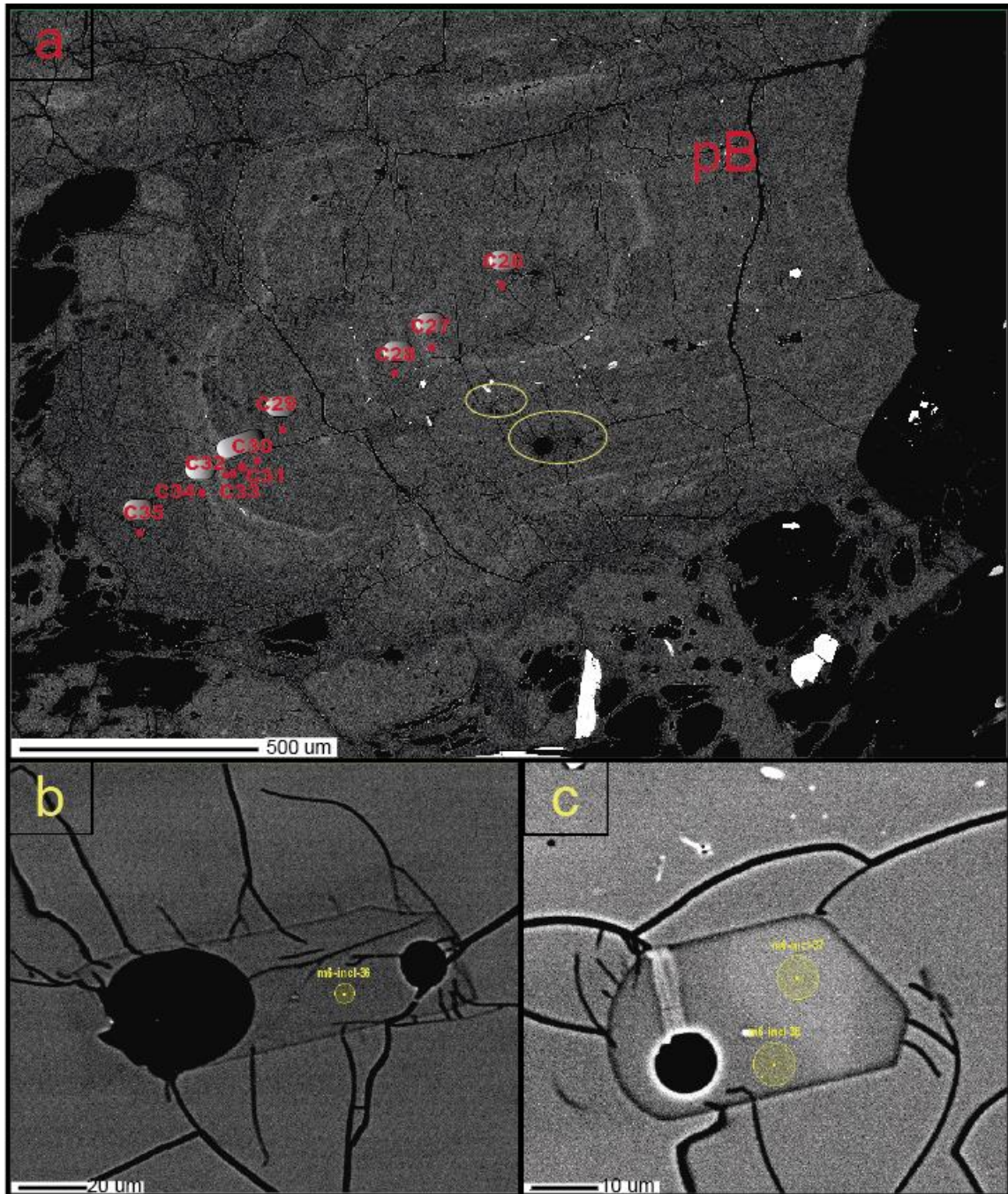


Figura 82. Fotomicrografía en EMP de pB. a) Se observa el perfil medido desde C26 a C35 (M6\_pB\_C26 a M6\_pB\_C356) y las inclusiones vistas en b) (círculo inferior) y c) (círculo superior). b) Inclusión M6\_pB\_M36. c) Inclusión M6\_pB\_37 7 38, los cuales son dos mediciones para una inclusión.



B.1.1.2. Cristal pE y pEw

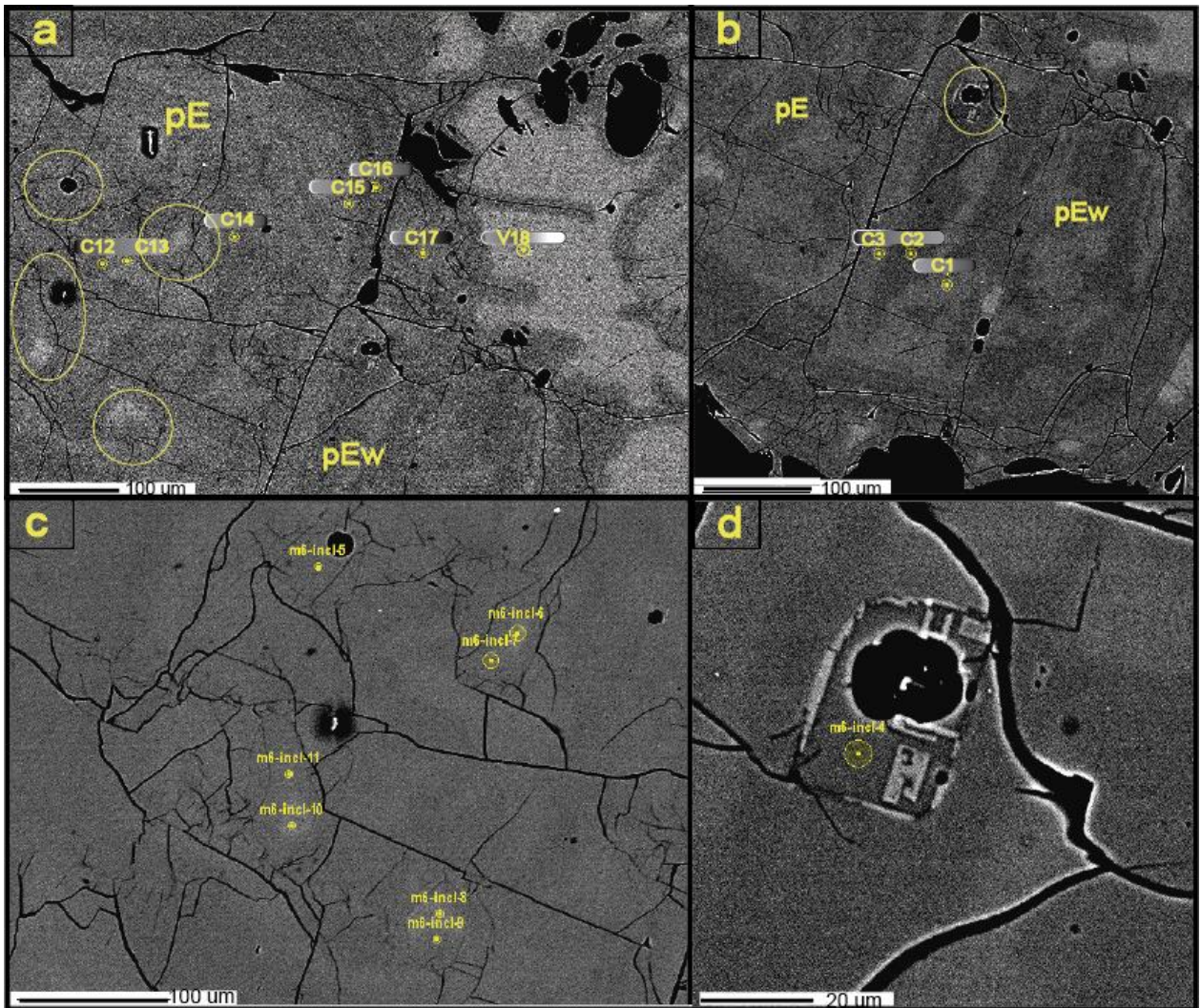


Figura 83. Fotomicrografía de pE en EMP. a) Se observan pEw y pE, este último, con la ubicación del perfil medido desde C12 a C17 (M6\_pE\_C12 a M6\_pE\_C17), el punto de vidrio de masa fundamental v18 (M6\_pE\_v18) y la ubicación de las inclusiones mostradas en c). b) Se muestra el cristal pEw con su perfil medido, desde C1 a C3 (M6\_pEw\_C1 a M6\_pEw\_C3) y su inclusión respectiva mostrada en d) (M6\_pE\_M4).



B.1.1.3. Cristal pH

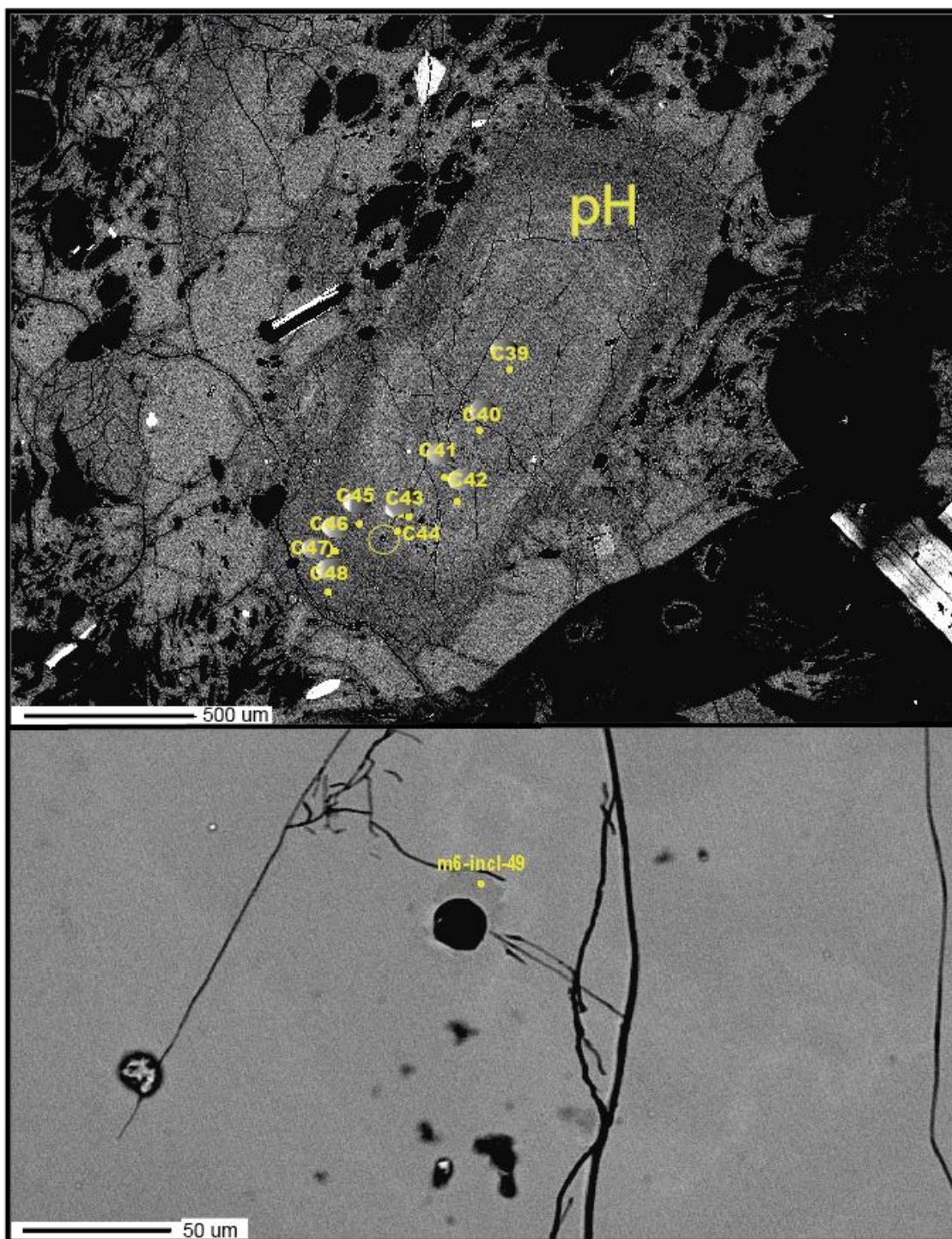
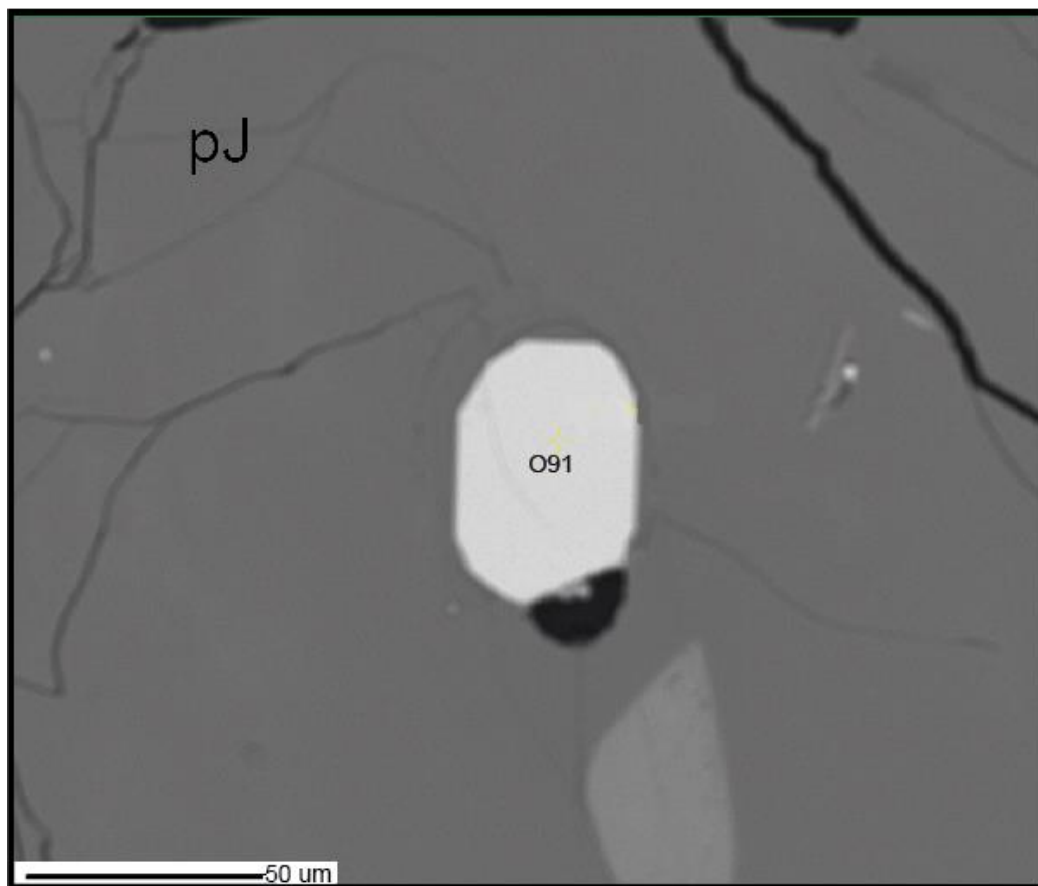


Figura 84. Fotomicrografía cristal pH en EMP. En la parte superior se observa el perfil medido, desde C39 a C48 (M6\_pH\_C39 a M6\_pH\_c48). EN la parte inferior se observa la inclusión medida, M6\_PH\_M49.



