



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

**PETROGRAFÍA Y GEOQUÍMICA DE XENOLITOS MANTÉLICOS DEL VOLCÁN  
AUVERNIA (PLIOCENO-PLEISTOCENO), PROVINCIA DE SANTA CRUZ, PATAGONIA  
ARGENTINA.**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO**

**MANUEL ANDRÉS VÁSQUEZ NAVARRO**

**PROFESOR GUÍA:  
Dr. DIEGO MORATA CÉSPEDES**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN  
Dr. MANUEL SCHILLING DANYAU  
Dr. FERNANDO BARRA PANTOJA**

Santiago, Julio 2012

## Agradecimientos

Agradezco a mis padres por darme la vida y la confianza para hacer lo que siempre me ha dicho mi corazón, sin el cariño que ellos me han brindado no sería posible realizar nada de lo que he realizado.

Agradezco al club de kung fu de la escuela, chung-iy-tang, club de amigos virtuosos, por toda la buena onda y paciencia que me han tenido, que a pesar de los moretones seguimos todos siendo amigos. Agradezco al profe Jaime por mostrarme que uno puede ser feliz haciendo lo que a uno le gusta, dedicando toda una vida en ello.

A toda mi familia por estar siempre presente, especialmente a mis hermanos, a mi abuelita Berta, a la Juani, el Eduardo, la tía Anita y el tío Pancho, por albergarme en su casa mientras realizaba la tesis.

A Madhe le agradezco por estar tantos años dándome buenos consejos y compartiendo las distintas etapas de la vida. A Carolina agradezco por todo el cariño y buenos momentos que me ha entregado durante los últimos cuatro años.

Agradezco a Manuel Schilling por toda la buena onda y ayuda para la realización de la tesis y por este tan maravilloso tema de trabajo, a la señora Laura del SERNAGEOMIN por la paciencia. Agradezco al profesor guía y los miembros de la comisión por las correcciones realizadas.

Agradezco a toda la gente que me ha acompañado en geología y la universidad, al grupito, que siempre han estado ahí para pasarla bien, a keru por las charlas de la vida y la inmortalidad del cangrejo, al Diego y al Eduardo por relajar y hacer bromas, a la Cata y al indio por esas tardes de guitarra, a Bip Bip y en general a todos por las tardes de taca taca. A los amigos que he forjado y que espero conservar. A María Rosa y a Blanca por todas las consultas y problemas que me han solucionado. Al compadre checho por el constante apoyo. A Moller y a Orozco por acompañarme después del incidente del taca. Al tata por ser mi amigo.

Agradezco a los litros del salesiano por estar todavía presentes con toda la alegría de siempre.

Agradezco al proyecto Fondecyt n°: 1100724 por el financiamiento dado, otorgando la posibilidad de realizar el presente estudio.

## Contenido

Resumen .....	1
1 Introducción .....	2
1.1 Xenolitos mantélicos .....	2
1.2 Geología .....	4
1.2.1 Macizo del Deseado.....	4
1.2.2 Volcán Auvernia.....	7
1.3 Hipótesis.....	9
1.4 Objetivos .....	9
2 Metodología.....	10
3 Petrografía .....	13
3.1 Descripción macroscópica .....	13
3.2 Descripción mineralógica .....	14
3.3 Mineralogía accesoria.....	16
3.4 Determinación de porcentajes de minerales.....	17
3.4.1 Determinación de porcentajes minerales a partir de secciones transparentes .....	17
3.4.2 Determinación de porcentajes minerales a partir de química de roca .....	20
3.5 Texturas.....	23
3.5.1 Definición de texturas especiales .....	23
3.5.2 Descripción de texturas en xenolitos de Auvernia.....	28
4 Geoquímica .....	35
4.1 Química de elementos mayores en roca total .....	35
4.1.1 Diagramas óxidos vs MgO.....	37
4.2 Química mineral de elementos mayores .....	41
5 Condiciones de formación .....	45
5.1 Geotermometría.....	45
5.2 Geobarometría .....	48
6 Análisis y discusión.....	50
6.1 Relaciones petrografía-geoquímica y problemas de representatividad .....	50

6.2	Química de roca total y petrografía .....	50
6.3	Clasificación de xenolitos mantélicos .....	52
6.4	Química mineral y petrografía .....	56
6.5	Geotermobarometría .....	56
6.6	Edad.....	59
7	Conclusiones .....	60
8	Referencias.....	61
METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....		66
ANEXO PETROGRAFIA .....		92

## Indice de Tablas

Tabla 1:	Detalles de medidas de xenolitos .....	12
Tabla 2:	Determinación de porcentajes modales a través de metodología experimental. ....	19
Tabla 3:	Porcentajes minerales diversas metodologías.....	21
Tabla 4:	Porcentajes para xenolitos mantélicos de Auvernia .....	22
Tabla 5:	Resumen de texturas y mineralogía accesorio.....	34
Tabla 6:	Análisis elementos mayores roca total .....	36
Tabla 7:	Análisis elementos mayores mineral .....	42
Tabla 8:	Temperaturas determinadas para distintos métodos.....	49
Tabla 9:	T-P representativos.....	56

## Indice de Figuras

Figura 1 : Localidades de xenolitos en Patagonia ( .....	3
Figura 2: Geología del Macizo del Deseado .....	5
Figura 3: Ubicación de volcán Auvernia. ....	7
Figura 4: Terreno. ....	8
Figura 5 : Imagen escaner .....	10
Figura 6: Imágenes xenolitos Auvernia.....	13
Figura 7: Microfotografías.....	14
Figura 8: Imágenes de secciones completas obtenidas a partir de escáner. ....	15
Figura 9: Microfotografías.....	16
Figura 10: Imágenes obtenidas a través de metodología experimental.....	17
Figura 11: Clasificación de xenolitos.....	22
Figura 12 : Microfotografías textura protograular. ....	24
Figura 13 : Microfotografía textura porfiroclástica .....	25
Figura 14: Microfotografías equigranular.....	26
Figura 15: Diagrama de relaciones texturales. ....	27
Figura 16: Texturas.....	29
Figura 17: Espinelas.....	30
Figura 18:Texturas de reacción. ....	31
Figura 19 : <i>Spongy rims</i> .....	32
Figura 20: Texturas de exsolución.....	33
Figura 21: Diagrama TAS. ....	35
Figura 22: Diagrama $Al_2O_3$ vs $MgO$ .....	37
Figura 23: $SiO_2$ y $CaO$ vs $MgO$ . ....	38
Figura 24: $TiO_2$ y $Na_2O$ vs $MgO$ . E .....	39
Figura 25: $Al_2O_3$ y $Fe_2O_3$ c vs $MgO$ .....	40
Figura 26: Gráfico de contenidos minerales de óxidos vs número magnésico en xenolitos.....	43
Figura 27: Gráfico de contenidos minerales de óxidos vs número magnésico en xenolitos.....	44
Figura 28: Gráfico de $Al_2O_3$ vs $MgO$ para las muestras según clasificación Mercier y Nicolas (1975).....	51
Figura 29: $Al_2O_3$ y $CaO$ vs $MgO$ . Lherzolitas y hazburgitas. ....	51
Figura 31: Diagrama P-T .....	58
Figura 32: Diagrama realizado por Griffin et al.(2003) para determinación de edades de manto. ....	59

## Indice anexo petrografia

Figura Anexo 1: Xenolito PM27A-1 .....	93,94
Figura Anexo 3: Xenolito PM27A-2 .....	95,96
Figura Anexo 5: Xenolito PM27A-4. ....	97,98
Figura Anexo 7: Xenolito PM27A-5. ....	99,100
Figura Anexo 9: Xenolito PM27A-9 .....	101,102
Figura Anexo 11: Xenolito PM27A-27.....	103,104
Figura Anexo 13: Xenolito PM27A-28.....	105,106
Figura Anexo 15: Xenolito PM27B-1A .....	107,108
Figura Anexo 17: Xenolito PM27B-1B .....	109,110
Figura Anexo 19: Xenolito PM27B-2.....	111,114
Figura Anexo 23 : Xenolito PM27B-3 .....	115,116
Figura Anexo 25: Xenolito PM27B-4.....	117,118
Figura Anexo 27: Xenolito PM27B-9.....	119,120
Figura Anexo 29: Xenolito PM27B-10.....	121,122
Figura Anexo 31: Xenolito PM27B-12A. ....	123,124
Figura Anexo 33: Xenolito PM27B-12B.....	125,127
Figura Anexo 36: Xenolito PM27B-16.....	128,129
Figura Anexo 38: Xenolito PM27B-18.....	130,131
Figura Anexo 40: Xenolito PM27B-23.....	132,133
Figura Anexo 42: Xenolito PM27B-25.....	134,136
Figura Anexo 45: Xenolito PM27B-26.....	137, 138

## Resumen

Se analizan xenolitos mantélicos hallados dentro de coladas de lava del volcán Auvernia, Provincia de Santa Cruz, Patagonia Argentina, que se encuentra sobre el Macizo del Deseado, región reconocida como un alto estructural en relación a las cuencas cretácicas de San Jorge y Magallanes (Leanza, 1958). Se analizan muestras de 21 xenolitos mantélicos, los que son clasificados a partir de una metodología experimental como lherzolitas (9), hazburgitas (11) y wherlita(1), asociados a la facies de espinela y con pertenencia al grupo 1B de lherzolita rica en Cr-Diópsido según clasificación de Pearson et al. (2005). En base a petrografía y geoquímica se definen tres grupos identificados fundamentalmente por la existencia de *spongy rims* en clinopiroxenos: El grupo 1 no presenta los *spongy rims*, y además tiene los menores contenidos de MgO y Na<sub>2</sub>O y texturas de exsolución en piroxenos. El grupo 2 presenta *spongy rims*. El grupo 3 es la muestra clasificada como wherlita y presenta los valores más altos de CaO, Na<sub>2</sub>O y TiO<sub>2</sub>, junto con los menores contenidos de MgO. A partir de comparaciones con xenolitos de localidades cercanas se asocia la creación de los *spongy rims* a un evento de metasomatismo originado por la interacción con un fundido carbonatítico derivado de la astenósfera. A partir análisis minerales se determinaron condiciones P-T entre 970-1130°C y 8.3 a 14.5 kbar, con gradientes cercanos a los 13°C/Km como condiciones a las cuales fueron extraídos los xenolitos del manto. Basado en edades modelo de 1.34 a 2.11 determinadas por Schilling et al. (2008) en localidades cercanas y diagramas propuestos por Griffin et al(2003) se le otorga una edad de Proterozoico superior-medio al manto litosférico bajo el volcán Auvernia.

# 1 Introducción

## 1.1 Xenolitos mantélicos

Los accesos a las rocas del manto se encuentran muy limitados en la superficie, registrándose ocurrencia principalmente en dos formas, macizos tectónicamente emplazados y xenolitos mantélicos. Los primeros incluyen macizos peridotíticos, complejos ofiolíticos y peridotitas hipoabisales. A través de ellos se obtiene una vasta información, mediante la observación de las relaciones de contacto entre distintas litologías y orden temporal de procesos tales como inyecciones de vetillas, reacción fundido-roca y deformación. Sin embargo, presentan el problema que al ser exhumados lentamente atraviesan múltiples procesos de reequilibrio (Bodinier y Godard, 2005). Los xenolitos mantélicos, por su parte entregan la ventaja de que se producen en ascensos rápidos, obteniéndose “fotos instantáneas” del manto litosférico bajo una región. Otra ventaja es su amplia distribución. En este sentido se encuentran trabajos compilados por Nixon (1987) que dan cuenta de más de 3.500 localizaciones alrededor del mundo. Por su contraparte, poseen la desventaja que al ser muestras puntuales del manto, generalmente de medidas centimétricas, acentúan heterogeneidades y producen dificultades para determinar la composición de roca total además de las relaciones de contacto entre las distintas litologías presentes (Pearson et al., 2005).

Los xenolitos mantélicos son encontrados en tres tipos de roca: lamprófiros, kimberlitas y basaltos alcalinos, siendo los últimos los más comunes. A su vez son agrupados según el régimen en el que se encuentren, pudiéndose encontrar xenolitos en rocas oceánicas y continentales, dentro de los que se diferencian los xenolitos de zonas cratónicas, circun-cratónicas y no cratónicas. Clasificaciones de diferentes subtipos han sido realizadas por Harte y Hawkesworth (1989) y Pearson et al.(2005) en función de la mineralogía, condiciones de formación y número de magnesio (#Mg).

La mineralogía principal de los xenolitos corresponde a olivino (Ol), clinopiroxeno (Cpx) y ortopiroxeno (Opx); existiendo además minerales como plagioclasa (Plg), espinela (Sp) y granate (Gte) que evidencian la pertenencia a facies del manto y son respectivamente estables a condiciones crecientes de presión y temperatura. Condiciones de metasomatismo pueden ser evidenciadas por minerales hidratados como anfíbol y mica flogopita. La presencia de sulfuros de hierro, níquel y cobalto como mineralogía accesoria es importante pues concentran elementos calcófilos y siderófilos.

Estudios recientes de xenolitos mantélicos realizados en localidades cercanas al volcán Auvernia corresponden a los de Cerro Redondo (Schilling et al, 2005), Tres Lagos (Ntaflos et al, 2007), Gobernador Gregores (Gorring y Kay, 2000a, Aliani et al., 2004, Laurora et al, 2001, Scambelluri et al, 2009), Pali Aike (Wang et al., 2008, Kempton et al. 1999a,b, Stern et al., 1999) y Cerro Fraile (Kilian y Stern, 2002). Algunos dan cuenta de distintos tipos procesos de metasomatismo. Existiendo ejemplos de metasomatismo carbonatítico asociado a la astenósfera (Gorring y Kay, 2000a), metasomatismo de fundido-silicatado asociado al slab subductado (Laurora et al., 2001), metasomatismo adakítico (Kilian y Stern, 2002) y metasomatismo asociado a la infiltración e interacción con el basalto hospedante (Schilling et al., 2005). Estudios que abarcan distintas localidades incluyendo alguna de las mencionadas son realizados por Rivalenti et al. (2004), Bjerg et al. (2005), Conceição et al. (2005) y Schilling et al. (2008).