B.1.1.4 Cristal pJ



*Figura 85. Fotomicrografía del óxido M6\_pJ\_O91, ulvoespinela, en EMP.*

## B.1.2. ANFÍBOL

### B.1.2.1. Cristal aA

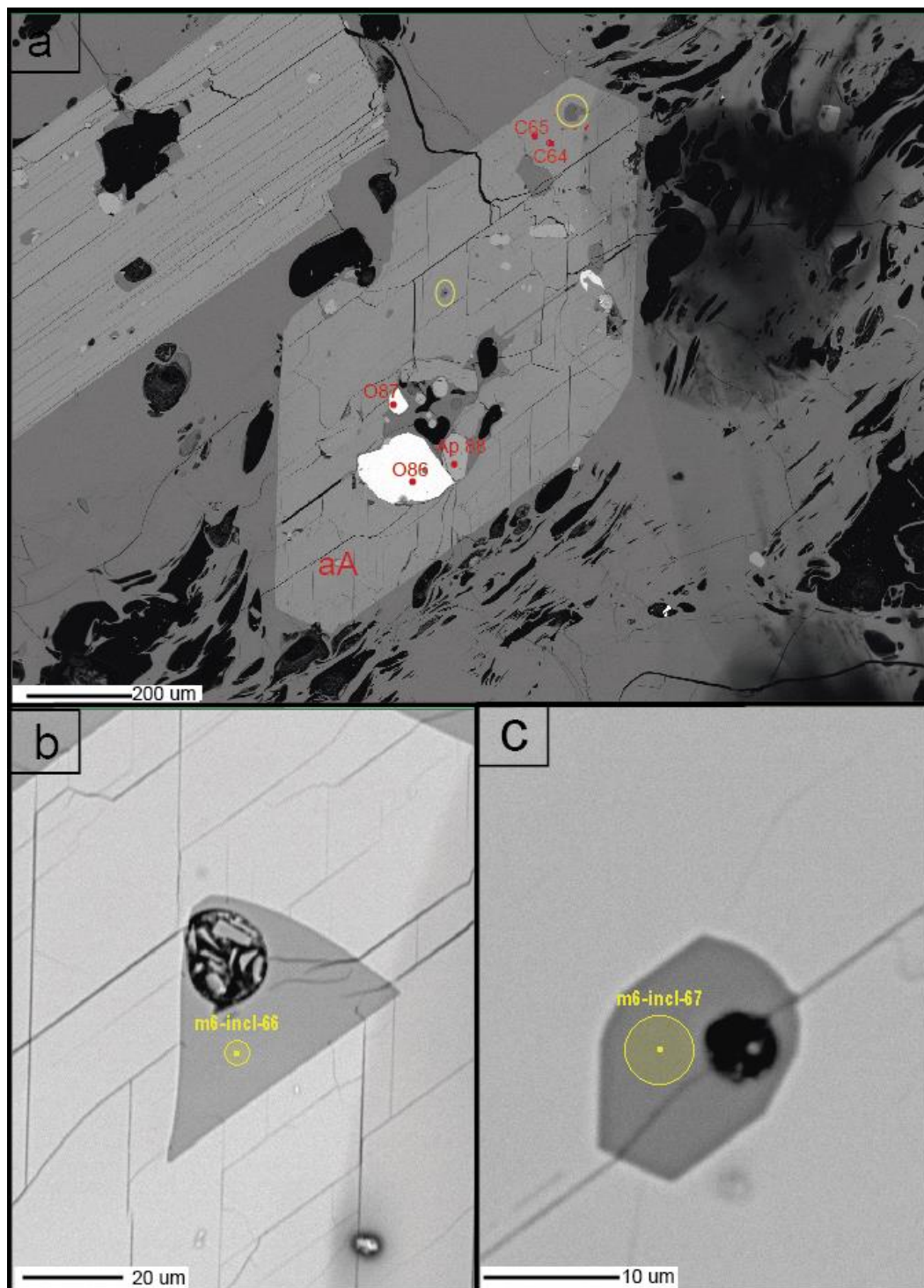


Figura 86. Fotomicrografía del anfíbol aA en EMP. En a) se observa la ubicación de todos los puntos medidos (M6\_aA\_C64, M6\_aA\_C65, M6\_aA\_O87 y M6\_aA\_O86) y de las inclusiones mostradas en b), M6\_aA\_M66 (círculo en la parte superior del cristal) y c) M6\_aA\_M67 (círculo en parte media del cristal).

B.1.2.2. Cristal aB

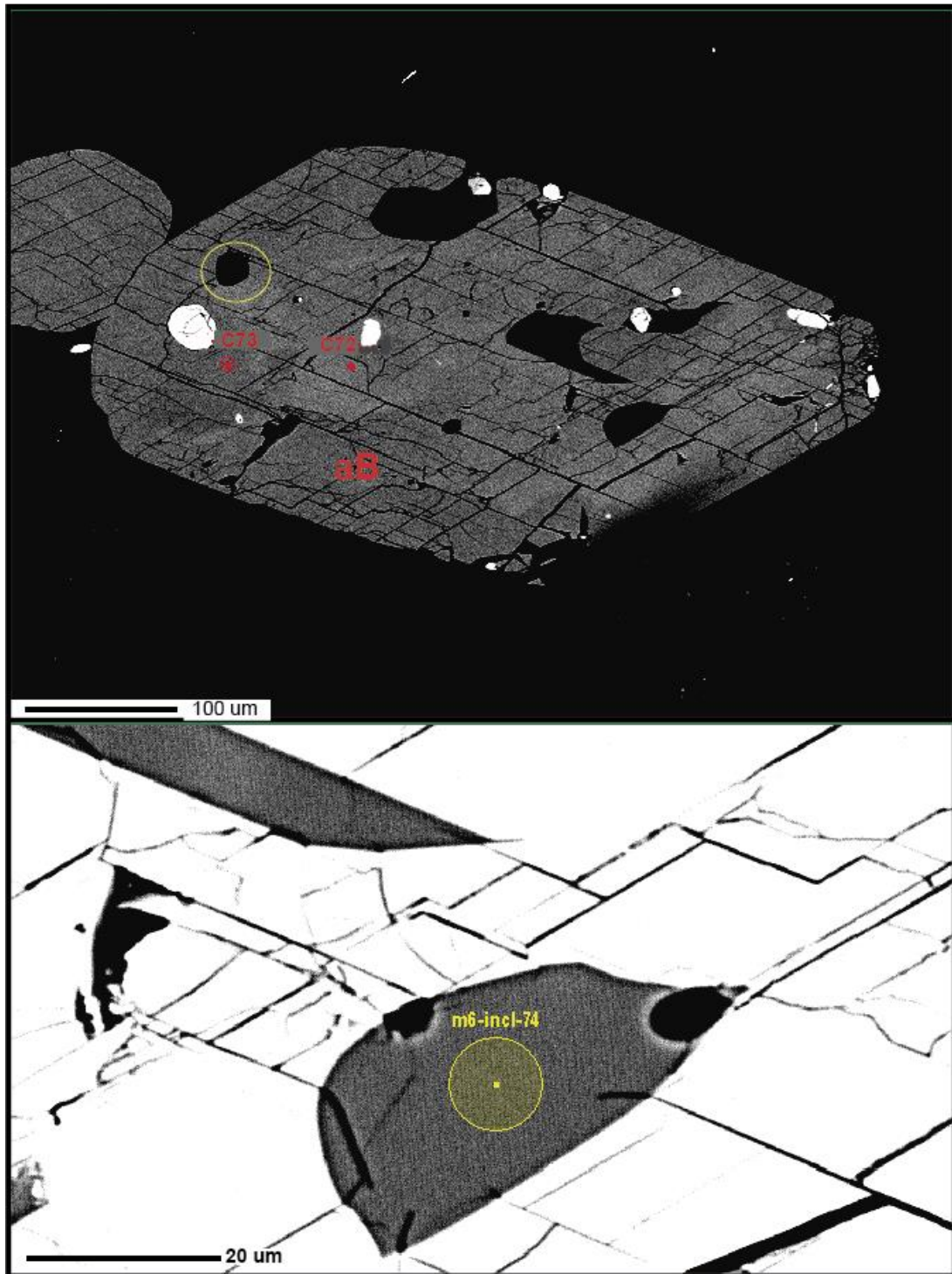


Figura 87. Fotomicrografía del anfíbol aB en EMP. En la parte superior se muestra la posición de todos los puntos medidos (M6\_aB\_C73 y M6\_aB\_C73), así como la inclusión, M6\_aB\_M74, mostrada en la parte inferior.

B.1.2.3. Cristal aC

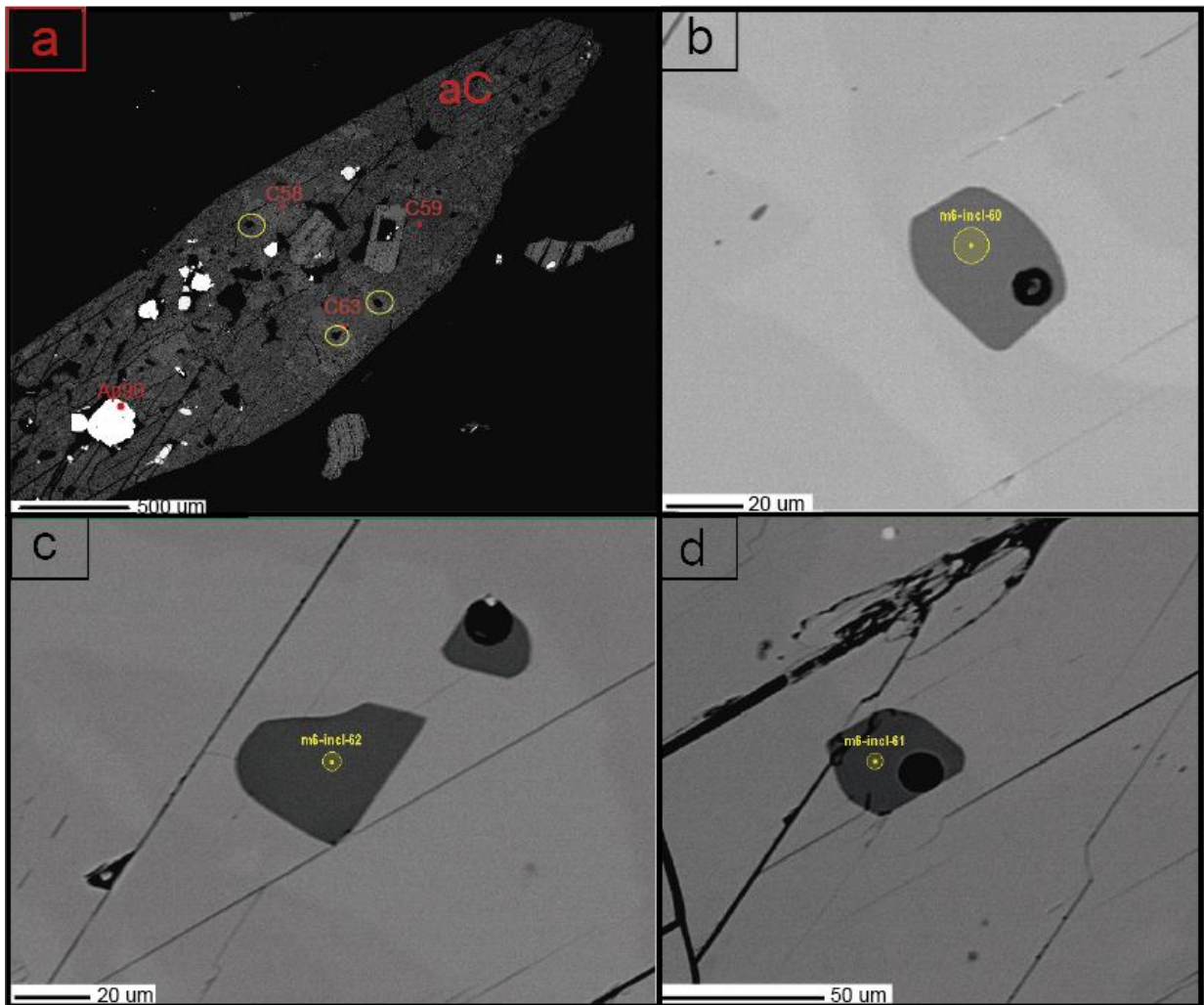


Figura 88. Fotomicrografía del anfíbol aC en EMP. a) Ubicación de todos los puntos medidos en el cristal mismo (M6\_aC\_C58, M6\_aB\_C59 y M6\_aB\_63), del apatito M6\_aB\_Ap90 y las inclusiones vítreas mostradas en b), c) y d). b) Inclusión M6\_aB\_M60 ubicada bajo C58. c) Inclusión M6\_aB\_M62 ubicada bajo C63. d) Inclusión M6\_aB\_M61 ubicada a la derecha de C63.



#### B.1.2.4. Cristal aF

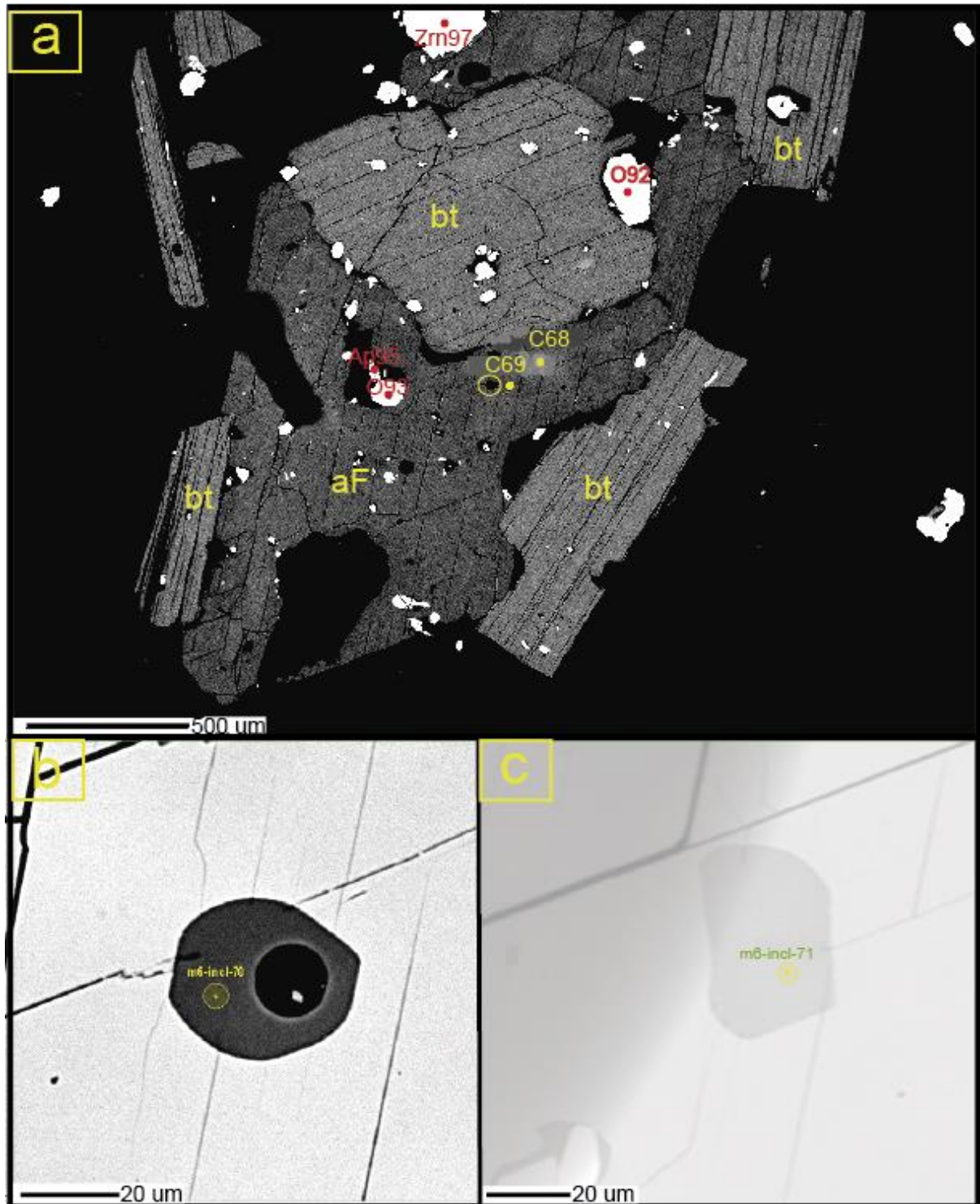


Figura 89. Fotomicrografía del anfíbol aF en EMP. En a) se indica la posición de todos los puntos medidos en cristal (M6\_aF\_C9 y M6\_aF\_C68), en óxidos (M6\_aF\_O3 y M6\_aF\_O92, ulvoespinelas), en apatito (M6\_aF\_Ap95), circón (M6\_aF\_Zrn97), así como la ubicación de las inclusiones de la parte inferior de la imagen. (M6\_aF\_M70 (a) se ubica a la izquierda de C69 y M6\_aF\_M71, en c), no aparece en la imagen, se encuentra en la parte superior del cristal.

B.1.2.5. Cristal aG

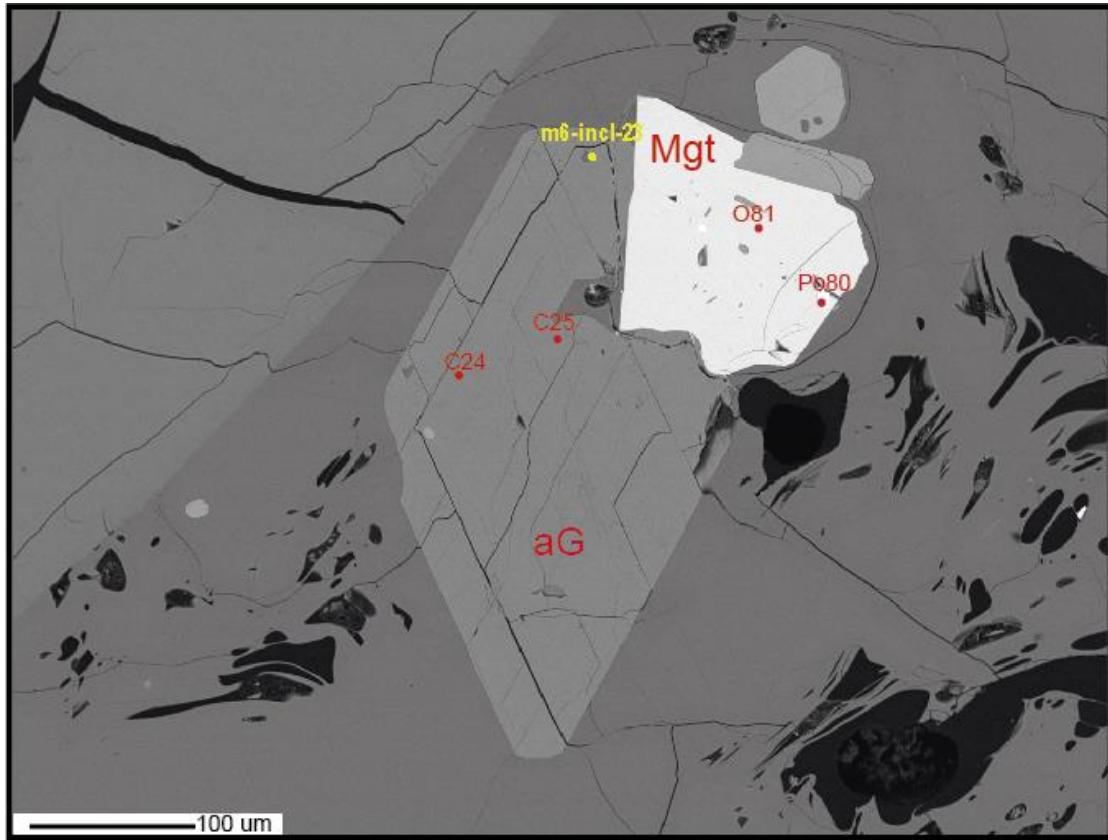


Figura 90. Fotomicrografía del anfíbol aG en EMP. Se observa la ubicación de los puntos medidos en cristal (M6\_aG\_C24 y M6\_aG\_C25), la inclusión vítrea, M6\_aG\_23, el óxido, M6\_aG\_O81 (ulvoespinela) y la pirrotina incluida en O81, M6\_aG\_Po80.



B.1.2.6. Cristal aH

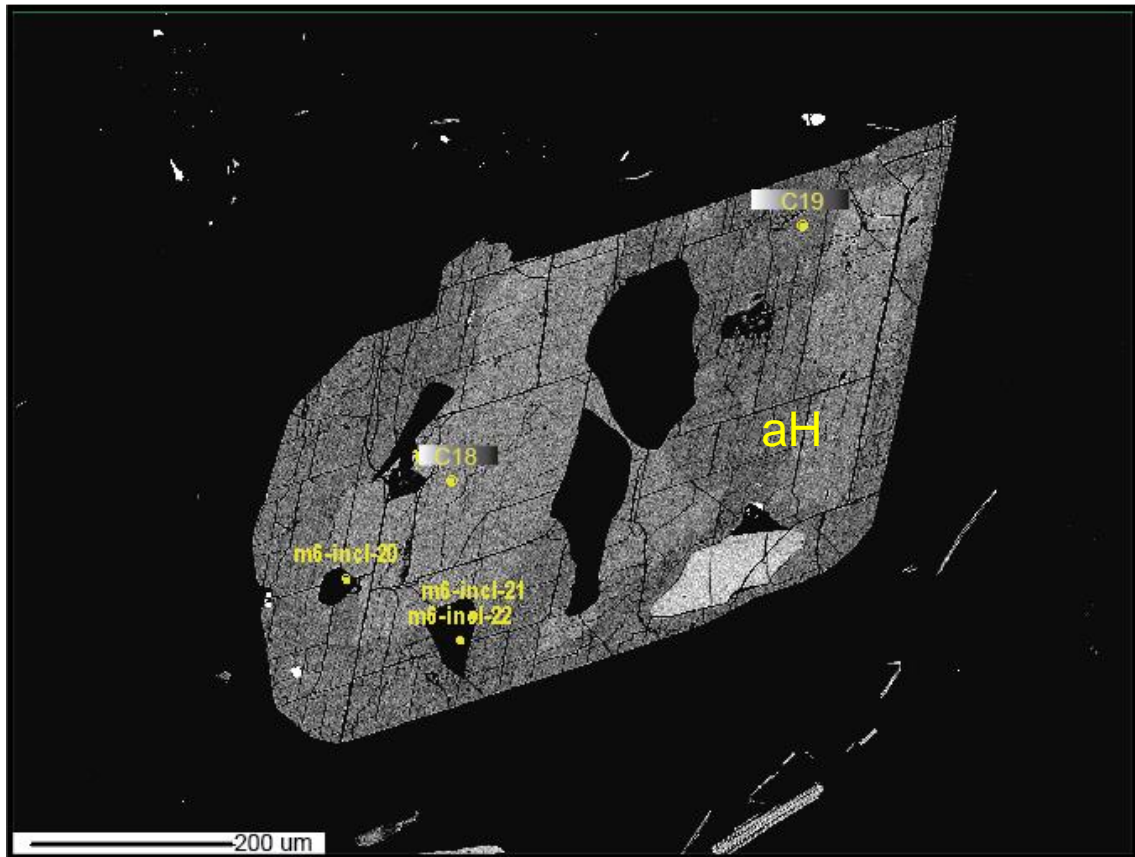


Figura 91. Fotomicrografía del anfíbol aH en EMP. Se observa la ubicación de los puntos medidos en el mismo cristal, M6\_aH\_C18 y M6\_aH\_C19, así como de las inclusiones M6\_aH\_M20 y M6\_aH\_M21 y M6\_aH\_M22, que resultan ser dos mediciones para una sola inclusión vítrea.

B.1.2.7. Cristal aJ

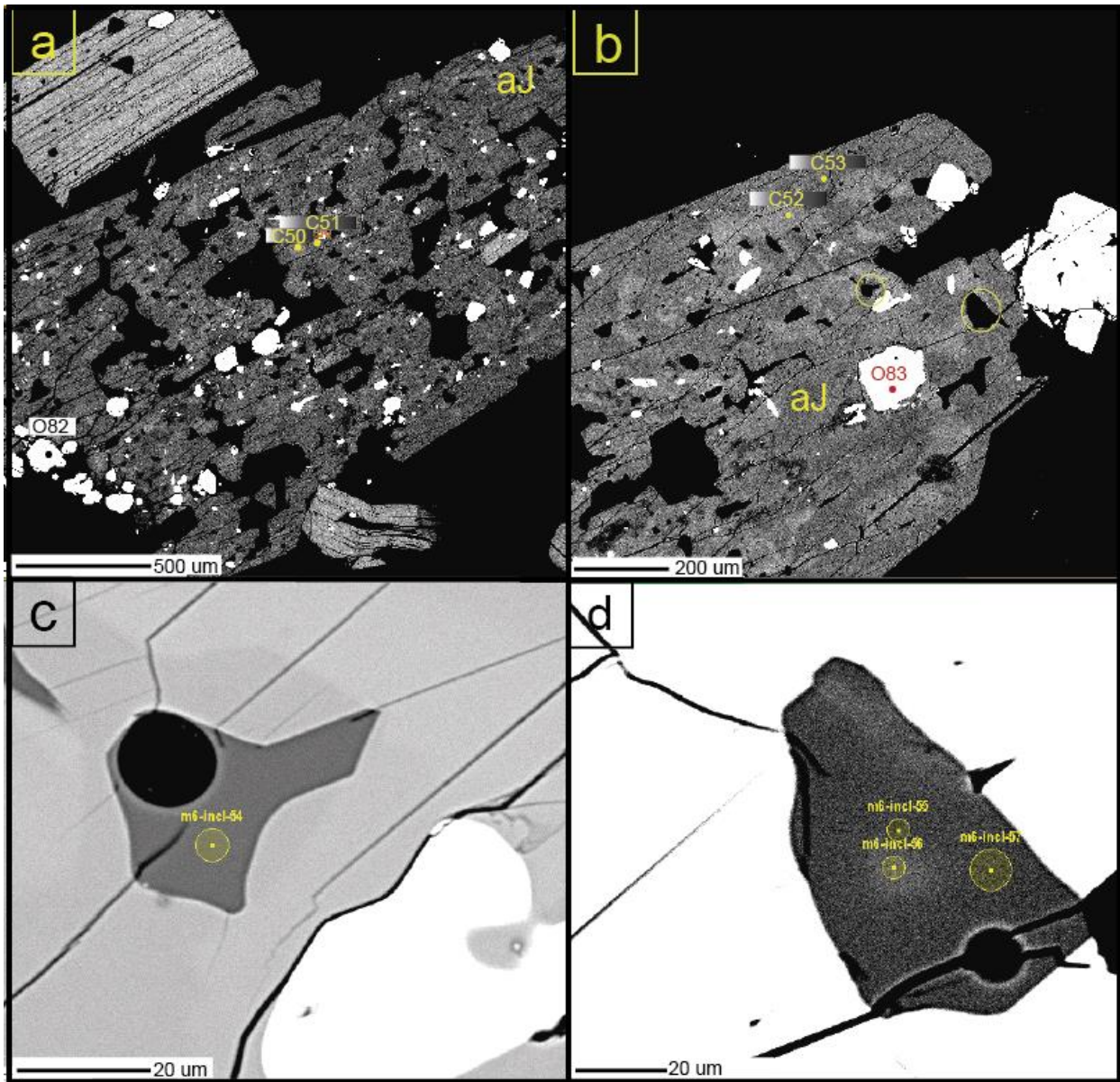


Figura 92. Fotomicrografía del anfíbol aJ en EMP. a) Ubicación de los puntos M6\_aJ\_C50 y M6\_aJ\_C51 y el óxido M6\_aJ\_O82 (ulvoespinela) en la parte inferior, y más ancha, del cristal. b) Ubicación de los puntos en cristal M6\_aJ\_C52 y M6\_aJ\_C53, del óxido M6\_aJ\_O83 (ulvoespinela) y de las inclusiones mostradas en c) y d). c) Inclusión M6\_aJ\_M54 ubicada, en línea recta, sobre O83. d) Inclusión vítrea con 3 puntos medidos, M6\_aJ\_M55, M6\_aJ\_M56 y M6\_aJ\_M57, ubicada a la derecha de M54.