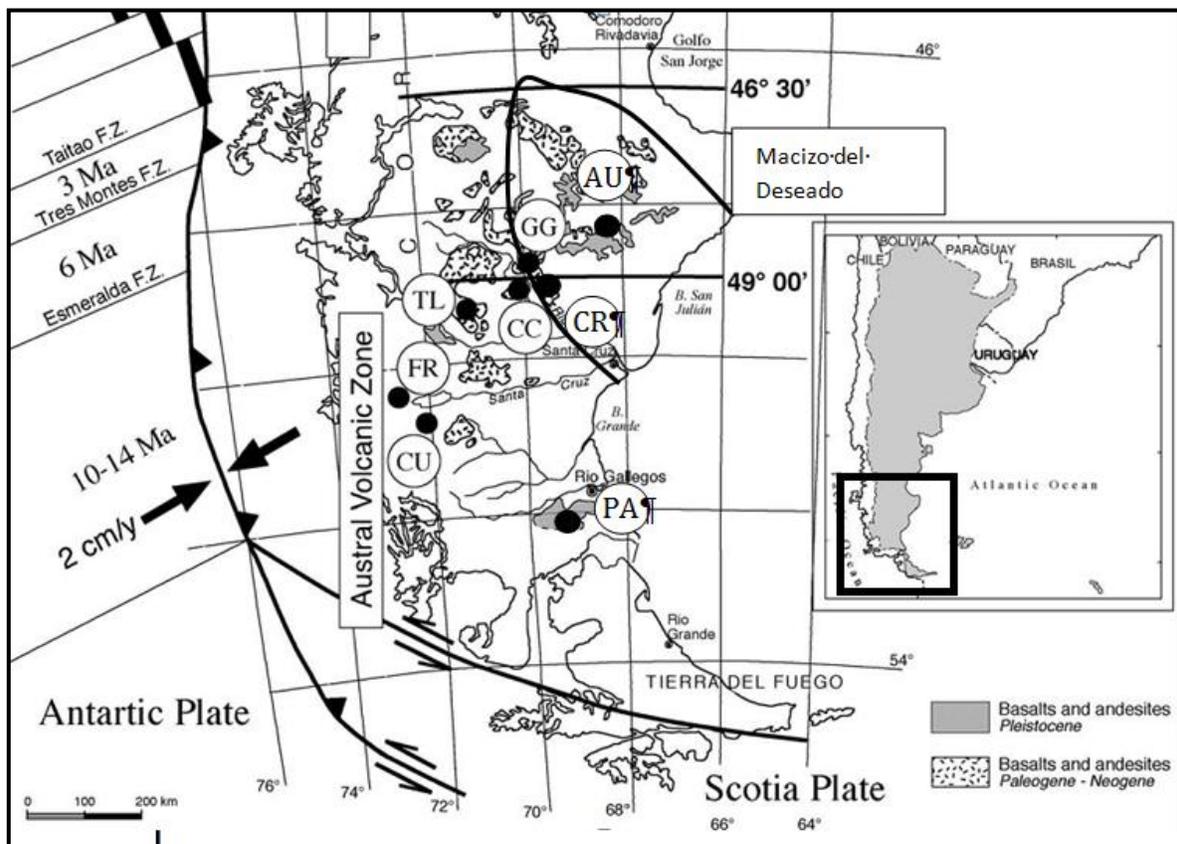


Figura 1 : Localidades de xenolitos en Patagonia (bajo 46° latitud sur); modificado de Rivalenti et al. (2004); CU: Cerro Cumbres, CR: Cerro Redondo y CC: Cerro Cuadrado de (Rivalenti et al. (2004), FR: Cerro Fraile, TL: Tres Lagos, GG: Gob. Gregores, PA: Pali Aike, AU: Auvernia.

## 1.2 Geología

### 1.2.1 Macizo del Deseado

El Macizo del Deseado (Leanza, 1958) corresponde a una región geológica de 60.000 km<sup>2</sup> localizado en la provincia de Santa Cruz, Argentina. Está limitado al norte y al sur por los ríos Deseado y Chico, siendo un alto estructural en relación a las cuencas cretácicas de San Jorge y Magallanes. Un resumen de los mayores procesos tectónicos acontecidos en el Macizo del Deseado durante el Fanerozoico se puede encontrar en Giacosa et al.(2010).

El basamento de la región Macizo del Deseado está compuesto por 5 afloramientos en el este y 3 en la zona oeste. Los primeros son identificados según sus localidades como Tres hermanas, Dos hermanos, Bajo la Leona, El Laurel-El sacrificio y Bahía Laura (Figura 2). Estos corresponden a metareniscas, filitas, metacuarcitas y esquistos ricos en calcio, interpretados como sedimentos marinos y agrupados en el Complejo Río Deseado por Giacosa et al (2002), con una edad de sedimentación determinada por Pankhurst et al.(2003) de 580 Ma. Se encuentran intruidos por cuerpos sub alcalinos foliados de edades U-Pb entre 422 y 346 Ma (Pankhurst et al, 2003), correspondientes a granodioritas, tonalitas de biotitas, de horblenda y granitos de muscovita asociados a un arco volcánico (Ramos, 1983, Guido et al., 2004). Por la parte oeste del macizo se tiene como basamento a la Formación La Modesta, de edad cámbrica determinada por relaciones de contacto por Stipanovic et al. (1968). La Formación la Modesta incluye los afloramientos ubicados en El Tranquilo y La Modesta-La Josefina, los que se encuentran afectados por un metamorfismo de muy bajo grado y son caracterizados como esquistos muscovíticos, esquistos cuarzo cloríticos, metacuarcitas, rocas esquistosas ricas en turmalina, bancos de óxidos de Fe y Mn, y en sectores presencia de metavolcanitas intercaladas. Esta formación se habría depositado en una cuenca de antearco protopacífica desarrollada durante la exhumación del Complejo Río Deseado durante el Silúrico-Devónico (Moreira et al, 2005) .

Durante el Pérmico se produjo una etapa de rifting en la región (Homovic y Constantini 2001), con la creación de la cuenca la Golondrina, sobre el Complejo Río Deseado por un contacto de discordancia angular. Caracterizada por areniscas, conglomerados polimícticos e intercalaciones pelíticas es asociada a un ambiente de facies fluviales continentales (Palma y Ubaldón , 1988). La etapa extensional se prolongó hasta fines del Triásico, donde fue depositada la Formación El Tranquilo durante un evento de subsidencia termal (Cortiñas et al.,2005).

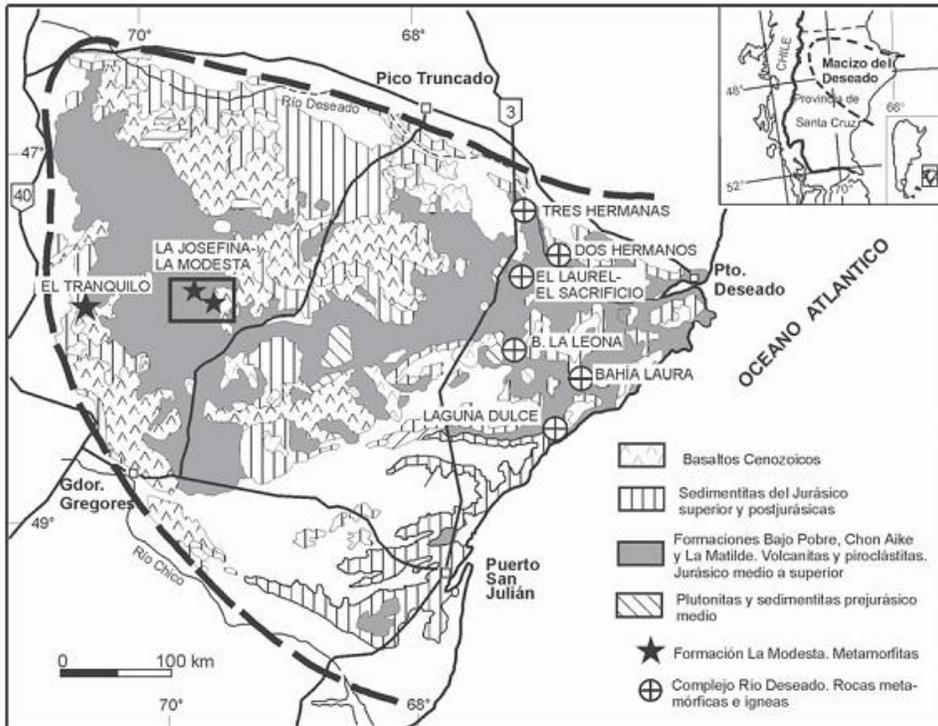


Figura 2: Geología del Macizo del Deseado, ubicación de afloramientos de basamento y unidades geológicas principales. Imagen modificada de Moreira et al. (2005)

A partir del Jurásico se tiene un nuevo evento de rifting, el cual es registrado en los grandes eventos magmáticos de la Formación Bajo Pobre, caracterizada por coladas de lava básicas, y el Grupo Bahía Laura, integrado por la Formación Chon Aike y Formación La Matilde, las que presentan magmatismo riolítico, depósitos tobáceos y volcanitas, además de complejos de domos como La Josefina y María Esther que son evidencia clara de un magmatismo bimodal (Moreira et al., 2005). Durante este periodo se contó con la generación de múltiples depósitos epitermales de oro y plata explotados hoy en la región (Fernández et al, 2008). El ciclo termina con los depósitos de la Formación Bajo Grande correspondientes a areniscas, tobas y conglomerados de origen epi-piroclásticos asociados a un ambiente aluvial. Durante inicios del Cretácico se tiene un evento compresivo que provoca la inversión de estructuras extensivas en sectores localizados de las cuencas. Este evento es sincrónico a un pulso de aceleración de la convergencia del fondo oceánico (Larson, 1991).

Sobreyaciendo a la Formación Bajo Grande y en discordancia angular se encuentran los depósitos de flujos piroclásticos proximales y tobas, con intercalaciones de areniscas de la Formación Baquero y Formación Laguna Palacios, sincrónicos al desarrollo de una cuenca de intraarco en la cordillera Patagónica durante el Cretácico medio (Ramos, 1979). Este periodo se habría extendido hasta el fin del Cretácico, donde las fuerzas extensionales habrían producido el fracturamiento y basculación, junto con la reactivación de fallas pre-existentes (Figari y Courtade, 1993), disminuyendo el espesor cortical y

generando una posterior subsidencia termal, episodio que dio origen al Grupo Chubut, compuesto por las Formaciones Matasiete, Castillo, Bajo Barreal, Cerro Barsino y Laguna Palacios (Lesta y Ferello 1972), caracterizadas por conglomerados, areniscas, fangolitas e intercalaciones tobáceas, predominando en sectores los componentes piroclásticos sobre los epiclásticos.

Desde el Paleógeno al presente se tiene una gran actividad volcánica relacionada con procesos tectónicos que acontecen en la región pacífica adyacente y que marcan la interacción de las dorsales sísmicas con la trinchera oceánica (Ramos, 2002). La actividad volcánica es caracterizada por la presencia de basaltos de *plateau* alcalinos de trasarco, pudiendo encontrarse un resumen de ésta por Panza y Franchi (2002). Las efusiones más importantes del mencionado periodo corresponden a las que comprenden desde el Mioceno al Pleistoceno, generadas durante el proceso de colisión entre el ridge y la fosa chilena en el punto triple a los 12 Ma, (Ramos y Mahbulrg, 1992, Gorrng y Kay, 2000b), las que son agrupadas por Gorrng y Kay (2000b) en una secuencia plateau toleítica voluminosa de 12-5 Ma y una secuencia post-plateau alcalina de 7-2 Ma. Es en esta última secuencia, de edad Plioceno superior-Pleistoceno inferior donde se encuentran las coladas de lava del área de estudio.

### 1.2.2 Volcán Auvernia

El volcán Auvernia ( $48^{\circ} 25.06'$ ,  $68^{\circ} 09.83'$ ) se ubica sobre el Macizo del Deseado, Provincia de Santa Cruz, Patagonia Argentina. Este centro efusivo se encuentra a 550 km de la fosa oceánica, al este del GAP volcánico asociado a la colisión de la dorsal de Chile, que separa la Zona Volcánica Sur y Austral entre los  $46^{\circ}$  y  $49^{\circ}$  latitud sur (Figura 3).

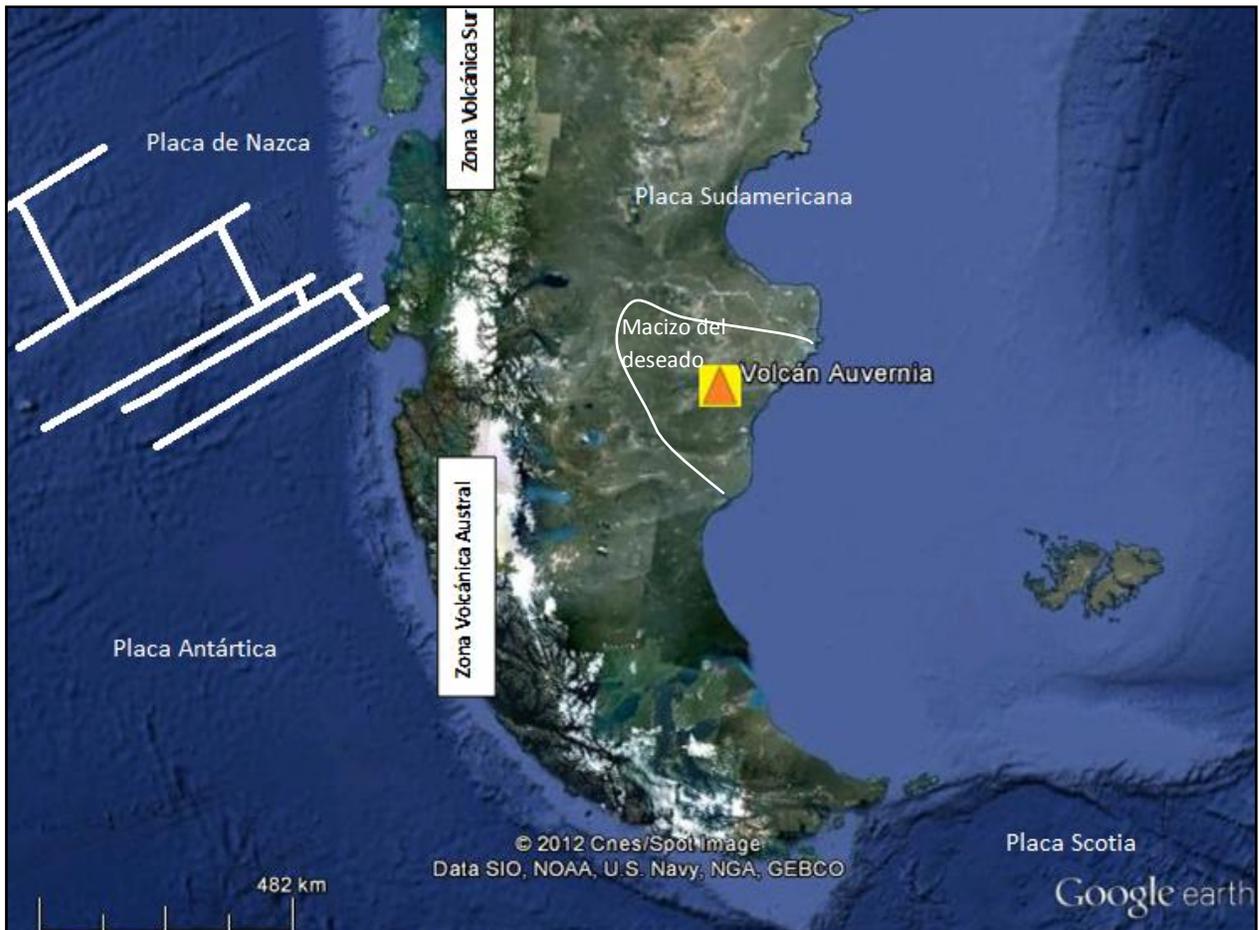


Figura 3: Ubicación de volcán Auvernia. Imagen obtenida de Google Earth.