## **ANEXO C: DATOS ELEMENTOS MAYORES, MENORES Y TRAZAS**

En el siguiente anexo se muestra la composición de elementos mayores y menores de los puntos analizados por muestra (M6, MA y MB) en %wt y, a continuación, la de elementos traza medido en ppm. Todas las tablas muestran la composición total en su última columna.

Las tablas de elementos mayores incluyen el tamaño de las inclusiones, su ubicación respecto al cristal y la familia a la que pertenecen según la petrografía (anexo A). Además, la columna de ubicación indica en qué parte de los cristales de anfíbol, plagioclasa y piroxenos se tomó el dato; así como en el caso de los minerales accesorios (óxidos Fe-Ti, apatito, circón) indica la ubicación de éstos respecto a su cristal hospedante. Las posiciones son borde (b), intermedio (i) y centro (c).

Debido a la cantidad de elementos trazas medidos, estas tablas tienen una continuación tanto vertical como horizontalmente en más de una página.

Las casillas que contienen un signo “-” en las tablas de elementos mayores y menores, indica que el elemento no fue medido para ese punto o el valor está bajo el límite de detección. Si el signo se encuentra en las tablas de elementos trazas, indica la segunda opción (límite de detección).

## C.1. MUESTRA M6

### C.1.1. MINERAL: PLAGIOCLASA (p)

Tabla 12. **Elementos mayores y menores** del cristal de plagioclasa pB, de M6, medidos en microsonda electrónica, junto con sus respectivas inclusiones. “-” indica elemento no medido. Unidad de medida: %wt de óxidos.

Puntos		C26	C27	C28		C29		C30	C31	C32	C33	C34	C35	
Inclusiones				M37 M38		M36								
Tamaño(μm)				28 x 25 28 x 25		102 x 23								
Familia				F3 F3		F3								
Ubicación	C	c	c	c	i	i	i	i	i	i	b	b	b	
<b>SiO<sub>2</sub></b>	r	56,52	52,61	56,82	73,10	76,03	57,37	73,40	56,50	58,15	52,61	56,07	57,10	59,26
<b>TiO<sub>2</sub></b>	i	-	-	-	0,15	0,16	-	0,18	-	-	-	-	-	-
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	s	27,39	30,07	27,47	12,31	12,56	26,93	12,26	27,65	26,95	30,19	27,86	27,22	25,50
<b>FeO<sub>T</sub></b>	t	0,21	0,28	0,31	0,59	0,72	0,29	0,74	0,23	0,30	0,28	0,18	0,24	0,20
<b>MnO</b>	a	0,05	-	-	0,02	0,06	0,01	0,03	0,04	0,03	0,04	0,02	0,00	0,01
<b>MgO</b>	l	0,01	0,03	0,01	0,11	0,07	0,01	0,13	-	0,02	-	0,04	-	0,02
<b>CaO</b>		9,48	12,89	9,33	0,65	0,60	9,15	0,60	9,41	8,81	12,87	10,11	9,25	7,40
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	pB	5,89	4,26	5,86	2,57	2,56	6,07	2,44	5,69	6,32	4,14	5,72	5,79	6,77
<b>K<sub>2</sub>O</b>		0,37	0,23	0,42	5,41	5,52	0,50	5,70	0,44	0,43	0,25	0,47	0,44	0,68
<b>BaO</b>		0,10	-	0,08	-	-	-	-	0,06	0,08	0,01	0,04	-	0,02
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>		0,04	-	0,04	0,05	-	0,02	-	0,02	-	0,04	0,02	0,06	0,00
<b>Cl</b>		-	-	-	0,12	0,15	-	0,15	-	-	-	-	-	-
<b>Total</b>		100,06	100,37	100,34	95,07	98,42	100,34	95,63	100,03	101,08	100,44	100,54	100,10	99,86

Tabla 13. **Elementos trazas** del cristal de plagioclasas pB, de M6, medidos en LA-ICP-MS, junto con sus respectivas inclusiones. “-” indica elemento bajo el límite de detección. Unidad de medida: ppm.

Puntos	C28			P	C26	C26.1	C26-27	C27	C28.0	C29.1	C29.2	C29	C29-30	C30-31	C31	C32	C33	C34	C35	C35.1	C35.2	
	Inclusiones	M37	C30																			
Li	43	195	53	e r f i l 1 C r i s t a l pB	51	49	50	48	56	51	52	60	124	57	49	41	44	35	35	29	30	
Sc	12	17	5		8	13	9	9	10	10	10	9	10	8	12	9	8	7	7	7	9	6
V	4	16	2		1	-	-	-	1	-	0	-	7	-	-	1	-	-	-	1	-	-
Cr	-	-	7		0	4	-	-	-	-	-	3	-	7	4	-	3	1	7	-	-	2
Co	1	5	-		2	1	2	1	-	1	3	1	0	1	3	1	3	0	-	-	0	-
Ni	1	4	-		2	-	-	3	2	4	-	1	-	-	1	0	-	-	0	-	-	-
Cu	-	5	2		0	0	-	0	-	1	11	-	3	-	2	0	4	4	3	3	3	3
Zn	-	23	17		-	1	3	-	-	-	5	3	19	4	11	4	4	4	5	-	7	7
Ga	26	14	38		34	38	29	26	28	29	32	30	15	32	28	25	29	32	33	28	32	32
Rb	1	311	1		1	3	2	2	1	2	3	1	260	0	1	1	1	0	-	0	1	1
Sr	738	53	1172		885	880	821	814	920	877	883	874	62	886	880	857	966	901	1002	989	996	996
Y	-	11	0		0	0	0	0	0	0	1	-	8	-	0	N	-	0	-	0	0	-
Zr	-	142	-		-	-	-	-	-	-	3	-	81	-	-	O	-	-	-	-	-	-
Nb	-	14	-		-	-	-	-	-	0	-	-	10	-	-	-	0	-	-	-	-	-
Pd	-	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	M	-	-	-	-	-	-
Ag	1	1	1		-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-	E	-	-	-	-	-	-
Cd	-	2	4		-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-	D	-	-	-	-	-	-
Sn	3	3	1		0	2	1	0	1	1	3	2	2	2	1	I	1	0	0	1	1	1
Cs	0	19	-		-	1	-	-	-	-	1	1	19	1	-	D	-	0	0	0	0	-
Ba	183	513	305		181	164	181	185	202	206	209	199	447	197	210	O	212	225	234	184	278	333
La	15	43	22		17	19	14	13	16	19	23	16	41	16	17	-	14	18	17	19	11	11
Ce	18	88	26	23	28	20	17	21	23	29	22	68	23	22	-	17	22	19	24	13	15	
Pr	1	7	2	2	2	1	1	2	2	2	1	6	1	1	-	1	2	1	1	1	1	
Nd	2	26	4	4	4	3	5	3	5	8	5	18	5	2	-	2	4	3	5	3	2	
Sm	-	2	-	-	-	-	-	0	0	-	-	2	-	-	-	41	44	35	35	29	30	
Eu	1	0	2	1	1	2	1	1	1	1	1	0	1	1	-	1	1	1	1	1	1	
Gd	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Tb	-	0	-	-	-	-	-	-	-	0	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Dy	-	2	-	-	-	-	-	-	-	0	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Ho	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Er	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Tm	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	0	
Yb	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Lu	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Hf	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Ta	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Pb	11	34	22	14	14	14	14	14	15	14	13	31	14	14	-	14	15	15	18	15	19	
Th	-	43	-	-	-	-	-	-	-	0	-	37	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
U	-	14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Tabla 14. **Elementos mayores y menores del cristal de plagioclasa pE, de M6, medidos en microsonda electrónica, junto con sus respectivas inclusiones.** “-” indica elemento no medido. Unidad de medida: %wt de óxidos.

Puntos	C1	C2	C3	C12			C13			C14			C15	C16	C17		
Inclusiones	M4			M10	M11	M5	M8		M9	M6		M7					
Tamaño(μm)	63 x 40			75 x 34	75 x 34	58 x 53	40 x 56		40 x 56		50 x 75		50 x 75				
Familia	F3			F4	F4	F3	F4		F4	F4		F4					
Ubicación	C			C			C			C			C				
	c	i	b	b	c	c	c	c	c	c	i	i	i	b	b	b	
SiO <sub>2</sub>	57,87	60,63	77,47	58,37	58,15	75,87	73,59	74,00	59,68	76,09	74,63	59,24	75,71	74,02	58,61	59,40	58,87
TiO <sub>2</sub>	-	-	0,19	-	-	0,07	0,09	0,14	-	0,08	0,17	-	0,11	0,04	-	-	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26,69	24,74	10,38	26,30	26,76	12,28	12,08	12,40	25,56	12,22	11,98	25,44	12,23	11,97	25,88	24,66	25,89
FeOT	0,26	0,23	0,50	0,24	0,29	0,67	0,63	0,63	0,22	0,63	0,50	0,32	0,62	0,56	0,17	0,27	0,25
MnO	0,00	0,04	0,03	0,03	0,01	0,02	0,13	-	-	-	0,01	0,02	0,06	0,02	-	0,02	-
MgO	0,04	0,01	0,06	0,01	-	0,14	0,08	0,02	0,02	0,07	0,05	0,01	0,06	0,09	0,03	-	0,03
CaO	8,63	6,77	0,23	8,51	8,71	0,66	0,65	0,63	7,58	0,68	0,74	7,36	0,72	0,69	8,28	6,90	7,90
Na <sub>2</sub> O	6,40	6,99	2,81	6,26	6,40	2,76	2,76	2,90	7,15	2,80	2,74	6,89	3,24	3,00	6,26	7,30	6,82
K <sub>2</sub> O	0,56	0,72	4,78	0,53	0,62	5,53	5,34	5,11	0,71	5,38	4,91	0,67	5,40	5,62	0,63	0,80	0,71
BaO	0,07	-	-	0,01	0,02	-	-	-	0,07	-	-	0,14	-	-	0,05	0,03	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,06	0,03	0,11	-	-	-	-	-	0,04	-	-	0,01	-	0,05	-	-	-
F	-	-	-	-	-	-	0,37	0,06	-	0,06	0,18	-	0,25	0,18	-	-	-
Cl	-	-	0,20	-	-	0,13	0,15	0,14	-	0,11	0,10	-	0,11	0,14	-	-	-
<b>Total</b>	<b>100,58</b>	<b>100,16</b>	<b>96,76</b>	<b>100,26</b>	<b>100,96</b>	<b>98,12</b>	<b>95,87</b>	<b>96,03</b>	<b>101,03</b>	<b>98,13</b>	<b>96,02</b>	<b>100,10</b>	<b>98,51</b>	<b>96,38</b>	<b>99,92</b>	<b>99,38</b>	<b>100,47</b>



Tabla 15. **Elementos trazas** del cristal de plagioclasa pE, de M6, medidos en LA-ICP-MS, junto con sus respectivas inclusiones. “-” indica elemento bajo el límite de detección. Unidad de medida: ppm.