El centro de emisión corresponde a un cono piroclástico de aproximadamente 40m de alto, erosionado pero conservando la forma de cráter. Las coladas de lava alcanzan extensiones de hasta 18 km, con anchos de entre 6 a 8 km y espesores entre 2 a 4 metros. Las rocas que conforman las coladas son basaltos de olivino melanocráticos, compactos, bien conservados y con textura vesicular.

Los xenolitos mantélicos se recolectaron en dos sitios asociados a las coladas de lava del volcán Auvernia (Figura 4B) ubicados a 3.5 km de distancia entre cada uno (Figura 4A). Los xenolitos se encontraban bien expuestos en las coladas basálticas (Figura 4C), sin orientación aparente y en ocasiones mostraban un color rojizo. Las características particulares se examinarán más adelante.

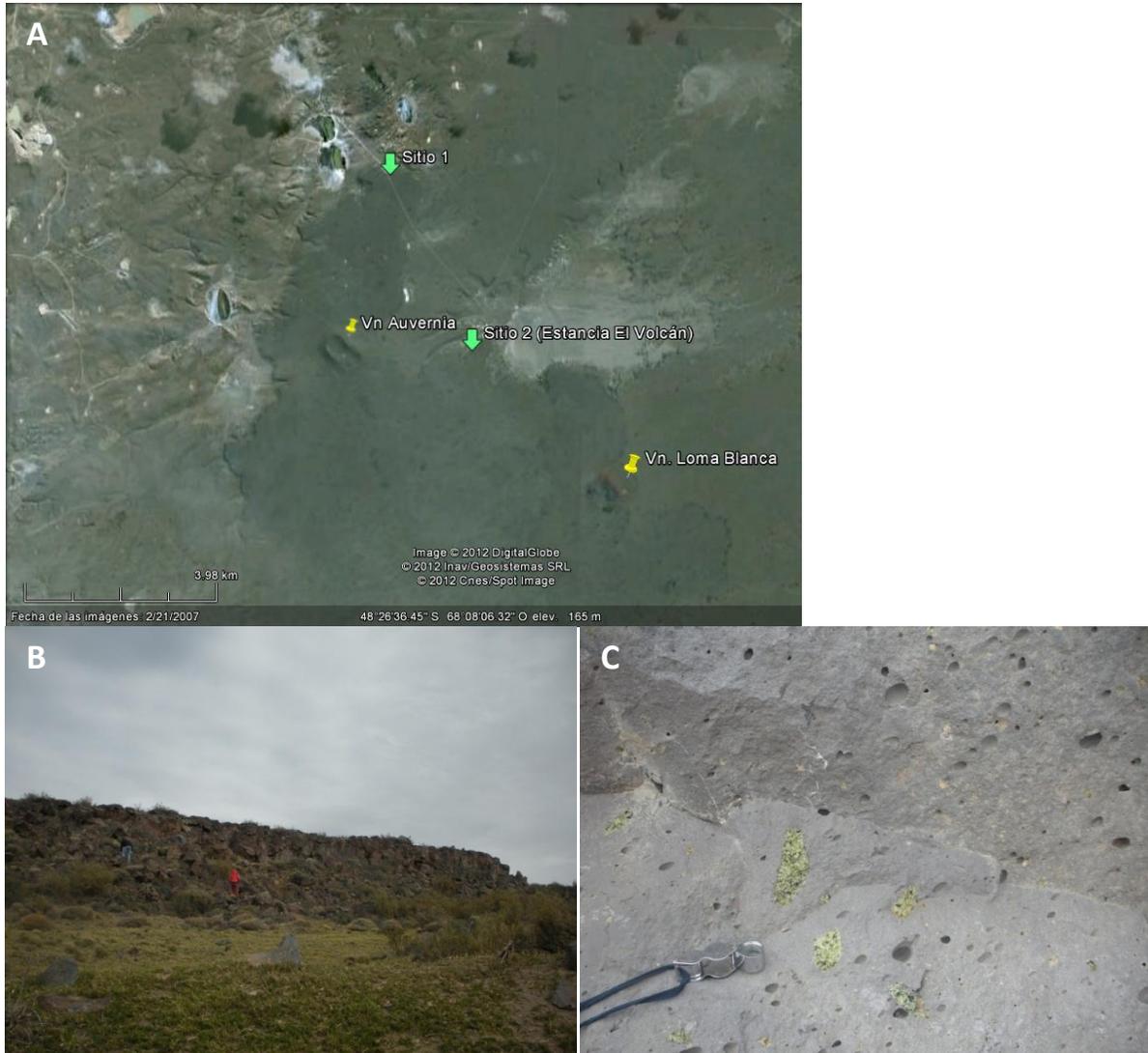


Figura 4: (A) Ubicación de sitios de recolección de xenolitos en coladas de lava de Auvernia. (B) Afloramiento de sitio 1 en que se encontraron los xenolitos. (C) Imagen del xenolito *in-situ*.

### 1.3 Hipótesis

Las características petrográficas y geoquímicas de los xenolitos mantélicos del volcán Auvernia evidencian procesos ocurridos en el manto litosférico subyacente.

### 1.4 Objetivos

#### *Objetivo general.*

- El objetivo general de este estudio es contribuir a la comprensión de la génesis y evolución del manto litosférico bajo el volcán Auvernia.

#### *Objetivos específicos.*

Para cumplir el objetivo principal se procederá a cumplir los siguientes objetivos específicos:

- A) Clasificación de los xenolitos mantélicos a través de relaciones texturales y composicionales.
- B) Determinación de eventos de fusión parcial y condiciones de metasomatismo en el manto litosférico.
- C) Estimación de condiciones de P y T de las cuales fueron obtenidos los xenolitos en equilibrio desde el manto litosférico.

Para el cumplimiento de los tres objetivos específicos se realizará el siguiente procedimiento:

El objetivo A): Se realizará a través de caracterizaciones petrográficas poniendo especial énfasis en mineralogía y texturas. Se obtendrán porcentajes de minerales para clasificación de las muestras mediante la realización de una metodología experimental, la que será contrastada con análisis de conteo modal y porcentajes determinados a través de la química de roca.

El objetivo B): Se realizará mediante el análisis petrográfico y geoquímico de los xenolitos mantélicos, tomando atención en texturas que evidencien procesos de fusión parcial y metasomatismo.

El objetivo C): Se realizará en función a las asociaciones mineralógicas en equilibrio presentes en las muestras, junto con el uso de geotermómetros y geobarómetros en base a análisis químicos minerales, con el fin de determinar cuantitativamente las condiciones de presión y temperatura.

## 2 Metodología

Se tomaron registros fotográficos y de las dimensiones de los xenolitos mantélicos contenidos en el basalto hospedante, estos que se detallan en la Tabla 1.

Para la separación de los xenolitos de la roca caja se empleó una sierra de diamante en las dependencias del laboratorio del SERNAGEOMIN, separando una superficie para la realización de secciones delgadas y un resto de muestra de xenolito para análisis geoquímicos. Dado que al cortar las muestras el material del xenolito se mezclaba con el basalto hospedante se empleó una lupa para separar y eliminar el material basáltico antes de preparar los polvos para análisis.

Se realizaron cortes transparentes pulidos de 90  $\mu\text{m}$ , más gruesos que los estándar de 30  $\mu\text{m}$  para poder emplearse en futuros estudios análisis de ICP-LA. Estos fueron elaborados en los laboratorios del SERNAGEOMIN y del Departamento de Geología de la Universidad de Chile. Las diversas secciones transparentes y su lugar de preparación se detallan en la Tabla 1. Posteriormente se escanearon en un escáner *EPSON STYLUS PHOTO RX520 Series*, adaptado para diapositivas, obteniéndose como resultado imágenes de la sección transparente completa con colores similares a los observados a nícoles paralelos (Figura 5).

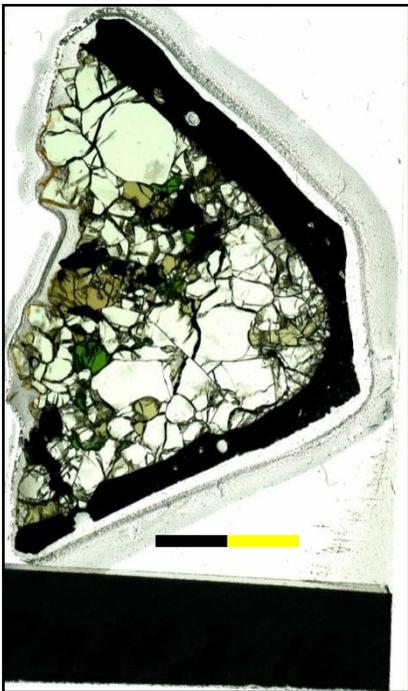


Figura 5 : Imagen del xenolito PM27B-16 obtenida por el escáner EPSON en modo diapositiva. Barras de escala 0.5 cm.

Se realizaron análisis petrográficos de las secciones transparentes con luz transmitida y reflejada en la unidad petrográfica del laboratorio del SERNAGEOMIN, empleándose un microscopio *Olympus BH2-UMA/BHSP* mediante el software *Micrometrics SE Premium* para cámara digital.

Se estimaron porcentajes minerales en los xenolitos mantélicos a partir de las secciones transparentes mediante dos metodologías: Un análisis conteo modal para las 21 muestras, efectuado en las dependencias del Departamento de Geología de la Universidad de Chile. Mientras que la segunda es una metodología experimental empleando los programas *ENVI 4.7* y *PHOTOSHOP*.

El material destinado para geoquímica fue molido en un mortero de ágata. Los pesos de los polvos de roca obtenidos se detallan en la Tabla 1.

Se realizaron análisis químicos de elementos mayores para roca total(15 muestras) y mineral(3 muestras). Los primeros fueron efectuados en el laboratorio del SERNAGEOMIN por un espectrómetro de fluorescencia de rayos X, de longitud dispersiva secuencial, modelo *AXIOS ADVANCE*, Marca Analytical , tubo de Rodio de 4KW, colimadores 150 $\mu$ m, 300 $\mu$ m y 700 $\mu$ m, Detectores Scint.(Centelleo), *Flow*(Flujo) y *Duplex*, Filtros *Brass 300*, *Al750*, *Al200*. Mientras que los análisis de química mineral fueron hechos en el laboratorio de Geofísica del Carnegie Institution of Washington, en una microsonda electrónica modelo *Jeol 8900L*, con condiciones analíticas 15 keV y 30 nA.

Se estimaron porcentajes minerales a partir de la química de roca mediante dos metodologías: El primer método basado en la norma CIPW que emplea solamente los elementos mayores de roca total, mientras que en el segundo se emplea además la química mineral llamado el método de mínimos cuadrados.

Tabla 1: Detalles de medidas de xenolitos (cm), peso de roca (g) después de molienda y cantidad de secciones transparentes con su laboratorio de realización

	Ancho Trozo 1	Alto Trozo 1	Largo Trozo 1	Ancho Trozo 2	Alto Trozo 2	Largo Trozo 2	Ancho Trozo 3	Alto Trozo 3	Peso Muestra molida	N° secciones transparentes (lab)
PM27-B1 A	2.5	2.0		2.5	2.0				2.09	1(SERNAG.)
PM27-B1 B	3.0	1.5		3.0	1.5				11.19	1(SERNAG.)
PM27-B2	5.0	3.0	2.0						8.01	1(SERNAG.)
PM27-B3	2.0	2.0	0.5						6.35	3 (U. de Chile)
PM27-B4	4.0	3.0	0.5						-	1(SERNAG.)
PM27-B9	3.0	2.0	1.0						4.10	1(SERNAG.)
PM27-B10	3.5	1.5	1.0						4.37	1(SERNAG.)
PM27-B12 A	1.0	1.0	0.1	2.5	2.0	0.1	1.0	1.0	2.92	1 (U. de Chile)
PM27-B12 B	4.0	2.0		3.5	2.0	0.1			7.49	2 (U- de Chile)
PM27-B16	6.5	3.5		5.5	2.5				4.93	1(SERNAG.)
PM27-B18	3.0	1.5	0.5						4.70	1(SERNAG.)
PM27-B23	2.5	3.0	0.3						1.60	1 (U. de Chile)
PM27-B25	3.0	1.0	0.1						2.13	2 (U- de Chile)
PM27-B26	3.0	3.0							6.24	1(SERNAG.)
PM27A-1	3.0	2.0	1.0						6.11	1(SERNAG.)
PM27A-2	3.0	1.5	0.5						0.97	1(SERNAG.)
PM27A-4	3.0	2.0							2.96	1(SERNAG.)
PM27A-5	2.0	2.0							2.12	1(SERNAG.)
PM27A-9	3.0	2.5	1.0	2.5	1.0				4.00	1(SERNAG.)
PM27A-27	2.0	1.0	1.0						2.16	1(SERNAG.)
PM27A-28	2.0	1.5							-	1(SERNAG.)

### 3 Petrografía

#### 3.1 Descripción macroscópica

Los xenolitos mantélicos del volcán Auvernia presentan tamaños pequeños, midiendo en promedio menos de 4 cm y alcanzando el mayor 6.5 cm de largo. El contacto con el basalto hospedante es recto. Los detalles de las medidas de los diversos xenolitos se encuentran en Tabla 1, en el capítulo anterior.



Figura 6: Imágenes de distintos xenolitos encontrados en Auvernia. Barras de escala 1 cm cada una.

### 3.2 Descripción mineralógica

La mineralogía predominante corresponde a olivino, ortopiroxeno, clinopiroxeno y espinela, con tamaños que varían de 0.5 a 7 mm, generalmente en orden descendente de dimensiones  $Ol > Opx > Cpx > Sp$ . Existe presencia de mineralogía accesoria correspondiente a sulfuros, con tamaños que alcanzan los 60  $\mu m$ . Los bordes entre todos los cristales son nítidos y ligeramente curvos.

Debido al grosor de los cortes no se pudo observar el clivaje y ángulo de extinciones en la mayoría de los minerales, por lo cual la identificación mineralógica se realizó en función de los colores característicos apreciados con luz transmitida a nícoles paralelos. El olivino es incoloro, el ortopiroxeno café con pleocroísmo verde-café, y el clinopiroxeno verde esmeralda oscura. La espinela es isótropa, generalmente en asociación a orto y clinopiroxeno. Diferencias de minerales también se aprecian a luz reflejada y nícoles paralelos, observándose al olivino como una superficie porosa, mientras que los piroxenos poseen una superficie lisa. La espinela presenta un color gris claro y un buen pulido (Figura 7A,B).

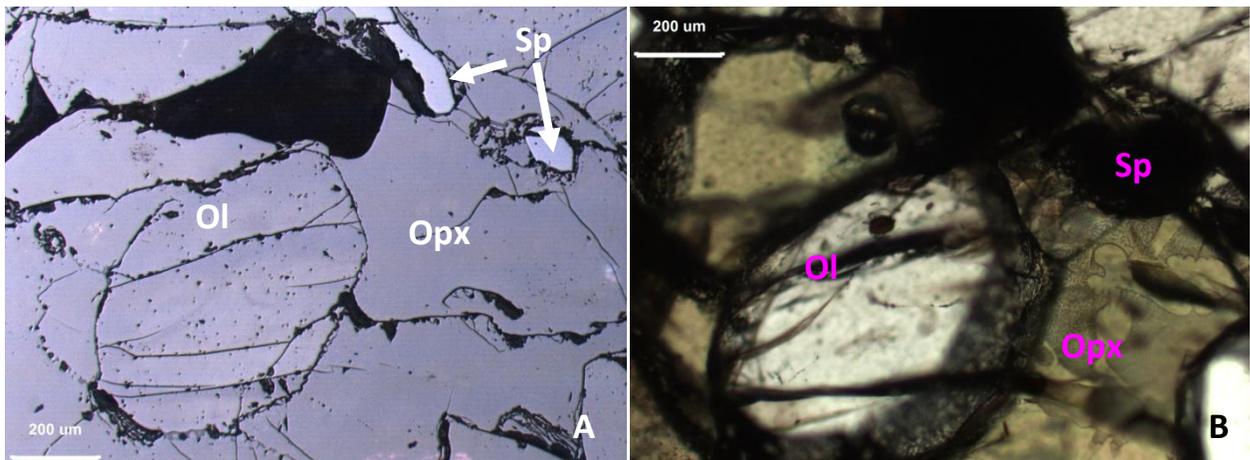


Figura 7: Microfotografías obtenidas a (A) luz reflejada, olivino poroso (Ol), ortopiroxeno liso (Opx), espinela (Sp) isótropa y buen pulido. (B) Luz transmitida, nícoles paralelos.

Se observan infiltraciones de basalto en diversas secciones, las cuales alcanzan anchos de hasta 1.5mm. Estas se dan generalmente en los bordes, cruzando completamente el xenolito y ocasionalmente como múltiples infiltraciones abarcando casi la totalidad del xenolito (p.e. PM27B -2b, PM27B-2c, ver Figura 21,22, Anexo petrografía).

Cabe destacar que al tratarse de secciones más gruesas en ocasiones se observan minerales bajo la superficie del corte que no se aprecian con luz reflejada. Así si una espinela se encuentra en profundidad

y se observa con luz transmitida se aprecia un sector extinto, sin embargo si la misma área es reconocida con luz reflejada se aprecia la superficie del mineral que está encima.

La distribución de los minerales en la mayoría de los cortes es heterogénea, teniéndose concentraciones de minerales en sectores del corte.

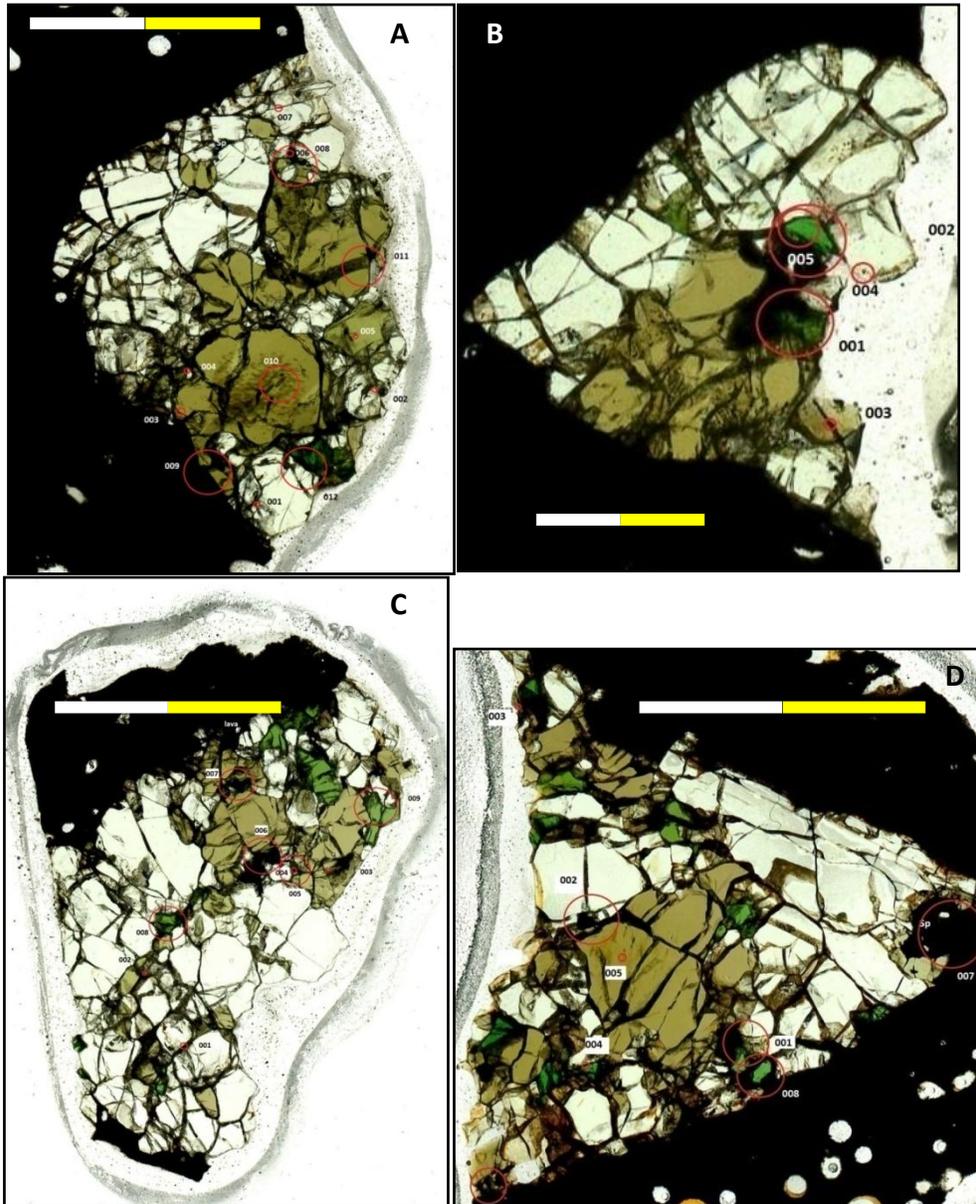


Figura 8: Imágenes de secciones completas obtenidas a partir de escáner. Barra de escala 0.5 cm., en B) 0.25 cm. Se aprecian heterogeneidades dentro de los xenolitos, principalmente dada por concentración de ortopiroxenos (café).

### 3.3 Mineralogía accesoria

En los xenolitos estudiados se reconoce presencia de sulfuros como mineralogía accesoria, alojados principalmente en ortopiroxeno, clinopiroxeno y olivino, pudiendo encontrarse también en espacios entre cristales e infiltraciones de basaltos. Los más frecuentes son sulfuros de Fe, Ni y Co, con tamaños que varían desde pocos  $\mu\text{m}$  a  $60 \mu\text{m}$  (Figura 9A, B), pudiendo encontrarse en diversos sectores como pequeñas burbujas orientadas (Figura 9 C).

Dependiendo de la zona que se encuentren los sulfuros se dividen en primarios o sulfuros secundarios. Los sulfuros secundarios se encuentran en zonas de reacción (Figura 9D) y están asociados al evento que la produce, mientras que los primarios se encuentran en zonas al centro de los minerales. Los sulfuros de mayor tamaño encontrados corresponden a estos últimos.

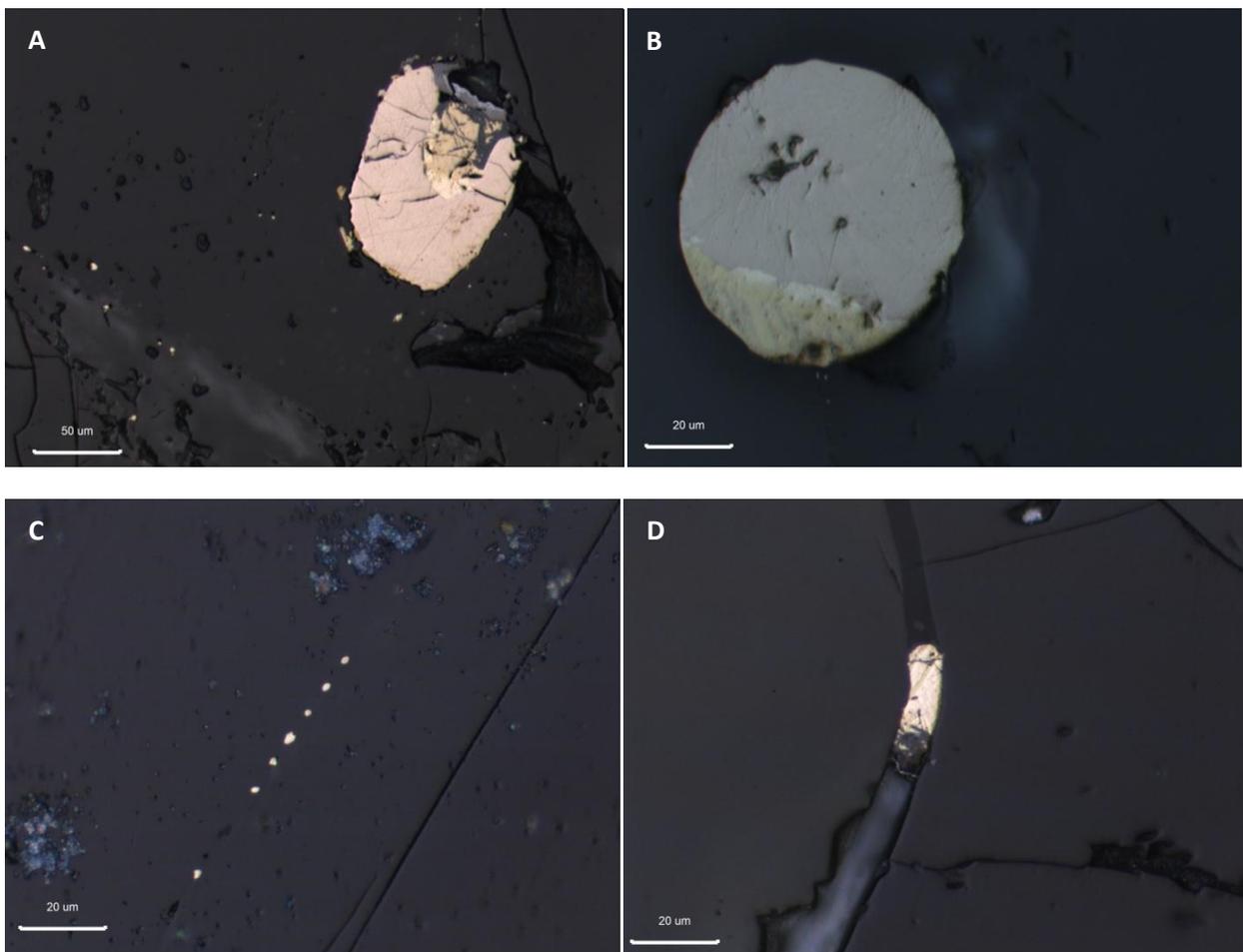


Figura 9: Microfotografías obtenidas con luz reflejada. (A) y (B), sulfuros más grandes hallados en xenolitos de Auvernia. (C) Sulfuros alineados como pequeñas burbujas en Ol. (D) Posible sulfuro secundario en una zona de reacción en Opx.

### 3.4 Determinación de porcentajes de minerales

Con el fin de comparar resultados y dado que se propone una metodología experimental para la determinación de porcentajes se emplean cuatro métodos distintos; dos de ellos determinados a través de secciones transparentes (por ende abarcando un área del xenolito), se incluye aquí el método experimental. Los otros dos son realizados a partir de la química de roca (abarcando un volumen de muestra).

#### 3.4.1 Determinación de porcentajes minerales a partir de secciones transparentes

##### 3.4.1.1 Metodología experimental

Debido que los minerales de los xenolitos mantélicos en las imágenes obtenidas a través del escáner EPSON presentan colores característicos y similares a lo observado a nícoles paralelos se empleó el programa ENVI 4.7 para reconocerlos. Ocupando dos funciones del programa llamadas *Support Vector Machine* (SVM) y *Neural Net* (NN) se obtienen resultados como los de la Figura 10. En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos junto con los de la metodología del conteo modal. Los detalles de la realización de la metodología experimental se detallan en el Anexo metodología experimental.