Puntos	Inclusiones	P							P	3												
		C1	C2	M4	C3	C12	M10	M11		M5	C12.0	C13	M8	M9	C13.0	C13.1	C14	M6	M7	C14.0	C15	C16
Li		23	27	53	21	1	95	89	28	22		82	26	25	23		90	22	21	18		
Sc		7	6	12	8	0	9	8	5	7		8	6	5	6		8	10	7	8		
V		1	3	6	-	-	5	4	-	0		7	-	1	-		5	1	1	-		
Cr		-	-	6	-	-	-	-	2	6		-	-	-	2		-	-	-	-		
Co		1	3	3	1	0	0	1	-	3		-	-	2	1		0	1	1	1		
Ni		-	-	-	0	0	0	-	2	-		-	0	2	2		-	-	3	-		
Cu		2	2	12	2	0	3	9	1	3		2	2	3	1		19	0	0	3		
Zn		2	13	26	2	0	25	25	2	9		23	5	10	3		24	3	9	-		
Ga		30	31	12	28	1	17	15	28	29		19	30	30	31		15	30	31	31		
Rb		2	2	278	2	0	269	235	2	3		247	2	2	1		242	5	1	2		
Sr		1004	984	93	905	30	77	89	982	1032		88	959	926	922		71	906	909	963		
Y		0	0	7	-	0	12	N	0	0	N	9	0	-	-	N	8	0	0	0	N	
Zr		-	-	80	-	-	66	O	0	0	O	53	0	0	-	O	59	1	-	0	O	
Nb		-	-	10	-	-	11	11	-	0		10	-	0	-		11	0	-	-		
Pd		-	-	-	-	-	-	-	-	-	M	-	-	-	0	M	0	-	-	-	M	
Ag		1	0	-	1	0	0	E	0	1	E	-	-	1	-	E	-	0	0	-	E	
Cd		-	0	0	-	0	0	D	-	-	D	-	-	-	-	D	0	-	-	-	D	
Sn		1	1	2	0	-	2	I	1	1	I	2	1	1	1	I	2	1	1	1	I	
Cs		0	-	15	0	0	15	D	0	0	D	18	0	0	0	D	19	0	0	0	D	
Ba		245	294	270	260	8	550	O	268	291	O	428	230	256	229	O	438	229	245	277	O	
La		8	10	23	6	0	27	30	11	12		26	14	12	13		29	14	14	11		
Ce	pE	11	12	45	9	1	53	59	14	13		55	17	15	16		54	16	15	13		
Pr		1	1	5	1	0	5	5	1	1		5	1	1	1		5	1	1	1		
Nd		2	2	16	2	0	16	16	3	2		17	3	3	3		17	4	3	2		
Sm		-	-	2	-	-	2	2	-	-		2	-	-	-		2	-	-	-		
Eu		1	1	0	1	0	0	0	1	1		1	1	1	1		0	1	1	1		
Gd		-	-	2	-	-	2	3	-	-		1	-	-	-		2	0	-	-		
Tb		-	-	0	-	-	0	0	-	-		0	-	-	-		0	-	-	-		
Dy		-	-	1	-	-	1	2	-	-		1	-	-	-		1	-	-	-		
Ho		-	-	0	-	-	0	0	-	-		0	-	-	-		0	-	-	-		
Er		-	-	1	-	-	1	1	-	-		1	-	-	-		1	-	-	-		
Tm		-	-	0	-	-	0	0	-	-		0	-	-	-		0	-	-	-		
Yb		-	-	1	-	-	1	1	-	-		1	-	-	-		1	-	-	-		
Lu		-	-	0	-	-	0	0	-	-		0	-	-	-		0	-	-	-		
Hf		-	-	2	-	-	2	2	-	-		2	-	-	-		3	-	-	-		
Ta		-	-	2	-	-	1	2	-	-		1	-	-	-		2	-	-	-		
Pb		15	17	31	14	0	35	34	16	16		37	14	16	15		33	15	16	12		
Th		-	0	28	-	-	31	31	0	-		29	0	-	-		31	0	-	-		
U		-	-	9	-	-	12	11	0	0		12	0	0	-		13	0	0	0		

Tabla 16. **Elementos mayores y menores** del cristal de plagioclasa pE, de M6, medidos en microsonda electrónica, junto con sus respectivas inclusiones. “-” indica elemento no medido. Unidad de medida: %wt de óxidos.

Puntos		C39	C40	C41	C42	C43	C44	C45	C46	C47	C48
Inclusiones							M49				
Tamaño(μm)							26 x 24				
Familia							F5				
Ubicación	C	c	c	c	i	i	i	i	b	b	b
SiO <sub>2</sub>	r	56,64	57,08	58,43	55,37	56,98	57,08	79,06	58,90	59,67	61,25
TiO <sub>2</sub>	i	-	-	-	-	-	-	0,26	-	-	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	s	27,21	27,12	26,53	28,20	26,93	27,42	8,53	26,20	25,53	24,86
FeOT	t	0,31	0,26	0,27	0,27	0,25	0,28	0,83	0,26	0,23	0,21
MnO	a	0,02	-	-	0,03	0,03	0,01	0,05	-	-	-
MgO	l	0,02	0,02	0,02	0,04	0,00	0,02	0,05	-	0,01	0,00
CaO		9,85	9,21	8,28	10,57	9,07	8,98	0,40	8,09	7,23	7,54
Na <sub>2</sub> O	pH	5,83	5,92	6,66	5,47	6,17	5,77	2,24	6,24	6,68	7,00
K <sub>2</sub> O		0,40	0,47	0,56	0,35	0,47	0,57	4,46	0,62	0,83	0,70
BaO		0,01	0,06	0,05	0,03	0,03	0,07	-	0,04	-	0,06
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		0,02	-	0,06	0,00	0,02	-	-	0,05	0,03	0,01
F		-	-	-	-	-	-	0,06	-	-	-
Cl		-	-	-	-	-	-	0,13	-	-	-
Total		100,31	100,15	100,85	100,33	99,94	100,20	96,08	100,40	100,20	100,74

Tabla 17. **Elementos trazas** del cristal de plagioclasa pE, de M6, medidos en LA-ICP-MS, junto con sus respectivas inclusiones. “-” indica elemento bajo el límite de detección. Unidad de medida: ppm.

Puntos	C42	C43		C39	C39.0	C39.1	C39.2	C39.3	C40	C40.0	C40.1	C41	C41.0	C42	C43-44	C43-44.0	C43	C44	M49	C45	C46	C46.0	C47	C48	
<b>Inclusiones</b>																									
<b>Li</b>	21	1	<b>P</b> <b>e</b> <b>r</b> <b>f</b> <b>i</b> <b>l</b> <b>4</b>	20	22	24	28	31	29	30	29	32	31	38	38	39	41	46	-	42	48	44	44	39	
<b>Sc</b>	18	0		6	7	6	8	6	5	6	6	6	5	5	3	5	7	3	4	2	7	6	9	7	10
<b>V</b>	1	-		0	-	-	0	-	-	0	1	-	1	-	-	-	-	0	1	2	1	0	1	0	0
<b>Cr</b>	-	2		-	-	0	-	-	-	1	2	5	5	1	5	-	6	4	-	16	3	-	-	-	-
<b>Co</b>	3	0		1	-	0	0	1	-	-	-	1	-	-	1	2	1	-	2	-	4	1	1	4	3
<b>Ni</b>	-	0		-	3	1	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	2	1	-	-	2
<b>Cu</b>	9	0		-	-	1	0	1	0	1	-	3	0	-	-	-	2	3	6	1	11	1	4	5	7
<b>Zn</b>	-	1		10	5	5	-	4	6	6	5	4	12	13	9	3	2	2	1	16	7	13	0	8	
<b>Ga</b>	26	1		25	29	29	28	25	28	27	32	29	36	30	28	27	27	34	10	31	30	28	29	28	
<b>Rb</b>	0	0		2	2	1	1	2	1	0	0	1	1	0	1	1	2	1	14	2	1	1	1	1	
<b>Sr</b>	655	43		782	918	870	856	889	916	941	970	907	1001	925	932	890	846	904	309	895	893	891	828	904	
<b>Y</b>	-	-		-	-	0	0	-	-	0	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
<b>Zr</b>	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	
<b>Nb</b>	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-	0	-	-	
<b>Ag</b>	2	0		0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	-	1	1	0	0	0	0	1	0	1	
<b>Cd</b>	-	0		-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	
<b>Sn</b>	5	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	0	1	1	0	0	1	-	0	0	1	
<b>Cs</b>	0	0	-	0	0	0	0	0	-	0	0	-	0	0	0	0	0	1	-	0	-	0	0		
<b>Ba</b>	160	11	175	292	261	263	274	253	273	280	247	207	186	200	203	212	212	84	198	217	205	209	213		
<b>La</b>	9	1	10	13	9	11	11	13	14	15	13	16	18	16	16	14	16	6	17	18	16	17	19		
<b>Ce</b>	10	1	12		10	11	12	16	18	17	17	20	21	20	19	15	20	7	20	20	20	19	21		
<b>Pr</b>	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
<b>Nd</b>	2	0	2	2	2	2	1	3	3	3	3	3	3	3	4	2	3	1	3	3	4	4	2		
<b>Sm</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	0		
<b>Eu</b>	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1		
<b>Tm</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
<b>Pb</b>	11	1	16	16	13	14	13	15	16	16	14	17	15	14	14	14	15	8	13	15	13	15	14		
<b>Th</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	0		
<b>U</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	1	0	-	-	-		

## C.1.2. MINERAL: ANFÍBOL (a)

Tabla 18. **Elementos mayores y menores** de los cristales de anfíbol, aA, aB y aC, de M6 medidos en microsonda electrónica, junto con sus respectivas inclusiones. “-” indica elemento no medido. Unidad de medida: %wt de óxidos.

Puntos	Inclusiones	C64		C65		C72	C73		C58	C59	M60	C63				
		M66	M67	M74	M61		M62									
Tamaño(μm)		37 x 31		16 x 13			38 x 21		36 x 27			37 x 30		36 x 30		
Familia		F1		F2			F1		F2			F2		F9		
Ubicación		b	b	b	i	c	i	b	b	b	i	b	b	b	b	
SiO <sub>2</sub>	C	46,23	75,19	48,49	72,12	C	45,97	47,60	73,70	C	45,56	73,77	47,18	72,09	44,28	74,88
TiO <sub>2</sub>	r	1,58	0,03	1,23	0,01	r	1,63	1,29	0,16	r	1,69	0,06	1,39	0,01	1,59	0,15
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	i	8,22	12,24	6,48	12,53	i	8,01	6,68	12,45	i	8,64	12,51	7,56	12,72	9,26	12,82
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	s	-	-	0,01	-	s	-	-	-	s	0,03	-	0,02	-	0,01	-
FeO	t	14,82	0,73	13,59	0,56	t	14,74	13,45	0,71	t	15,03	0,63	13,82	0,52	15,61	0,85
MnO	a	0,45	0,06	0,491	-	a	0,44	0,37	0,07	a	0,45	0,06	0,42	0,09	0,38	0,01
MgO	l	12,5	0,00	14,23	-	l	13,18	14,15	0,00	l	12,77	-	13,82	0	12,32	0,02
ZnO		0,06	-	0,19	-		-	0,01	-		-	-	0,17	-	0,05	-
CaO	aA	12,02	0,6812	11,94	0,70	aB	11,76	11,93	0,80	aC	11,76	0,51	11,56	0,82	11,75	0,95
Na <sub>2</sub> O		1,24	2,84	1,21	2,91		1,15	1,20	3,12		1,33	3,65	1,49	3	1,48	3,35
K <sub>2</sub> O		0,89	5,25	0,61	4,83		0,87	0,53	5,35		1,01	5,57	0,59	5,18	1,12	5,12
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		-	0,02	-	-		-	-	-		-	0,06	-	0,10	-	-
F		0,37	0,25	0,11	-		0,17	0,29	0,06		-	-	0,28	0,67	0,11	-
Cl		0,12	0,10	0,07	0,08		0,10	0,07	0,13		0,11	0,09	0,09	0,14	0,15	0,15
Total		98,50	97,38	98,66	93,75		98,02	97,56	96,56		98,39	96,92	98,39	95,33	98,11	98,31

Tabla 19. **Elementos trazas** de los cristales de anfíbol, aA, aB, aC, de M6, medidos en LA-ICP-MS, junto con sus respectivas inclusiones. “-” indica elemento bajo el límite de detección. Unidad de medida: ppm.

Puntos Inclusiones	C64		C65		C72	C73		C58	C59		C63		
	M66	M67	M66	M67		M74	M61		M60	M62			
Li	-	-	-	-		77	68	27	46	12	94	94	31
Sc	158	39	155	189		127	26	138	2990	108	2480	115	151
V	456	41	405	565		291	41	294	42	359	54	366	677
Cr	117	8	82	166		39	10	74	1250	135	1244	126	219
Co	52	3	50	60		38	13	38	8	40	7	37	66
Ni	40	3	43	66		35	5	33	4	34	7	29	53
Cu	4	27	-	1		7	14	2	123	0	54	3	1
Zn	-	-	-	-		307	74	333	25	390	15	370	508
Ga	27	25	19	30		12	20	16	25	20	15	20	30
Rb	5	329	1	6		1	229	3	289	2	176	4	37
Sr	57	139	67	88		45	87	37	104	39	88	41	74
Y	152	30	135	208	N	99	17	159	56	113	31	129	173
Zr	49	76	68	71	O	33	65	34	65	32	69	36	76
Nb	33	14	19	31		14	13	26	19	18	16	24	46
Pd	-	0	-	-	M	-	-	-	0	0	-	0	-
Ag	1	1	-	-	E	0	-	0	0	-	1	-	1
Cd	4	1	3	4	D	-	-	0	-	3	-	1	-
Sn	15	5	7	20	I	7	2	9	7	13	4	13	23
Cs	0	21	0	1	D	-	8	0	19	-	13	-	1
Ba	54	698	50	63	O	38	450	50	567	48	434	36	96
La	54	52	40	54		26	34	48	48	37	38	36	61
Ce	196	105	153	240		101	70	191	130	142	80	152	231
Pr	33	11	23	41		17	8	33	16	24	10	26	37
Nd	156	47	128	190		95	23	166	69	131	43	129	183
Sm	39	8	31	55		23	2	44	15	34	8	37	49
Eu	-	1	-	7		3	0	5	2	4	2	4	5
Gd	34	8	33	54		18	4	38	19	32	3	32	32
Tb	6	1	5	7		4	0	6	2	4	1	5	6
Dy	29	6	30	42		16	4	35	11	26	5	25	31
Ho	6	1	5	7		3	0	6	2	5	1	5	6
Er	14	3	15	17		8	1	16	6	12	3	13	17
Tm	2	0	2	2		1	0	2	0	2	1	2	2
Yb	13	2	10	19		7	1	12	3	9	3	12	14
Lu	2	0	1	2		1	0	2	1	1	0	2	2
Hf	3	4	4	2		1	2	2	3	2	2	2	5
Ta	2	2	1	2		1	4	2	2	1	1	1	3
Pb	3	47	4	5		1	27	2	39	2	30	3	10
Th	1	46	0	1		0	24	0	32	0	28	1	4
U	0	14	0	0		0	8	0	14	0	9	0	2

Tabla 20. **Elementos mayores y menores** de los cristales de anfíbol, aF, aG y aH, de M6 medidos en microsonda electrónica, junto con sus respectivas inclusiones. “-” indica elemento no medido. Unidad de medida: %wt de óxidos.