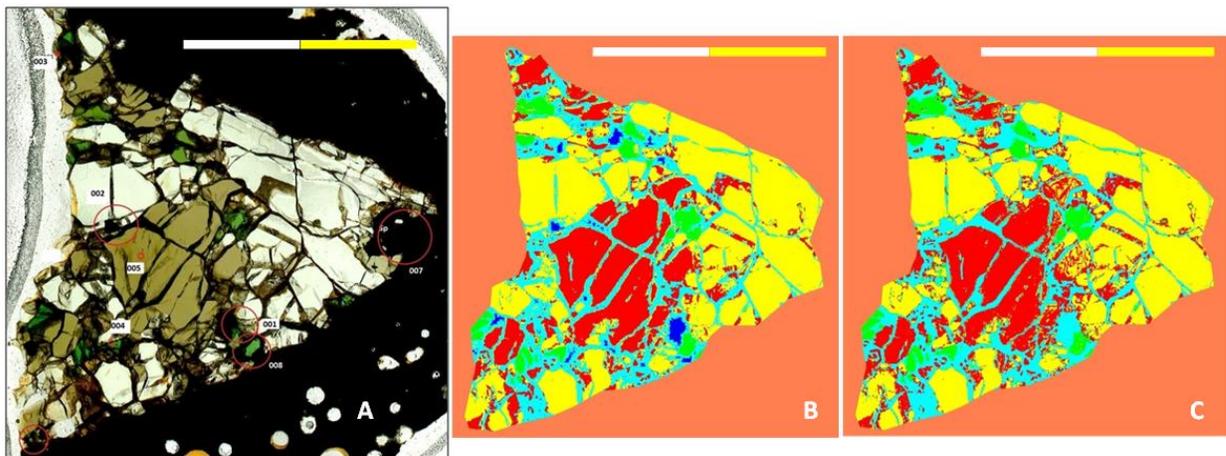


Figura 10: Imágenes obtenidas a través de metodología experimental, A.- Imagen escaneada. B-Imagen obtenida a través de SVM. C.-Obtenida a partir de NN. Barra de escala 0.5 cm.

### *3.4.1.2 Conteo modal*

Se efectuó conteo modal (CM) en la totalidad de los cortes. Los resultados de éste y el número de puntos usado para cada corte se detallan en el Tabla anexo 1. La cantidad de puntos utilizados no es la misma para todos los cortes, pues al presentarse gran cantidad de secciones heterogéneas se seleccionó la mayor cantidad de área posible de forma de tener una mayor representatividad para comparar con el método anterior. Los resultados obtenidos y comparaciones con el método anterior se encuentran en la Tabla 2.

Los porcentajes determinados por ambos métodos son similares, encontrándose diferencias principalmente en espinela, siendo sobrestimada por el método experimental.

Tabla 2: Determinación de porcentajes modales a través de metodología experimental. SVM: Support Vector Machine, NN: Neural Net. CM: Conteo modal.

	Opx SVM	Opx NN	Opx CM	Cpx SVM	Cpx NN	Cpx CM	Sp SVM	Sp NN	Sp CM	OI SVM	OI NN	OI CM
PM27A-1	27.57	23.72	18.70	6.83	8.81	9.60	5.64	8.33	4.40	59.96	59.14	67.10
PM27A-2	24.59	25.55	22.70	4.74	4.34	6.50	2.94	4.89	2.40	67.73	65.22	68.20
PM27A-4	22.42	23.28	25.30	4.42	4.24	6.00	2.49	0.18	0.40	70.67	72.30	68.00
PM27A-5	42.05	40.95	38.70	1.72	2.01	1.40	1.01	0.00	0.60	55.22	57.04	59.10
PM27A-9	24.02	21.60	23.00	5.38	3.78	4.70	6.62	5.67	5.80	63.98	68.94	66.30
PM27A-27	0.00	0.00	0.00	35.19	45.83	34.00	0.00	0.00	0.00	64.81	54.17	65.90
PM27A-28	11.11	16.78	13.90	5.83	7.10	6.00	4.07	9.46	3.10	79.00	66.66	76.90
PM27B-1A	21.48	25.82	26.70	8.03	5.99	7.10	1.03	0.83	0.20	69.46	67.36	65.90
PM27B-1B	-	23.74	24.00	-	4.70	5.60	-	8.17	0.50	-	63.40	69.70
PM27B-2 a	-	6.25	10.01	-	4.24	4.27	-	0.00	0.00	-	89.51	85.51
PM27B-2 b	-	23.27	15.00	-	3.53	4.30	-	0.00	0.40	-	73.20	80.10
PM27B-2 c	-	14.02	9.00	-	0.80	1.40	-	0.00	1.50	-	85.17	87.90
PM27B-3	33.17	35.25	30.50	5.52	7.27	6.50	1.33	0.00	2.60	59.97	57.48	60.30
PM27B-4	23.07	28.71	18.70	4.13	5.16	4.40	4.25	4.19	2.70	68.54	61.94	74.10
PM27B-9	38.03	38.80	30.90	3.34	2.48	4.90	6.24	12.98	3.20	52.39	45.74	60.90
PM27B-10	15.41	20.37	19.80	1.29	1.52	1.10	3.05	10.98	3.40	80.26	67.13	75.50
PM27B-12A	-	13.05	14.05	-	4.04	2.60	-	2.66	3.20	-	80.24	79.97
PM27B-12B	4.18	8.45	1.50	10.30	10.43	11.30	1.65	1.81	0.50	83.86	79.31	86.50
PM27B-12B (a)	6.76	6.14	9.80	4.16	5.80	3.20	3.01	2.63	2.30	86.07	85.42	84.40
PM27B-16	10.72	8.23	10.90	4.83	5.20	3.70	4.82	6.03	5.20	79.62	80.54	80.00
PM27B-18	21.38	27.25	21.00	11.68	17.07	7.70	3.50	7.52	2.70	63.44	48.16	68.50
PM27B-23	38.39	45.97	41.10	8.16	21.41	6.00	0.00	0.00	1.20	53.45	32.62	51.50
PM27B-25A	28.45	29.28	35.70	3.04	2.28	5.70	5.99	8.01	0.30	62.52	60.43	58.10
PM27B-25A(a)	7.43	14.37	7.40	5.99	2.42	7.40	0.00	7.82	2.60	86.58	75.39	82.40
PM27B-26	21.82	22.80	30.70	12.33	10.66	11.80	4.39	4.06	3.00	61.46	62.47	54.20

### 3.4.2 Determinación de porcentajes minerales a partir de química de roca

#### 3.4.2.1 Método de los mínimos cuadrados

A partir de la composición de roca total y la química mineral de elementos mayores se pretende calcular la composición modal de las tres muestras que tienen análisis de microsonda a través del método de los mínimos cuadrados. El planteamiento parte de una ecuación vectorial con múltiples incógnitas, de la forma:

$$y = Ax$$

Donde  $x$  e  $y$  corresponden a vectores con los valores de óxidos obtenidos para química mineral y roca total respectivamente.

Al tener ocho variables de los óxidos  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$  y  $\text{Na}_2\text{O}$  y cuatro variables incógnitas que son los porcentajes de Opx, Cpx, Ol y Sp se tiene un sistema sobredeterminado, en el que se pueden determinar múltiples soluciones. El objetivo del método es determinar la solución que minimice el error, para lo cual se derivan los errores cuadrados asociados a las posibles soluciones y se igualan a cero.

Sea  $S$  el error cuadrado asociado a cada posible solución,  $y_i$  el contenido de roca total dado por una solución cualquiera e  $Y_i$  el valor de contenido de un óxido  $i$  en roca total.  $X_i$  corresponde al valor del óxido  $i$  determinado por microsonda para un mineral.

$$S = \sum (y_i - Y_i)^2 = \sum (a + bX_i - Y_i)^2$$

Donde la solución  $y_i$  puede ser escrita en función de los otros valores. Si derivamos esto con respecto a  $a$  y  $b$  tenemos:

$$\frac{dS}{da} = 2 \sum (a + bX_i - Y_i) = 0$$

$$\frac{dS}{db} = 2 \sum (a + bX_i - Y_i)X_i = 0$$

Con las soluciones asociadas:

$$a = \frac{\sum X_i^2 \sum Y_i - \sum X_i \sum X_i Y_i}{N \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2}$$

$$b = \frac{N \sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i}{N \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2}$$

Luego con los valores de  $a$  y  $b$  se define el valor  $y_i = a + bX_i$  correspondiente a la solución esperada. Los detalles de los porcentajes obtenidos se detallan en la Tabla 3.

### 3.4.2.1 Norma CIPW

Otra forma de determinar porcentajes de minerales a través de la química de la roca corresponde a la norma CIPW, que corresponde a un algoritmo diseñado para determinar presencia y porcentaje de las distintas mineralogías asumiendo las soluciones sólidas como extremos composicionales. El algoritmo consiste en asignaciones de porcentajes de elementos a los minerales más comunes en las rocas ígneas (o normativos) que se pueden formar con la composición de la roca, partiendo de composiciones como álcalis y aluminio para formar feldespatos, asignaciones para hierro y magnesio para formación de piroxenos y olivinos y observando si existe déficit o exceso de silíceo para la formación de cuarzo o formación de otros minerales menores. Para comparación con el método de los mínimos cuadrados solamente se realizó este procedimiento en las mismas tres muestras que el anterior. Los porcentajes obtenidos, junto con los de los otros métodos se detallan en la Tabla 3.

**Tabla 3: Porcentajes minerales determinados a través de método de los mínimos cuadrados (Geoq), norma CIPW (CIPW), conteo modal (Modal), metodología experimental (Envi).**

	Ol				Opx				Cpx				Sp			
	Geoq	CIPW	Modal	Envi	Geoq	CIPW	Modal	Envi	Geoq	CIPW	Modal	Envi	Envi	CIPW	Modal	Envi
PM27A-9*	84.77	84.18	66.3	63.98	5.72	9.51	23	24.02	8.4	3.08	4.7	5.38	1.1	-	5.8	6.62
27B-1B**	85.52	85.16	69.7	63.4	9.11	10.35	24	23.74	4.49	1.35	5.6	4.7	0.88	-	0.5	8.17
PM27B-2***	72.61	71.64	69.45	82.08	23.14	24.3	23.24	15.49	4.06	1.3	6.31	2.43	0.18	-	0.86	0

Se observa que los porcentajes determinados por los dos métodos químicos son similares entre ellos, sin embargo presentan grandes diferencias en relación a los calculados a través de los cortes transparentes.

Para la clasificación de los xenolitos se optó por los porcentajes obtenidos a través de la metodología experimental, que entrega buenos resultados cualitativos al comparar la imagen del xenolito con la imagen entregada por el programa. Las muestras son lherzolitas (9), hazburgitas (11) y wherlita (1) (Figura x). Los porcentajes utilizados se detallan en la Tabla 4.

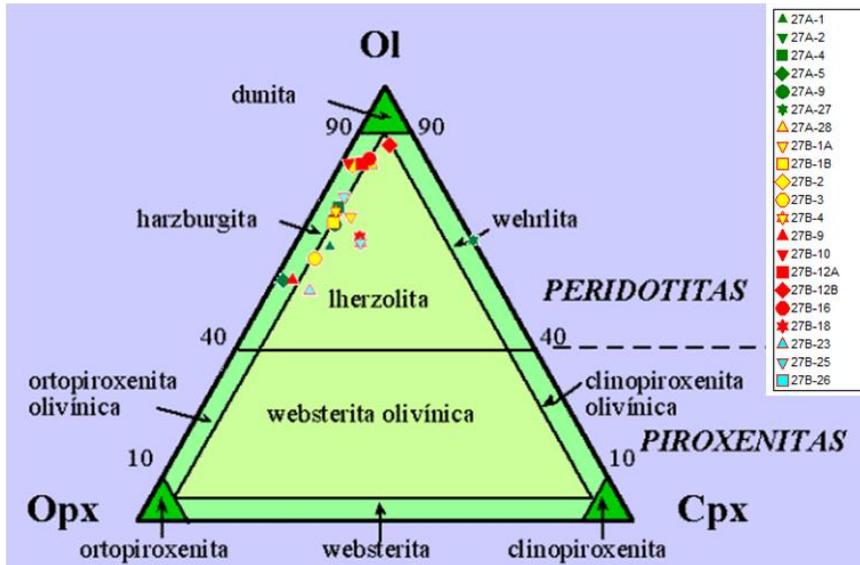


Figura 11: Clasificación de xenolitos según diagrama Streckeisen.

Tabla 4: Porcentajes determinados por metodología experimental SVM para xenolitos de Auvernia. \* Determinados por NN.

SVM	Opx	Cpx	Sp	Ol	Total	Nombre de roca
27A-1	27.6	6.8	5.6	60.0	100.0	Lherzolita
27A-2	24.6	4.7	2.9	67.7	100.0	Hazburgita
27A-4	22.4	4.4	2.5	70.7	100.0	Hazburgita
27A-5	42.1	1.7	1.0	55.2	100.0	Hazburgita
27A-9	24.0	5.4	6.6	64.0	100.0	Lherzolita
27A-27	0.0	35.2	0.0	64.8	100.0	Wherlita
27A-28	11.1	5.8	4.1	79.0	100.0	Lherzolita
27B-1A*	21.5	8.0	1.0	69.5	100.0	Lherzolita
27B-1B*	23.7	4.7	8.2	63.4	100.0	Hazburgita
27B-2	15.5	2.4	0.0	82.1	100.0	Hazburgita
27B-3	33.2	5.5	1.3	60.0	100.0	Lherzolita
27B-4	23.1	4.1	4.2	68.5	100.0	Hazburgita
27B-9	38.0	3.3	6.2	52.4	100.0	Hazburgita
27B-10	15.4	1.3	3.0	80.3	100.0	Hazburgita
27B-12A*	13.0	4.0	2.7	80.2	100.0	Hazburgita
27B-12B	5.5	7.3	2.3	85.0	100.0	Lherzolita
27B-16	10.7	4.8	4.8	79.6	100.0	Hazburgita
27B-18	21.4	11.7	3.5	63.4	100.0	Lherzolita
27B-23	38.4	8.2	0.0	53.5	100.0	Lherzolita
27B-25	20.0	4.2	3.6	72.2	100.0	Hazburgita
27B-26	21.8	12.3	4.4	61.5	100.0	Lherzolita

## 3.5 Texturas

### 3.5.1 Definición de texturas especiales

Las peridotitas poseen texturas que reflejan procesos que las han afectado tales como deformación, recristalización y crecimiento de los minerales en condiciones del manto. Estas han sido estudiadas por autores como Boullier y Nicolas (1973) y Mercier y Nicolas (1975). Un resumen de las terminologías es realizado por Harte (1977). Las texturas empleadas en este trabajo son las definidas por Mercier y Nicolas (1975).

### *Textura Protogranular.*

El olivino y el ortopiroxeno presentan grano grueso (en promedio 4mm), en ocasiones existe poligonización y recristalización de grandes cristales en agregados de pocos granos con orientación común sugiriendo un tamaño original del orden de los 10mm. El clinopiroxeno y la espinela son de menor tamaño (1mm) y están en contacto generalmente con el ortopiroxeno. La espinela presenta comúnmente hábito vermicular con ortopiroxeno o se da de forma intersticial entre el orto y clinopiroxeno. El olivino y el ortopiroxeno presentan típicamente bordes curvilíneos. Los cristales no presentan elongación y los xenolitos no han desarrollado ninguna foliación o lineación.

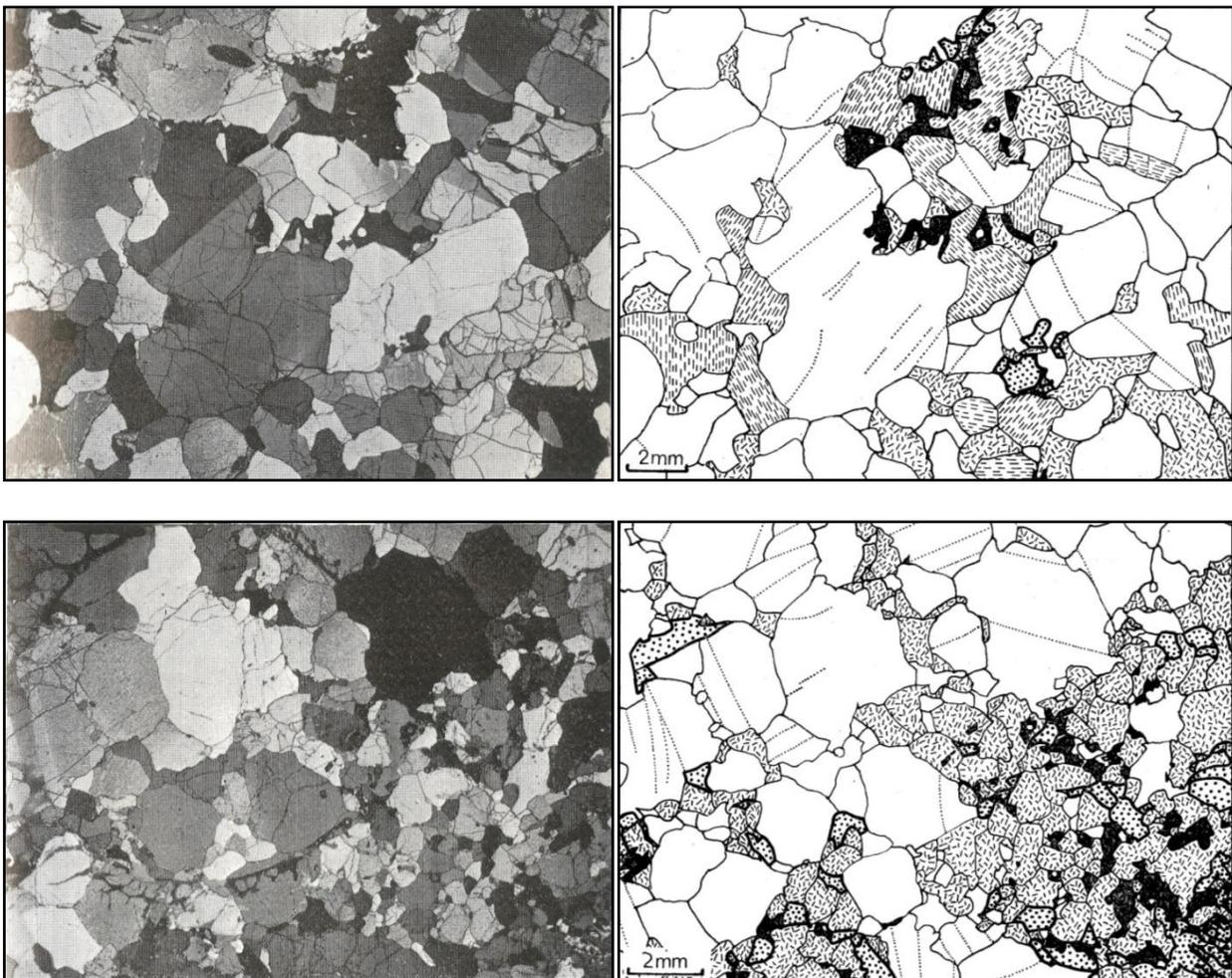


Figura 12 : Microfotografías y esquemas de ellas, obtenidos de Mercier y Nicolas (1975). Textura protogranular. En esquema: olivino color blanco, ortopiroxeno con líneas orientadas, clinopiroxeno con contornos más fuertes y puntos, espinela negro.

### *Textura porfiroclástica.*

Esta textura presenta dos tamaños distintos de ortopiroxeno y olivino. Los primeros cristales llamados porfiroclastos son de mayor tamaño (aproximadamente 8 mm x 2 mm) y deformados de forma elongada. Los segundos con nombre neoblastos corresponden a pequeños cristales generalmente inferiores a 0.5 mm, poligonales y libres de deformación, representando usualmente sobre el 50% de la muestra. La espinela generalmente presenta el hábito *holly leaf* y se encuentra rodeada por olivino. Estas muestras presentan elementos estructurales como foliación en los porfiroclastos.

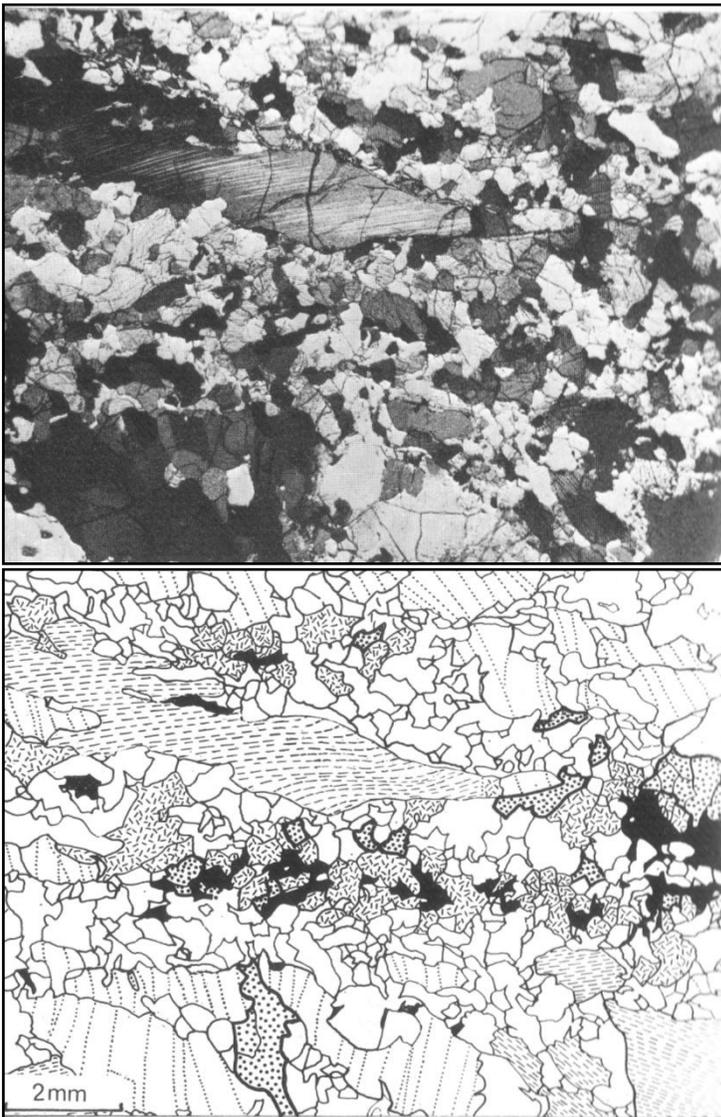


Figura 13 : Microfotografía y esquema de ellas, obtenidos de Mercier y Nicolas (1975). Textura porfiroclástica. En esquema: olivino color blanco, ortopiroxeno con líneas orientadas, clinopiroxeno con contornos más fuertes y puntos, espinela negro.

### *Textura equigranular*

El tamaño de granos es fino (0.7 mm), encontrándose en ocasiones relictos de porfiroclastos indicando transición desde la textura porfiroclástica. Los contactos entre granos típicamente son rectos y convergentes en puntos triples de  $120^\circ$ . El diópsido y la espinela son diseminados en la muestra, el último formando inclusiones esféricas y redondeadas dentro del olivino y piroxenos. Esta textura esta subdivida además en otras dos, dependiendo de la fábrica y forma del grano: equigranular tabular y equigranular mosaico, distinguidas porque en la primera se presentan minerales con simetría ortorrómbica y orientados, mientras que en el segundo no se observa fábrica en los minerales.

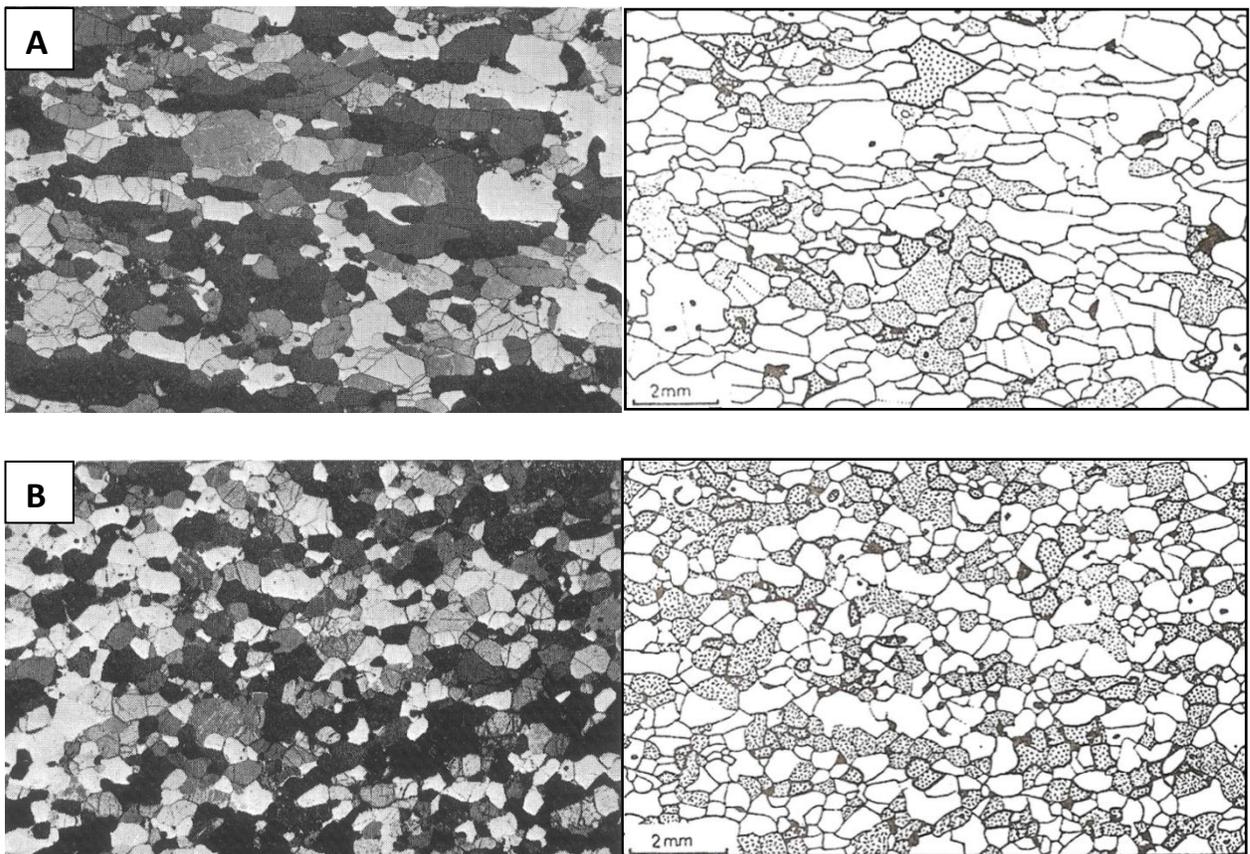


Figura 14: Microfotografías y esquemas de ellas, obtenidos de Mercier y Nicolas (1975). (A) Textura equigranular tabular. (B) Textura equigranular mosaico. En esquema: olivino color blanco, ortopiroxeno con líneas orientadas, clinopiroxeno con contornos más fuertes y puntos, espinela negro.

Estas texturas se encuentran relacionadas como muestra el siguiente diagrama:

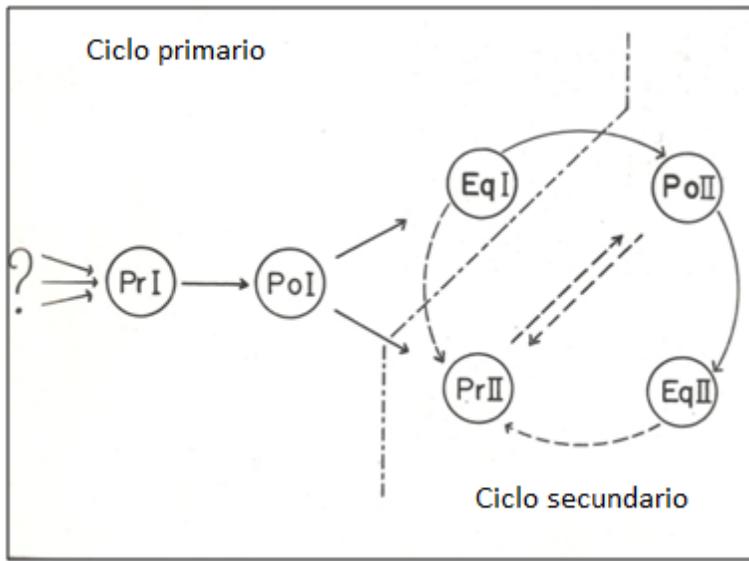


Figura 15: Diagrama de relaciones texturales, obtenido de Mercier y Nicolas (1975). Las líneas sólidas corresponden a transiciones observadas, mientras que las líneas punteadas son transiciones inferidas.