Puntos Inclusiones	C68		C69			C24		C25			C18		C19		
	M71	M70	M71	M70		M23	M20	M21	M22						
Tamaño(µm)	45 x 31		36 x 31			11 x 5					39 x 27		91 x 52 91 x 52		
Familia	F14		F6			F1					F4		F6 F6		
Ubicación	i	b	i	i		b	c	b			i	b	b	b	
SiO <sub>2</sub>	C	45,30	75,36	47,74	74,62	C	49,02	48,13	71,19	C	46,38	74,96	48,62	76,13	75,57
TiO <sub>2</sub>	r	1,83	0,11	1,27	0,22	r	1,40	1,32	0,21	r	1,48	0,07	1,15	0,10	0,16
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	i	8,68	12,53	6,94	12,66	i	6,62	6,77	12,94	i	8,32	12,42	6,57	12,53	12,37
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	s	-		0,04		s	0,06	-	-	s	-	-	-	-	-
FeO <sub>T</sub>	t	15,18	0,95	13,68	0,80	t	12,25	13,33	2,25	t	14,49	0,68	13,66	0,68	0,62
MnO	a	0,49	0,03	0,46	0,04	a	0,28	0,46	0,05	a	0,44	-	0,40	0,09	-
MgO	l	12,33	-	13,81	0,03	l	14,89	14,29	0,26	l	13,03	0,02	14,46	0,06	0,02
ZnO		0,04	-	0,05	-		-	-	-		-	-	-	-	-
CaO	aF	11,61	0,88	11,88	0,63	aG	11,28	11,44	0,21	aH	11,4	0,75	11,85	0,76	0,81
Na <sub>2</sub> O		1,61	2,85	1,23	3,47		1,16	1,30	3,79		1,45	2,94	1,15	3,08	3,1
K <sub>2</sub> O		0,90	5,22	0,67	5,28		0,50	0,46	5,12		0,91	5,17	0,54	5,36	5,34
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		-	-	-	0,02		-	-	-		-	0,08	-	0,05	0,02
F		0,40	-	0,46	0,00		-	0,11	0,36		0,20	0,43	0,06	-	0,06
Cl		0,12	0,12	0,07	0,12		0,07	0,09	0,16		0,10	0,10	0,05	0,13	0,09
Total		98,48	98,06	98,30	97,90		97,54	97,71	96,54		98,19	97,62	98,50	98,96	98,16



Tabla 21. **Elementos trazas** de los cristales de anfíbol, aF, aG, aH, de M6, medidos en LA-ICP-MS, junto con sus respectivas inclusiones. “-” indica elemento bajo el límite de detección. Unidad de medida: ppm.

Puntos Inclusiones	C68		C69		C69.0	C24	C25		C18	C19		M22	
	M71	M70	M70	M70	M23		M20	M21					
Li	95	110	117	51		59	158	94	94		73		
Sc	123	219	182	137		54	100	135	129		7		
V	141	353	542	371		259	409	332	193		6		
Cr	28	113	151	96		48	34	17	14		4		
Co	26	36	62	37		43	92	48	52		0		
Ni	13	26	45	35		35	65	32	25		1		
Cu	7	4	2	3		-	221	16	63		7		
Zn	159	373	543	322		290	339	341	147		26		
Ga	17	22	24	19		15	25	19	22		18		
Rb	189	3	21	4		1	6	4	135		227		
Sr	79	51	67	51		51	132	43	66	N	N	87	
Y	N	65	140	250	206	N	73	122	156	68	O	O	11
Zr	O	57	41	78	56	O	36	67	41	52			61
Nb	18	21	39	30		18	23	21	19	M	M	11	
Pd	M	0	0	-	0	M	-	0	-	E	E	0	
Ag	E	1	0	-	1	E	0	0	0	D	D	0	
Cd	D	-	3	-	-	D	-	8	2	-	I	I	1
Sn	I	6	10	14	11	I	9	14	12	9	D	D	3
Cs	D	11	0	1	0	D	0	0	0	9	O	O	16
Ba	O	375	52	102	77	O	43	167	42	254			528
La	42	33	72	52		28	51	45	31				33
Ce	120	142	289	207		101	183	176	98				58
Pr	14	24	48	34		16	29	29	14				7
Nd	65	136	241	196		85	133	153	80				17
Sm	16	35	62	50		19	38	41	22				1
Eu	2	6	6	5		3	6	5	2				0
Gd	14	33	65	51		13	27	33	16				2
Tb	2	4	10	7		2	4	5	3				0
Dy	11	29	48	44		11	30	28	15				2
Ho	2	5	9	8		3	5	6	3				0
Er	6	13	22	15		8	15	14	7				0
Tm	0	2	3	2		1	1	2	0				0
Yb	4	9	18	15		7	10	12	5				1
Lu	1	2	3	2		1	2	1	1				0
Hf	2	2	4	3		2	3	3	3				3
Ta	1	1	2	2		1	1	1	1				1
Pb	25	2	7	2		3	9	3	19				36
Th	21	0	3	1		0	1	1	21				32
U	9	0	1	0		0	1	0	7				13

Tabla 22. **Elementos mayores y menores** de los cristales de anfíbol, aJ y borde de reacción de px, de M6 medidos en microsonda electrónica, junto con sus respectivas inclusiones. “-” indica elemento no medido. Unidad de medida: %wt de óxidos.

Puntos	Inclusiones	C50	C51	C52			C53		px76	anf76	
Inclusiones				M55	M56	M57	M54				
	<b>Tamaño(µm)</b>			82 x 44	82 x 44	82 x 44	20 x 20				
	<b>Familia</b>			F8	F8	F8	F7				
	<b>Ubicación</b>			b	b	b	b				
	<b>SiO<sub>2</sub></b>	46,09	46,8	44,53	75,44	76,35	74,33	48,35	73,8	47,12	47,52
	<b>TiO<sub>2</sub></b>	1,95	1,53	2,27	0,09	0,14	0,12	1,23	0,07	1,03	1,25
	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	8,2	7,07	9,33	12,14	12,38	12,23	6,63	12,16	7,40	7,29
	<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	-	-	0,01	-	-	-	0,02	-	0,04	0,12
	<b>FeOT</b>	13,97	13,78	14,55	0,68	0,721	0,67	12,99	0,74	12,72	13,17
	<b>MnO</b>	0,49	0,50	0,43	-	0,13	0,05	0,44	0,06	0,48	0,43
	<b>MgO</b>	12,88	13,65	12,54	0,01	0,05	-	14,54	0,04	14,35	14,40
	<b>ZnO</b>	0,10	0,15	-	-	-	-	0,09	-	0,07	0,00
	<b>CaO</b>	11,38	11,97	11,3	0,73	0,70	0,66	11,56	0,64	11,40	11,40
	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	1,52	1,24	1,68	2,81	3,23	2,93	1,29	2,99	1,36	1,27
	<b>K<sub>2</sub>O</b>	0,53	0,59	0,64	4,88	5,28	5,33	0,6152	5,43	0,50	0,61
	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	-	-	-	-	-	0,13	-	0,00		
	<b>F</b>	0,34	0,20	0,17	-	0,18	-	0,23	-		
	<b>Cl</b>	0,07	0,05	0,03	0,13	0,11	0,14	0,08	0,07	-	0,09
	<b>Total</b>	97,52	97,54	97,47	96,91	99,27	96,59	98,06	95,99	96,46	97,55

Tabla 23. **Elementos trazas** de los cristales de anfíbol, aJ y borde de reacción de px, de M6, medidos en LA-ICP-MS, junto con sus respectivas inclusiones. “-” indica elemento bajo el límite de detección. Unidad de medida: ppm.

Puntos Inclusiones		C50	C51	C52			C53		px76	anf76	
				M55	M56	M57	M54				
Li		-	-			-	-	-	102		
Sc		203	154			43	130	85	48		
V		321	284			63	283	169	226		
Cr		71	77			11	25	29	1051		
Co		42	34			7	40	20	55		
Ni		32	28			5	29	19	82		
Cu		0	-			4	-	14	0		
Zn		-	-			-	-	-	317		
Ga		21	17			17	17	16	18		
Rb		3	2			211	2	165	2		
Sr		48	41	N	N	N	91	43	84	54	N
Y		163	121	O	O	O	22	115	58	74	O
Zr		41	36				64	32	60	109	
Nb	C	22	18	M	M	M	12	19	16	18	M
Pd	r	-	-	E	E	E	0	-	-	-	E
Ag	i	1	0	D	D	D	1	0	0	0	D
Cd	s	-	2	I	I	I	1	-	-	2	I
Sn	t	13	13	D	D	D	4	10	7	9	D
Cs	a	-	-	O	O	O	15	0	12	0	O
Ba	l	64	52				475	46	383	34	
La		55	40				34	42	36	40	
Ce	aJ	214	161				75	155	113	156	
Pr		36	27				9	25	14	25	
Nd		185	142				30	132	66	115	
Sm		51	35				6	35	16	27	
Eu		5	4				1	3	2	4	
Gd		44	32				6	30	14	20	
Tb		6	5				1	4	2	2	
Dy		38	24				4	23	11	14	
Ho		6	5				1	5	2	3	
Er		16	13				2	11	5	8	
Tm		2	1				0	2	1	1	
Yb		12	10				2	8	5	6	
Lu		2	1				0	1	1	1	
Hf		3	2					2	2	2	
Ta		1	1					1	1	2	
Pb		3	2								
Th		0	0					30	2	24	
U		0	0						28	0	20
									11	0	9

### C.1.3. VIDRIO MASA FUNDAMENTAL (v)

Tabla 24. **Elementos mayores y menores** de vidrio de masa fundamental de M6 medidos en microsonda electrónica. Unidad de medida: %wt de óxidos.

Puntos		v18		v77
SiO <sub>2</sub>		76,43		76,68
TiO <sub>2</sub>	C	0,17	C	0,25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	r	12,36	r	12,40
FeOT	i	0,63	i	0,66
MnO	s	0,05	s	-
MgO	t	0,09	t	0,08
CaO	a	0,76	a	0,72
Na <sub>2</sub> O	l	2,98	l	3,13
K <sub>2</sub> O		5,05		5,18
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	pE	0,03	px	-
F		0,31		-
Cl		0,10		0,08
Total		98,96		99,17

Tabla 25. **Elementos trazas** de vidrio de masa fundamental de M6, medidos en LA-ICP-MS, junto con sus respectivas inclusiones. "-" indica elemento bajo el límite de detección. Unidad de medida: ppm.

Puntos		v77		v77
Li		61		71
Sc		7		11
V		5		4
Cr		12		-
Co		-		0
Ni		0		0
Cu		0		2
Zn		33		35
Ga		19		19
Rb		241		260
Sr		86		103
Y	C	9	C	10
Zr	r	66	r	65
Nb	i	11	i	11
Ag	s	0	s	0
Sn	t	3	t	3
Cs	a	17	a	19
Ba	l	544	l	603
La		33		35
Ce	pE	63	px	65
Pr		5		6
Nd		19		17
Sm		3		3
Eu		0		0
Gd		3		2
Tb		0		0
Dy		2		2
Ho		0		0
Er		1		1
Tm		0		0
Yb		1		1
Lu		0		0
Hf		3		2
Ta		2		1
Pb		37		35
Th		37		34
U		13		14

#### C.1.4. MINERAL: PIROXENO (px)

Tabla 26. **Elementos mayores y menores** de los cristales de piroxeno de M6 medidos en microsonda electrónica. “-” indica elemento no medido.

Puntos		px74	px75
Ubicación		c	b
SiO <sub>2</sub>		53,96	51,68
TiO <sub>2</sub>	C	0,17	0,21
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	r	2,38	1,91
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	i	0,27	0,10
FeO $\tau$	s	12,87	20,95
MnO	t	0,24	1,27
MgO	a	28,20	22,00
ZnO	l	0,05	0,14
CaO		1,41	0,71
Na <sub>2</sub> O	px	0,07	-
K <sub>2</sub> O		0,03	0,01
Cl		-	-
Total		99,65	98,99



Tabla 27. **Elementos trazas** del piroxeno de M6, medidos en LA-ICP-MS, junto con sus respectivas inclusiones. “-” indica elemento bajo el límite de detección. Unidad de medida: ppm

Puntos		px74	px75
Li		19	
Sc		33	
V		145	
Cr		1324	
Co		80	
Ni		173	
Zn	C	223	
Ga	r	6	N
Sr	i	0	O
Y	s	1	
Zr	t	2	M
Ag	a	1	E
Cd	l	1	D
Sn		1	I
Cs	px	0	D
Ce		0	O
Tb		0	
Ho		0	
Er		0	
Yb		0	
Lu		0	

### C.1.5. MINERAL: ÓXIDOS Fe-Ti (O)

Tabla 28. **Elementos mayores y menores** de los cristales óxidos Fe-Ti de M6, en su mayoría magnetitas, medidos en microsonda electrónica. Unidad de medida: %wt de óxidos. El signo de interrogación (?) indica que no se encontró la posición del óxido dentro del cristal.