A medida que la secuencia va de protogranular a equigranular el tamaño de grano va disminuyendo, lo que es atribuible a un mayor grado de deformación y probablemente de fusión. También pueden encontrarse transiciones entre las diversas texturas.

Como se puede apreciar estos ciclos pueden repetirse, teniéndose las mismas texturas llamadas tipo II o secundarias. La forma de diferenciarlas es que en las segundas se pueden apreciar espinelas como inclusiones esféricas pequeñas dentro de los minerales mayores.

### 3.5.2 Descripción de texturas en xenolitos de Auvernia

La totalidad de las muestras presentan textura holocristalina y fanerítica. La textura predominante según clasificación de Mercier y Nicolas (1975) corresponde a protogranular I (Figura 16A), siendo un caso especial la muestra catalogada como wherlita, la que presenta intersección poligonal de los minerales ( $120^\circ$ , Figura 16B), asociándole a una textura equigranular. Las muestras PM27A-1, PM27A-2, PM27B-2, y escasamente PM27B-18 presentan cristales alargados orientados localmente (Figura 16C), siendo un indicio de deformación, probablemente se encuentren en vías de evolución a una textura porfiroclástica.

La totalidad de las muestras presentan espinelas con hábito vermicular (Figura 17A), pudiendo encontrarse espinelas más esféricas (Figura 17B). La muestra PM27B-1A presenta espinelas pequeñas y circulares dentro de olivino (Figura 17C) por lo cual es asociada a una textura protogranular tipo II. La wherlita no tiene espinelas.

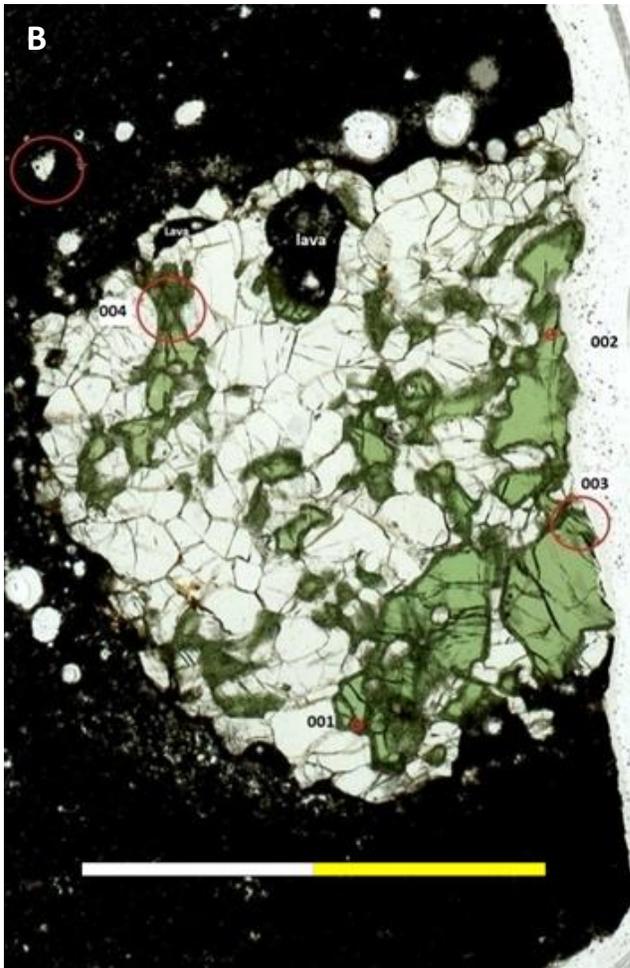
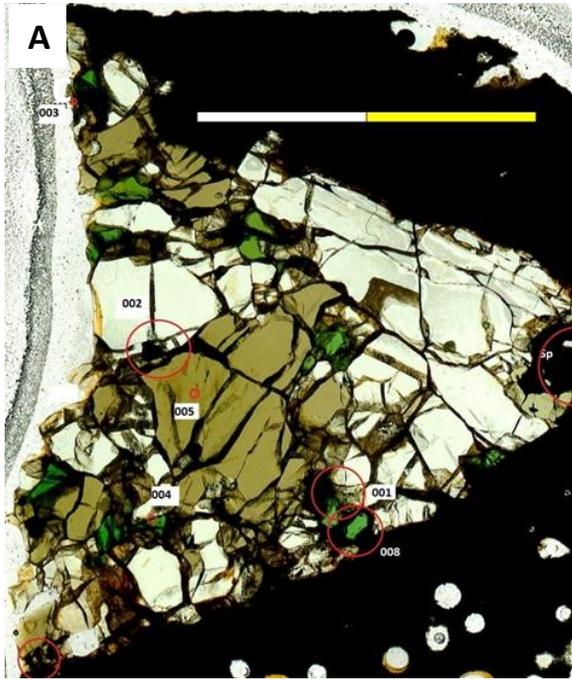


Figura 16: Imágenes obtenidas a través de escáner Epson, luz transmitida. Cada barra de escala mide 0.5 cm. (A) Textura protogranular en muestra PM27B-3.(B) Textura equigranular con contactos en  $120^\circ$  en los olivinos. (C) En círculo rojo pequeños cristales de Opx y Ol orientados en muestra PM27A-2.

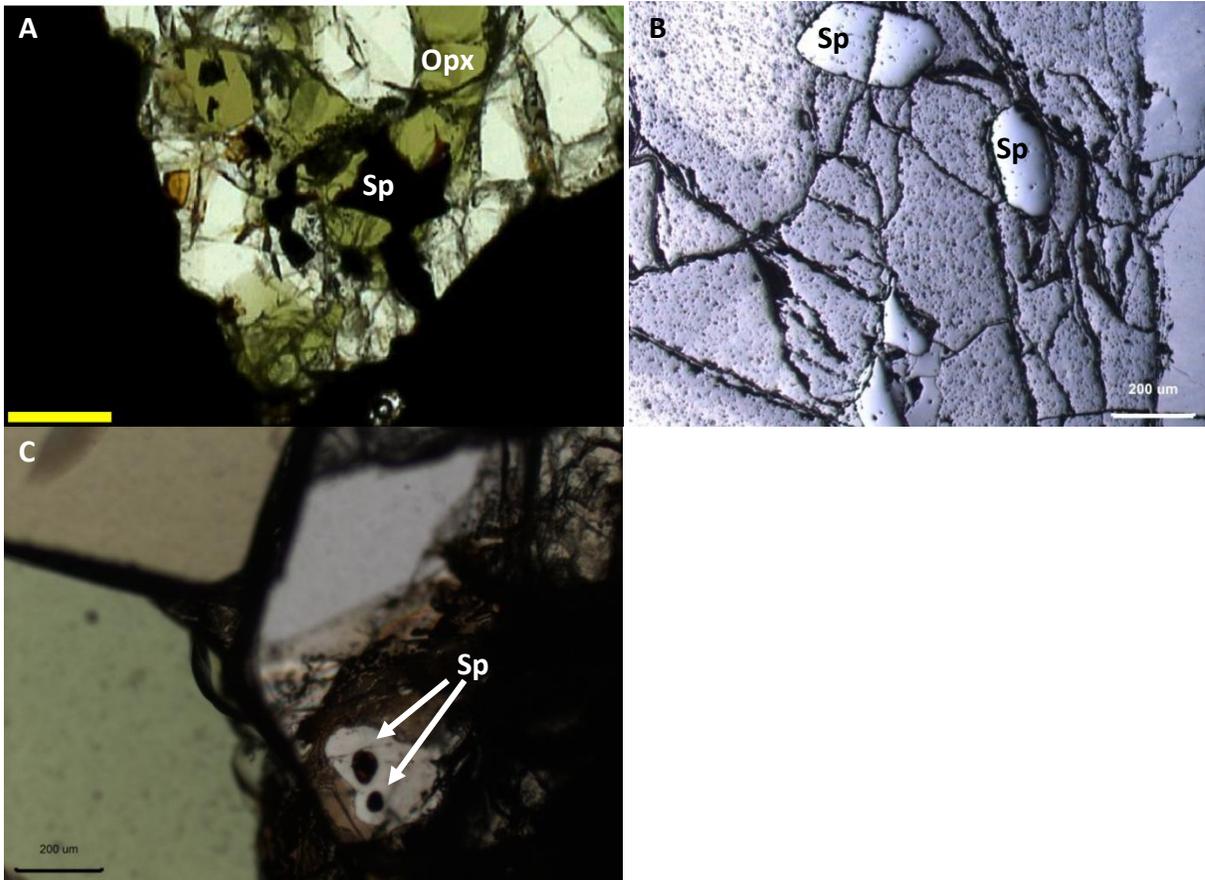


Figura 17: (A) Imagen obtenida a través escáner Epson, luz transmitida. Se observa el hábito vermicular de la espinela en asociación con ortopiroxeno, barra de escala 0.1 cm . (B) Microfotografía obtenida con luz reflejada, la espinela se presenta de forma más redondeada. (C) Microfotografía obtenida con luz transmitida, se aprecia espinelas pequeñas dentro de un olivino.

## Texturas de reacción

Las texturas de reacción son texturas de desequilibrio, generadas principalmente por cambios de composición o condiciones físicas de un sistema. Se manifiestan en los bordes o en zonas más expuestas de minerales, pudiendo presentar características ópticas distintas.

Empleando el microscopio con luz reflejada es posible reconocer texturas de reacción que no son evidentes a luz transmitida. Algunas se encuentran en directa relación con el contacto con el basalto y otras no. De las primeras se observa al ortopiroxeno y la espinela reaccionando de gran forma en los bordes del xenolito y en las zonas donde existe lava infiltrada. Se puede encontrar a la espinela completamente reaccionada o sin ninguna reacción en la misma muestra (Figura 18A,B). El olivino se ve reaccionando de poca o casi nula forma en relación al ortopiroxeno (Figura 18C, D).

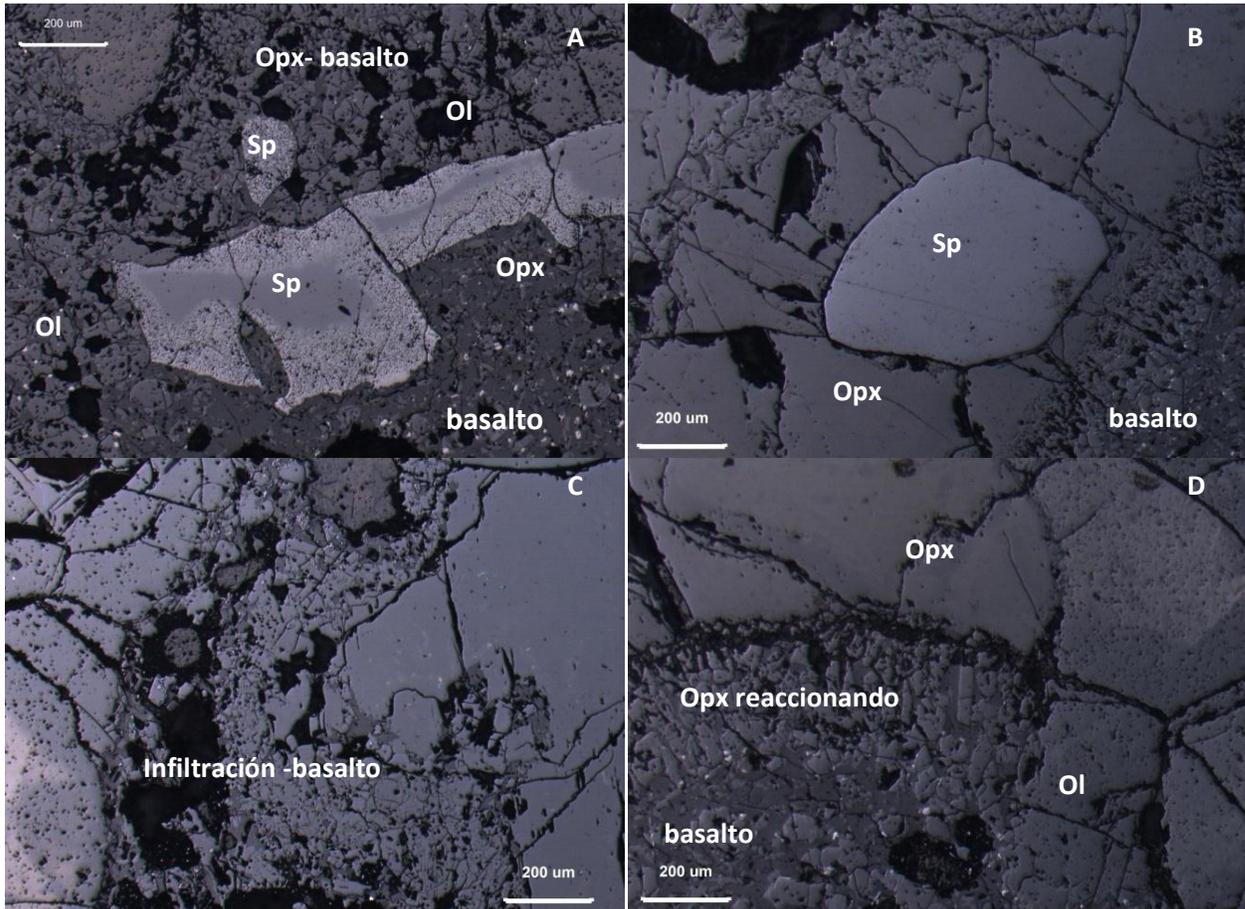


Figura 18: Microfotografías obtenidas a luz reflejada. (A) Espinela reaccionando completamente en contacto con el basalto en muestra PM27A-2. (B) Espinela sin reaccionar en la misma muestra, no se encuentra en contacto con el basalto. (C) Infiltración de basalto en xenolito, se observa al ortopiroxeno (Opx) reaccionando fuertemente. (D). Distintos grados de reacción para olivino (Ol) y ortopiroxeno (Opx) en contacto con el basalto.