Puntos		O91		O86	O87	O89		O92	O93		O81		O82	O83	O84	O85
Ubicación		b		i	c	b?		b	i		b		b	b	i?	i?
SiO <sub>2</sub>	C	0,09	C	0,01	0,03	0,00	C	0,06	0,10	C	0,04	C	-	0,01	0,07	0,13
TiO <sub>2</sub>	r	4,55	r	4,15	4,08	4,21	r	4,16	4,32	r	4,22	r	4,44	4,57	39,35	4,23
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	i	1,10	i	1,11	1,07	1,14	i	1,14	1,15	i	1,09	i	1,14	1,13	0,10	1,22
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	s	0,12	s	0,20	0,25	0,24	s	0,21	0,18	s	0,20	s	0,22	0,19	0,00	0,15
FeOT	t	86,19	t	86,52	86,39	87,27	t	87,75	87,22	t	86,83	t	87,21	86,29	54,54	85,37
MnO	a	0,66	a	0,71	0,63	0,79	a	0,67	0,71	a	0,70	a	0,86	0,73	1,17	0,66
MgO	l	0,71	l	0,72	0,73	0,74	l	0,72	0,74	l	0,66	l	0,65	0,81	1,52	0,64
ZnO		0,07		0,17	0,09	0,04		0,13	0,10		0,26		0,08	0,18	-	0,16
CaO	pJ	-	aA	-	-	-	aF	-	-	aG	-	aJ	-	0,01	0,12	0,11
Total		93,49		93,59	93,28	94,43		94,84	94,51		93,99		94,60	93,92	96,86	92,66

Tabla 29. Elementos trazas de óxidos Fe-Ti de M6, medidos en LA-ICP-MS, junto con sus respectivas inclusiones. “-” indica elemento bajo el límite de detección. Unidad de medida: ppm.

Puntos	O91	O86	O87	O89	O92	O93	O81	O82	O83	O84	O85
Li	18	-			1	3	2	-	-		
Sc	11	14			15	20	10	14	12		
V	3910	3650			3468	4490	2753	3416	4160		
Cr	749	1547			1399	1790	1140	1286	2034		
Co	129	80			95	116	73	89	112		
Ni	60	53			56	57	36	57	64		
Cu	74	2			2	4	1	1	2		
Zn	1940	-			1486	1900	1533	-	-		
Ga	93	66			71	91	60	69	83		
Rb	58	0			0	1	-	1	4		
Sr	74	3			0	16	3	88	2		
Y	46	4	N	N	0	22	3	5	1	N	N
Zr	35	4	O	O	4	6	3	4	7	O	O
Nb	C 8	C 5			C 6	C 7	C 5	C 5	C 7		
Ag	r 0	r 0	M	M	r 0	r 0	r 1	r 0	r 1	M	M
Cd	i 2	i 1	E	E	i -	i 0	i 0	i 0	i 0	E	E
Sn	s 19	s 13	D	D	s 12	s 20	s 14	s 15	s 17	D	D
Cs	t 6	t 0	I	I	t 0	t -	t 0	t -	t 0	I	I
Ba	a 185	a -	D	D	a -	a -	a -	a 10	a 8	D	D
La	l 120	l 13	O	O	l -	l 58	l 8	l 11	l 1	O	O
Ce	310	25			-	132	24	26	2		
Pr	pJ 31	aA 3			aF -	aG 13	aG 3	aG 4	aG 0		
Nd	122	12			-	63	9	16	1		
Sm	20	1			-	9	2	2	0		
Eu	2	0			-	1	0	0	-		
Gd	13	1			-	10	1	2	-		
Tb	2	0			-	1	0	0	0		
Dy	11	1			-	3	0	1	0		
Ho	1	0			-	1	0	0	0		
Er	4	1			-	2	0	0	0		
Tm	1	-			-	0	0	0	-		
Yb	3	0			-	1	0	1	-		
Lu	0	-			-	0	0	0	-		
Hf	1	0			0	0	0	0	0		
Ta	1	0			0	0	0	0	0		
Pt	0	-			-	-	-	-	-		
Pb	18	0			0	0	-	1	1		
Th	18	1			-	3	0	0	0		
U	7	0			0	1	0	0	0		

### C.1.6. MINERAL: APATITO (Ap)

Tabla 30. Elementos mayores y menores de los cristales de apatito de M6 medidos en microsonda electrónica. Unidad de medida: %wt de óxidos.

Puntos		Ap88		Ap90		Ap95
Ubicación		i		c		i
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		42,11		41,59		42,16
SiO <sub>2</sub>		0,28		0,27		0,40
FeOT	C	0,42	C	1,02	C	0,41
MnO	r	0,01	r	0,21	r	0,16
MgO	i	0,04	i	0,03	i	0,02
CaO	s	53,89	s	53,97	s	54,04
Na <sub>2</sub> O	t	0,09	t	0,10	t	0,08
SrO	a	0,09	a	0,02	a	0,00
F	l	1,89	l	1,77	l	1,87
Cl		0,94		0,92		0,87
SO <sub>3</sub>	aA	0,14	aC	0,12	aF	0,15
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0,18		0,18		-
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		-		0,20		0,99
Total		100,07		100,40		101,14

Tabla 31. **Elementos trazas** de apatitos de M6, medidos en LA-ICP-MS, junto con sus respectivas inclusiones. “-” indica elemento bajo el límite de detección. Unidad de medida: ppm.

Puntos		Ap88	Ap90		Ap95
Li		-			12
Sc		1			-
V		15			32
Cr		5			-
Co		1			0
Ni		4			-
Cu		2			5
Zn		-			12
Ga		1			2
Rb		0			54
Sr		471			499
Y		719			760
Zr		1			15
Nb	C	-		C	0
Pd	r	0		r	-
Ag	i	0		i	1
Cd	s	2		s	-
Sn	t	1		t	1
Cs	a	-		a	4
Ba	l	5		l	124
La		1629			1710
Ce	aA	3750		aF	4590
Pr		437			590
Nd		1796			1930
Sm		317			335
Eu		31			35
Gd		243			253
Tb		30			27
Dy		154			137
Ho		25			27
Er		60			65
Tm		8			7
Yb		48			44
Lu		6			6
Hf		-			1
Pb		6			16
Th		106			99
U		27			32

### C.1.7. MINERAL: PIRROTINA (Po)

Tabla 32. **Elementos mayores y menores** de un cristal de pirrotina de M6 medido en microsonda electrónica. Unidad de medida: %wt de óxidos.

Punto		Po80
Ubicación	C	b (de Mgt)
S	r	38,02
Fe	i	60,76
Mn	s	0,02
Cu	t	0,11
Ni	a	0,15
Co	l	0,25
Zn		0,09
Total	aG	99,39

El cristal de pirrotina no fue medido en LA-ICP-MS debido a que su reducido tamaño impidió obtener un resultado válido.

### C.1.8. MINERAL: CIRCÓN (Zrn)

Tabla 33. **Elementos mayores y menores** de un cristal de circón de M6 medido en microsonda electrónica. Unidad de medida: %wt de óxidos.

Punto		Zrn97
Ubicación		b
SiO <sub>2</sub>	C	27,19
TiO <sub>2</sub>	r	0,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	i	0,02
Fe <sub>2</sub> O <sub>3T</sub>	s	0,15
CaO	t	0,02
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	a	0,05
ZrO <sub>2</sub>	l	59,03
PbO		0,02
ThO <sub>2</sub>	Zrn	0,10
UO <sub>2</sub>		0,19
HfO <sub>2</sub>		0,84
Total		87,61

Tabla 34. **Elementos trazas** del circón de M6, medidos en LA-ICP-MS, junto con sus respectivas inclusiones. “-” indica elemento bajo el límite de detección. Unidad de medida: ppm.

Puntos		Zrn97	
Sc		154	
V		0	
Cr		1	
Zn		1	
Ga		0	
Rb		0	
Sr		0	
Y		634	
Nb	C r i s t a l	3	
Pd		221	
Ag		262	
Cd		156	
Sn		0	
Cs		0	
La		0	
Ce		28	
Pr		Zrn	0
Nd			1
Sm			2
Eu			0
Gd			11
Tb		4	
Dy		52	
Ho		19	
Er		94	
Tm		22	
Yb		223	
Lu		45	
Hf		11940	
Ta		1	
Pt		57	
Au		4	
Pb		0	
Th		354	
U		607	



## C.2. MUESTRA MA

Tabla 35. **Elementos mayores y menores** de los cristales pertenecientes a MA y sus respectivas inclusiones, medidos en microsonda electrónica. “-” indica elemento no medido. Unidad de medida: %wt de óxidos.

Puntos Inclusiones	Ubicación	p1 (San)		v2	anf10 (Bt)	p9	v4	anf5	anf6	anf7	anf8				
		M3	i	b								b	c	i	b
SiO <sub>2</sub>	C	75,92	73,91	69,64	C	36,11	C	56,30	C	72,26	45,04	46,58	46,38	C	41,41
TiO <sub>2</sub>	r	-	0,04	-	r	4,39	r	-	r	0,05	1,58	1,55	1,42	r	1,49
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	i	12,09	11,78	11,49	i	13,39	i	26,44	i	12,75	7,50	6,73	6,73	i	8,29
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	s	-	-	-	s	-	s	-	s	-	0,01	0,00	0,04	s	0,03
FeOT	t	0,69	0,10	0,11	t	16,06	t	0,18	t	0,53	13,07	13,29	13,02	t	13,59
MnO	a	0,03	0,10	0,05	a	0,23	a	0,02	a	0,03	0,34	0,35	0,42	a	0,40
MgO	l	0,07	0,11	0,12	l	13,23	l	-	l	0,05	12,89	13,33	13,34	l	11,79
ZnO		-	-	-		0,14				-	-	-	-		0,14
CaO	MA_Mx1	0,64	0,55	0,65	MA_Mx2	0,01	MA_Mx9	8,80	MA_Mx11	0,67	11,20	11,37	11,05	MA_Mx15	10,95
Na <sub>2</sub> O	San	2,66	2,75	2,64	Bt	0,43	Plg	5,82	Anf	3,10	1,06	1,26	1,09	Anf	1,27
K <sub>2</sub> O		4,80	4,91	4,98		8,90		0,45		4,47	0,64	0,65	0,73		0,86
BaO		0,26	0,55	0,65		-		0,02		-	-	-	-		-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		-	0,02	0,06		-		-		-	-	-	-		-
SrO		0,02	0,10	0,05		-		0,07		-	-	-	-		-
F		-	-	-		0,08		-		-	-	0,11	0,26		-
Cl		-	0,10	0,11		0,12		-		0,10	0,07	0,06	0,09		0,09
Total		97,19	95,03	90,55		93,10		98,09		94,01	93,39	95,29	94,55		90,30

Tabla 36. **Elementos trazas** de los minerales de MA, medidos en LA-ICP-MS, junto con sus respectivas inclusiones. “-” indica elemento bajo el límite de detección. Unidad de medida: ppm.

Puntos Inclusiones		p1 (San)	M3	v2		anf10 (Bt)		p9		v4	anf5	anf6-7	anf7		anf8
Li		59		51		5		42		63	92	12			
Sc		15		9		24		4		10	100	102			
V		8		7		356		0		3	275	305			
Cr		3		2		65		-		14	44	99			
Co		-		-		52		1		0	36	39			
Ni		1		-		38		-		1	22	27			
Cu		1		0		11		2		6	10	0			
Zn		8		24		442		2		22	59	250			
Ga		16		15		50		26		16	14	17			
Rb		236		228		510		1		213	14	3			
Sr		80		79		7		944		91	49	41			
Y		9	N	9		0		0		11	106	98	N		N
Zr		62	O	61		4		-		67	45	42	O		O
Nb	C	10		10	C	36	C	-	C	10	16	22		C	
Pd	r	-	M	0	r	-	r	-	r	-	-	-	M	r	M
Ag	i	0	E	0	i	0	i	1	i	-	-	0	E	i	E
Sn	s	2	D	2	s	5	s	1	s	2	8	8	D	s	D
Cs	t	17	I	15	t	7	t	0	t	15	1	0	I	t	I
Ba	a	504	D	469	a	2655	a	171	a	525	78	39	D	a	D
La	l	33	O	31	l	0	l	19	l	36	43	43	O	l	O
Ce		56		56		-		21		62	164	150			
Pr	MA_Mx1	5		5	MA_Mx2	-	MA_Mx9	2	MA_Mx11	5	28	24		MA_Mx15	
Nd	San	17		15	Anf	-	Plg	3	Anf	19	146	117		Anf	
Sm		2		3		-		-		3	33	25			
Eu		0		0		0		1		0	5	3			
Gd		1		1		-		-		2	32	23			
Tb		0		0		-		-		0	5	3			
Dy		1		1		-		-		2	23	18			
Ho		0		0		-		-		0	4	4			
Er		1		1		-		-		1	10	9			
Tm		0		0		-		-		0	1	1			
Yb		0		1		-		-		1	7	8			
Lu		0		0		-		-		0	1	1			
Hf		2		2		0		-		2	3	2			
Ta		1		1		1		-		2	1	1			
Pb		37		30		2		16		27	4	2			
Th		32		30		0		-		35	2	1			
U		11		11		0		-		11	1	0			

### C.3 MUESTRA MB

Tabla 37. **Elementos mayores y menores** de uno de los cristales pertenecientes a MB y sus respectivas inclusiones, medidos en microsonda electrónica. “-” indica elemento no medido. Unidad de medida: %wt de óxidos.

Puntos Inclusines		p1		
		M1	M2	
Tamaño (µm)		30 x 26	21 x 21	
Ubicación	C r i s t a l  MB_Mx1 Plg	i	b	i
SiO <sub>2</sub>		56,86	77,97	75,24
TiO <sub>2</sub>		-	0,16	0,17
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		27,23	8,35	12,07
FeO <sub>T</sub>		0,31	0,83	0,70
MnO		0,04	0,00	0,00
MgO		0,01	0,06	0,12
CaO		9,25	0,17	0,56
Na <sub>2</sub> O		5,78	2,22	2,25
K <sub>2</sub> O		0,48	3,76	6,58
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		0,05	-	-
SrO		0,10	-	-
F		-	-	0,12
Cl		-	0,19	0,17
Total	100,10	93,70	97,98	

Tabla 38. **Elementos trazas** de los minerales de MB, medidos en LA-ICP-MS, junto con sus respectivas inclusiones. “-” indica elemento bajo el límite de detección. Unidad de medida: ppm.

Puntos	Inclusiones	p1		
		M1	M2	
Li		55	157	144
Sc		6	10	9
V		0	10	9
Co		-	1	-
Ni		1	-	-
Cu		1	12	1
Zn		11	28	32
Ga		29	14	13
Rb		1	271	312
Sr		849	101	40
Y		0	12	14
Zr		-	134	123
Nb		0	15	14
Pd		-	0	-
Ag		-	0	0
Sn		0	3	2
Cs		0	21	23
Ba		153	95	278
La		18	40	53
Ce		21	61	101
Pr	MB_Mx1	1	5	9
Nd	PIg	3	15	29
Sm		-	2	4
Eu		1	0	0
Gd		0	2	2
Tb		-	0	0
Dy		-	2	2
Ho		-	0	0
Er		-	1	1
Tm		-	0	0
Yb		-	2	2
Lu		-	0	0
Hf		-	5	5
Ta		-	2	2
Pb		17	36	40
Th		-	49	53
U		-	16	16

## ANEXO D: GEOTERMOBAROMETRÍA

En este anexo se presentan las tablas completas con los resultados más numerosos de la sección 5.2 Geotermobarometría, la cual muestra un resumen de cada una.

*Tabla 39. Resultados geotermómetro Putirka (2008). En azul se indican los valores menores y en rojo, los mayores. La ecuación 27b (Putirka (2008)) está calibrada según 41 observaciones experimentales, con un error de  $\pm 30^{\circ}\text{C}$ .*

Punto	Ec27b T(°C)	Regresión global (42 experimentos) T(°C)	Punto	Ec27b T(°C)	Regresión global (42 experimentos) T(°C)
M6_pEw_C1	914	861	M6_pB_C33	934	892
M6_pEw_C2	873	830	M6_pB_C34	888	840
M6_pEw_C3	915	868	M6_pB_C35	941	890
M6_pE_C12	914	861	M6_pH_C39	931	885
M6_pE_C13	884	825	M6_pH_C40	904	850
M6_pE_C14	885	835	M6_pH_C41	956	907
M6_pE_C15	910	865	M6_pH_C42	925	872
M6_pE_C16	869	811	M6_pH_C43	929	891
M6_pE_C17	894	839	M6_pH_C44	908	869
M6_pB_C26	936	888	M6_pH_C45	884	843
M6_pB_C27	996	956	M6_pH_C46	886	832
M6_pB_C28	934	890	M6_pH_C47	857	815
M6_pB_C29	927	877	M6_pH_C48	934	891
M6_pB_C30	938	897	MB_Mx1_p1	928	885
M6_pB_C31	919	870	MA_Mx9_p9	944	893
M6_pB_C32	998	960			
<b>PROMEDIO</b>	<b>918</b>	<b>871</b>			
<b>DATO MAYOR</b>	<b>998</b>	<b>960</b>			
<b>DATO MENOR</b>	<b>857</b>	<b>811</b>			

Tabla 40-41. Resultados geotermómetro A Holland y Blundy (1994). Se muestran las temperaturas resultantes de la combinación de todos los puntos de anfíbol con plagioclasa donde, los valores varían de menor a mayor temperatura con el color de la celda. Azul indica la menor temperatura y rojo, la mayor. La presión dada en la primera fila corresponde a la calculada con los datos según Ridolfi y Renzulli (2012).

P (kbar)	1,6	1,0	1,1	1,2	1,6	1,2	2,0	1,1	1,6	1,3
Sort	M6_aH_C18	M6_aH_C19	M6_aG_C24	M6_aG_C25	M6_aJ_C50	M6_aJ_C51	M6_aJ_C52	M6_aJ_C53	M6_aC_C58	M6_aC_C59
M6_pEw_C1	776	768	709	768	793	812	840	761	815	795
M6_pEw_C2	758	752	695	752	775	794	820	745	796	777
M6_pEw_C3	777	769	709	768	793	812	841	762	815	795
M6_pE_C12	777	769	710	769	794	813	842	762	816	796
M6_pE_C13	763	756	698	756	779	798	825	749	801	781
M6_pE_C14	763	756	699	756	779	799	825	749	801	782
M6_pE_C15	776	768	709	768	792	812	840	761	814	795
M6_pE_C16	757	751	694	751	774	793	819	744	795	776
M6_pE_C17	768	761	703	761	784	804	831	754	806	787
M6_pB_C26	787	778	718	778	804	823	853	771	827	806
M6_pB_C27	810	798	734	798	827	847	882	791	852	829
M6_pB_C28	787	777	717	777	803	823	852	771	826	805
M6_pB_C29	783	775	715	774	800	819	849	768	823	802
M6_pB_C30	790	780	720	780	806	826	856	774	829	809
M6_pB_C31	777	769	710	769	794	813	842	762	816	796
M6_pB_C32	811	799	734	799	829	848	883	792	854	831
M6_pB_C33	793	783	723	784	810	829	860	777	833	812
M6_pB_C34	787	778	718	778	804	823	853	771	827	806
M6_pB_C35	764	758	700	757	781	800	827	751	802	783
M6_pH_C39	791	781	721	781	808	827	857	775	831	810
M6_pH_C40	785	776	716	776	802	821	851	770	825	804
M6_pH_C41	771	763	705	763	787	807	834	757	809	790
M6_pH_C42	795	785	724	785	812	832	863	779	836	814
M6_pH_C43	781	773	713	773	798	817	846	766	820	800
M6_pH_C44	786	777	717	777	803	822	852	771	826	805
M6_pH_C45	774	767	708	766	791	810	838	760	813	793
M6_pH_C46	765	758	700	758	782	801	828	752	803	784
M6_pH_C47	764	757	699	757	780	799	826	750	802	782
M6_pH_C48	753	748	691	747	770	789	814	741	791	772
MA_Mx9_p9	783	774	715	774	800	819	849	768	823	802
MB_Mx1_p1	788	778	718	778	804	824	854	772	827	807

Tabla 41. Continuación horizontal de la tabla 28.

P (kbar)	1,9	1,4	1,0	1,8	1,2	1,5	1,1	1,4	1,4
Sort	M6_aC_C63	M6_aA_C64	M6_aA_C65	M6_aF_C68	M6_aF_C69	M6_aB_C72	M6_aB_C73	M6_px_px76	M6_px_anf76
M6_pEw_C1	849	778	771	820	769	809	792	774	770
M6_pEw_C2	828	760	755	799	752	791	775	757	754
M6_pEw_C3	850	778	772	820	770	809	793	775	771
M6_pE_C12	851	779	772	821	770	810	793	775	771
M6_pE_C13	833	764	759	805	757	795	779	762	758
M6_pE_C14	834	765	759	805	757	795	780	762	758
M6_pE_C15	849	777	771	819	769	808	792	774	770
M6_pE_C16	827	759	754	799	752	790	774	757	753
M6_pE_C17	839	769	764	810	762	800	784	766	763
M6_pB_C26	862	789	781	832	779	819	803	784	780
M6_pB_C27	892	812	802	860	800	843	825	806	801
M6_pB_C28	862	788	781	832	779	819	802	784	780
M6_pB_C29	858	785	778	828	776	816	799	781	777
M6_pB_C30	865	791	784	835	782	822	805	787	783
M6_pB_C31	850	779	772	821	770	810	793	775	771
M6_pB_C32	894	813	803	861	802	844	826	807	802
M6_pB_C33	870	795	787	839	785	826	809	791	786
M6_pB_C34	862	789	781	832	779	819	803	785	780
M6_pB_C35	835	766	760	806	758	797	781	763	760
M6_pH_C39	867	793	785	836	783	823	806	788	784
M6_pH_C40	860	787	780	830	778	818	801	783	779
M6_pH_C41	843	772	766	814	764	803	787	769	766
M6_pH_C42	873	797	789	842	787	828	811	792	788
M6_pH_C43	855	783	776	825	774	814	797	779	775
M6_pH_C44	861	788	781	831	779	819	802	784	780
M6_pH_C45	847	776	770	818	768	807	790	773	769
M6_pH_C46	836	767	761	807	759	798	782	764	760
M6_pH_C47	834	765	760	806	758	796	780	762	759
M6_pH_C48	822	755	750	794	748	786	770	753	750
MA_Mx9_p9	858	785	778	828	776	816	799	781	777
MB_Mx1_p1	863	789	782	833	780	820	803	785	781



Tabla 42. Resultados geotermómetro Lepage (2003). Las ultimas 3 filas se trabajan con el promedio de todos los datos por punto (Average all dato for each analytical pair).

	M6_aF_O93	M6_aA_O86	M6_aG_O82	M6_aG_O83	M6_aG_O81	M6_aA_O87	M6_aA_O89	M6_pJ_O91	M6_aF_O92									
<b>Geothermometer by: Powell &amp; Powell (1977)</b>																		
<b>X'Usp &amp; X'Ilim from:</b>	T (°C)	T (°C)	T (°C)	T (°C)	T (°C)	T (°C)	T (°C)	T (°C)	T (°C)									
Carmichael (1967)	793	784	792	799	788	783	785	803	785									
Anderson (1968)	765	759	771	774	765	758	758	779	759									
Lindsley & Spencer (1982)	796	791	801	806	794	789	792	806	790									
Stormer (1983)	797	791	801	806	794	790	792	807	790									
Average:	<b>788</b>	<b>781</b>	<b>791</b>	<b>796</b>	<b>785</b>	<b>780</b>	<b>782</b>	<b>799</b>	<b>781</b>									
<b>Geothermobarometer by: Spencer &amp; Lindsley (1981)</b>																		
<b>X'Usp &amp; X'Ilim from:</b>	T (°C)	log10 fO2	T (°C)	log10 fO2	T (°C)	log10 fO2	T (°C)	log10 fO2	T (°C)	log10 fO2	T (°C)	log10 fO2	T (°C)	log10 fO2	T (°C)	log10 fO2	T (°C)	log10 fO2
Carmichael (1967)	798	-11,59	792	-11,67	797	-11,60	801	-11,54	794	-11,64	791	-11,67	792	-11,66	804	-11,51	792	-11,66
Anderson (1968)	778	-11,70	775	-11,74	782	-11,65	784	-11,63	778	-11,70	774	-11,75	774	-11,75	787	-11,59	775	-11,75
Lindsley & Spencer (1982)	799	-11,54	796	-11,58	802	-11,50	806	-11,45	797	-11,56	795	-11,60	797	-11,57	806	-11,45	795	-11,59
Stormer (1983)	799	-11,50	795	-11,55	802	-11,46	805	-11,43	797	-11,53	794	-11,56	796	-11,54	806	-11,41	795	-11,55
Average:	<b>794</b>	<b>-11,58</b>	<b>790</b>	<b>-11,63</b>	<b>796</b>	<b>-11,55</b>	<b>799</b>	<b>-11,51</b>	<b>792</b>	<b>-11,60</b>	<b>789</b>	<b>-11,64</b>	<b>790</b>	<b>-11,63</b>	<b>800</b>	<b>-11,49</b>	<b>789</b>	<b>-11,64</b>
<b>Geothermobarometer by: Andersen &amp; Lindsley (1985)</b>																		
<b>X'Usp &amp; X'Ilim from:</b>	T (°C)	log10 fO2	T (°C)	log10 fO2	T (°C)	log10 fO2	T (°C)	log10 fO2	T (°C)	log10 fO2	T (°C)	log10 fO2	T (°C)	log10 fO2	T (°C)	log10 fO2	T (°C)	log10 fO2
Carmichael (1967)	801		796		800		804		798		796		796		806		796	
Anderson (1968)	784	-12,24	781	-12,27	787	-12,20	788	-12,18	784	-12,24	780	-12,28	780	-12,28	791	-12,16	780	-12,27
Lindsley & Spencer (1982)	802	-12,12	799	-12,15	804	-12,09	807	-12,06	800	-12,13	798	-12,16	800	-12,14	807	-12,06	798	-12,16
Stormer (1983)	802	-12,09	799	-12,12	804	-12,07	806	-12,04	800	-12,11	798	-12,13	799	-12,12	807	-12,03	798	-12,13
Average:	<b>797</b>	<b>-12</b>	<b>794</b>	<b>-12,18</b>	<b>799</b>	<b>-12,12</b>	<b>801</b>	<b>-12,10</b>	<b>795</b>	<b>-12,16</b>	<b>793</b>	<b>-12,19</b>	<b>794</b>	<b>-12,18</b>	<b>803</b>	<b>-12,08</b>	<b>793</b>	<b>-12,19</b>
Average all data for each analytical pair	793	-11,82	<b>788</b>	-11,87	795	-11,80	799	-11,76	791	-11,84	787	<b>-11,88</b>	<b>788</b>	-11,87	<b>801</b>	<b>-11,74</b>	788	-11,87
<b>DATO MAYOR</b>	<b>801</b>	<b>-11,74</b>																
<b>DATO MENOR</b>	<b>788</b>	<b>-11,88</b>																
<b>PROMEDIO</b>	<b>792</b>	<b>-11,82</b>																

## ANEXO E: ERRORES ASOCIADOS A LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

En este anexo se presentan los errores asociados a los equipos de medición utilizados, EMP y LA-ICP-MS.

### E.1. MICROSONDA ELECTRÓNICA

*Tabla 43. Error asociado al análisis de elementos mediante microsonda electrónica estimado a partir del error entregado por cada punto medido. Para cada elemento se consideraron, en el promedio, los minerales con mayor abundancia del mismo. Abreviaciones: vidrio de masa fundamental (v), inclusión vítrea (incl), plagioclasa (plg), anfíbol (anf), piroxeno (px), óxido (ox), apatito (ap), circón (zrn).*

Elemento	Mineral considerado	Error (%)
Si	v-incl-plg-anf-px-zrn	0,28
Ti	ox-anf	1,42
Al	v-incl-plg-anf-px-ox	0,83
Cr	px	7,8
Fe	v-incl-anf-px-po-ox	1,85
Mn	anf-px-ox	4,1
Mg	anf-px-ox	1,15
Ca	plg-incl-v-anf-px-ap	1,78
Na	plg-incl-v-anf	1,83
K	plg-incl-v	2,17
P	ap	0,34
F	ap	2,93
Cl	ap	1,23
Zr	zrn	0,4

## E.2 ESPECTRÓMETRO DE MASAS DE ABLACIÓN LÁSER

Tabla 44. 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