Las texturas de reacción que no son relacionadas al contacto con el basalto se encuentran en los clinopiroxenos. Identificadas como “*spongy rims*” (Laurora et al. ( 2001), Carpenter et al. (2002), Su et al. (2011) y Shaw et al. (2006)) son reconocidas como una corona de minerales de clinopiroxeno con espacios entre ellos (Figuras 19A, 19B) que pueden estar vacíos o rellenos de vidrio alterado (Carpenter et al., 2002). La mayoría de las muestras estudiadas a excepción de los xenolitos correspondientes a PM27A-2 y PM27B-26 presentan esta textura. La muestra donde existe mayor reacción del clinopiroxeno es en la wherlita, alcanzando bordes de hasta 2mm (Figura 19C, D), mientras que el promedio de los otros no supera el milímetro de espesor.

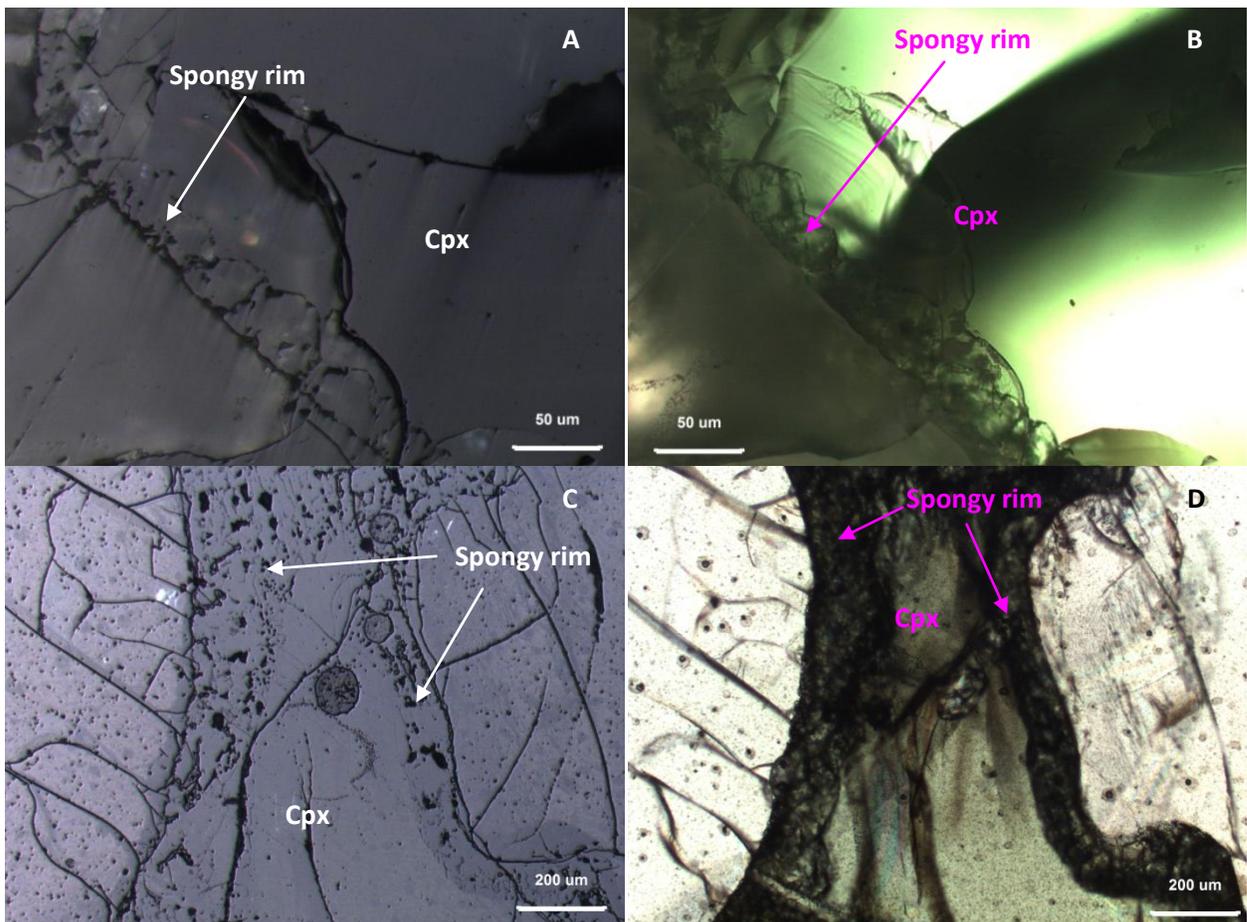


Figura 19 : (A) *Spongy rim* en Cpx visto con luz reflejada. (B) Nícoles paralelos, luz transmitida con sobreexposición de luz. (C) *Spongy rim* en Cpx en wherlita visto con luz reflejada., muestra PM27A-27. (D).Nícoles paralelos, luz transmitida

## Texturas de exsolución

Las texturas de exsolución son texturas de desequilibrio. Se pueden formar al cristalizar un mineral con solución sólida y posteriormente bajar la temperatura o la presión hasta condiciones bajo la línea de *solvus* de la solución, situación en la que se separan las distintas fases, creándose láminas de los extremos de la solución dentro del mineral.

En los xenolitos de Auvernia se encuentran exsoluciones de clinopiroxeno en ortopiroxeno (Figura 20A) de ortopiroxeno en clinopiroxeno (Figura 20C, D) y una posible exsolución de espinela o ilmenita en clinopiroxeno (Figura 20B). Las exsoluciones se muestran bien desarrolladas en las mismas muestras que no presentan *spongy rims* (PM27A-2 y PM27B-26) y se encuentran indicios leves de exsolución en las muestras PM27B-10 y PM27B-23. El resto de las muestras no presenta este tipo de textura.

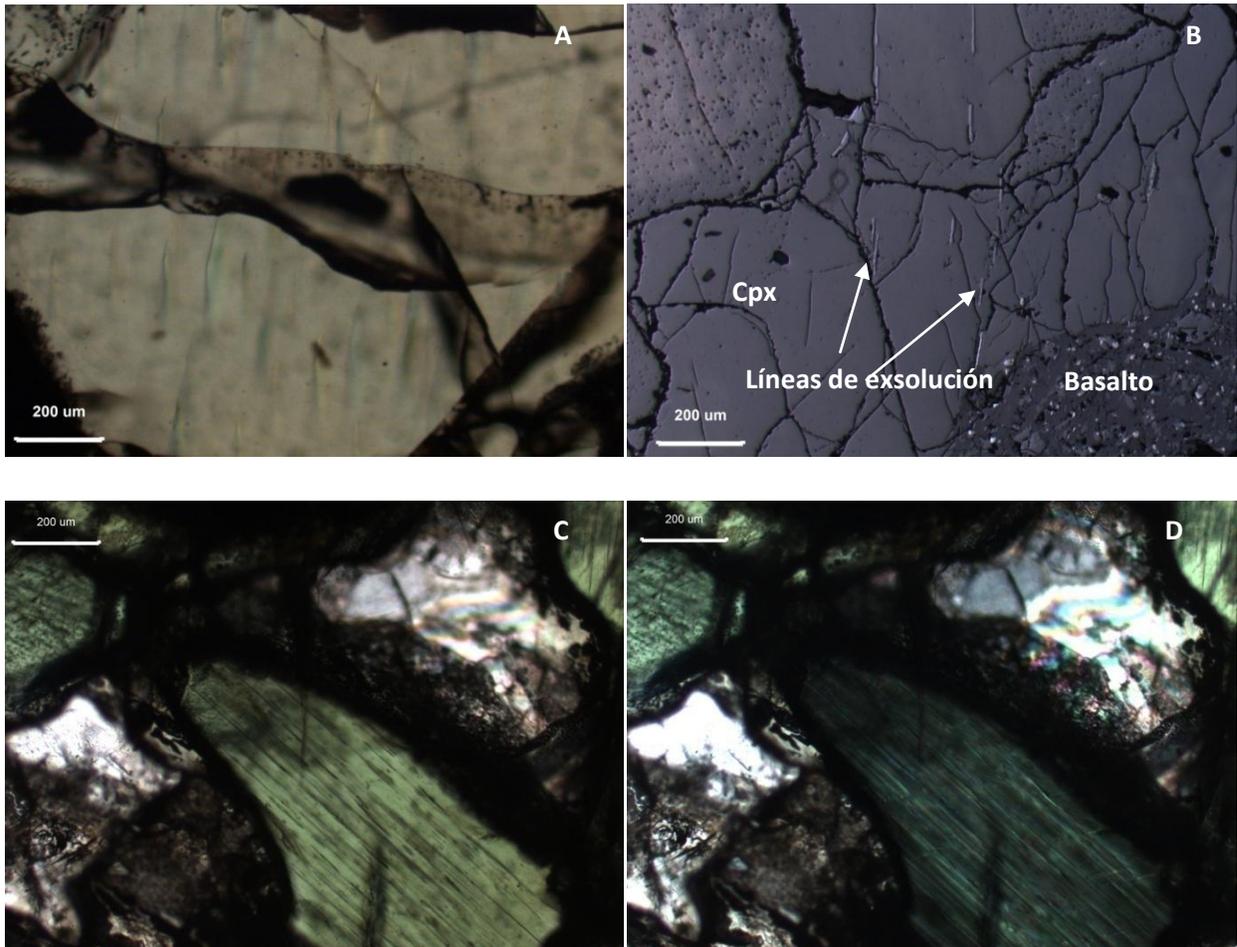


Figura 20: (A) Microfotografía obtenida con luz transmitida, líneas de exsolución en Opx poco desarrolladas, muestra PM27B-23, nicoles paralelos. (B) Sp o ilmenita orientadas en líneas paralelas delgadas, posible exsolución de Sp o ilmenita en Cpx, muestra PM27A-2. Adicionalmente se puede ver al clinopiroxeno sin *spongy rim* en el contacto con el basalto. (C) Exsolución en Cpx bien desarrollada, nicoles paralelos, muestra PM27B-26. (D) Nicoles cruzados.

Tabla 5: Resumen de texturas y mineralogía accesoria para los xenolitos del volcán Auvernia.\*No presenta *spongy rim*, sin embargo existe solamente un cristal de clinopiroxeno en la muestra.

Muestra	Textura (Mercier y Nicolas,1975)	Text. Reacción en Cpx.	Text. Exsolución	Sulfuros
PM27A-1	Protogranular II-Indicios leves de porfiroclástica	<i>spongy rims</i>		Abundante presencia de sulfuros de tamaños inferiores a 10 um, se observa uno de 40 um correspondiente a pirita y sulfuros de Ni y Co, con alteración de hematita y magnetita junto a limolita en Cpx.
PM27A-2	Protogranular I-Indicios leves de porfiroclástica		Cpx en Opx	Abundante presencia de sulfuros de tamaños inferiores a 10 um, se observan piritas de mayor tamaño alcanzando los 20 um asociados a Ol.
PM27A-4	Protogranular I	<i>spongy rims</i>		Presencia de sulfuros de tamaños cercanos a 20 um, correspondientes a pirita en Ol.
PM27A-5	Protogranular I	<i>spongy rims</i>		Escasa presencia de sulfuros en la muestra, se encuentra un posible sulfuro secundario de 20 um en Ol.
PM27A-9	Protogranular I	<i>spongy rims</i>		Escasa presencia de sulfuros, se observan piritas de hasta 5 um.
PM27A-27	Protogranular I	<i>spongy rims</i>		Muy escasa presencia de sulfuros
PM27A-28	Protogranular I	<i>spongy rims</i>		Presencia de sulfuros de tamaños cercanos a 10 um, se observan algunos de hasta 20 um, los mayores correspondientes a sulfuros de Ni y Co en Cpx, y pirita en Ol.
PM27B-1A	Protogranular I	<i>spongy rims</i>		Presencia de sulfuros de tamaño inferiores a 10um, se observa uno de 20 um en zona de <i>spongy rim</i> de Cpx
PM27B-1B	Protogranular I	<i>spongy rims</i>		Presencia de sulfuros, el mayor de 50 um corresponde a sulfuros de Ni,Co y pirita.
PM27B-2	Protogranular I-Indicios leves de porfiroclástica	<i>spongy rims</i>		Presencia de sulfuros abundante en cortes b y c, la mayoría de tamaños inferiores a 10um, alcanzando el mayor 15 um y correspondiendo a pirita en Cpx.
PM27B-3	Protogranular I	<i>spongy rims</i>		Escasa presencia de sulfuros y de tamaños inferiores a 10um.
PM27B-4	Protogranular I	<i>spongy rims</i>		Presencia de sulfuros, el mayor de 15 um correspondiente a pirita en Cpx.
PM27B-9	Protogranular I	<i>spongy rims</i>		Escasa presencia de sulfuros y de tamaños inferiores a 10um.
PM27B-10	Protogranular I	*		Muy escasa presencia de sulfuros.
PM27B-12A	Protogranular I	<i>spongy rims</i>		Escasa presencia de sulfuros en la muestra, el mayor de 15 um corresponde a pirita en Ol.
PM27B-12B	Protogranular I	<i>spongy rims</i>		Presencia de sulfuros de tamaños inferiores a 10 um
PM27B-16	Protogranular I	<i>spongy rims</i>		Presencia de sulfuros de tamaños inferiores a 10 um
PM27B-18	Protogranular I- Indicios leves de porfiroclástica	<i>spongy rims</i>		Abundante presencia de sulfuros, se observan dos mayores, los cuales alcanzan los 50 um y están compuesto por pirrotina-pirita en Ol y por sulfuros de Ni-Co y pirita en Cpx
PM27B-23	Protogranular I	<i>spongy rims</i>	indicios Cpx en Opx	Presencia de sulfuros concentrados en el Opx de mayor tamaño, no superando los 10um
PM27B-25A	Protogranular I	<i>spongy rims</i>		Presencia de sulfuros, el mayor de 40 um corresponde a pirita y sulfuros de Ni y Co en Opx en la sección PM27B-25A
PM27B-26	Protogranular I		Opx en Cpx Cpx en Opx Sp o illmenita en Cpx	Presencia de sulfuros de tamaños inferiores a 10 um. El mayor de 20 um se encuentra en Ol.

## 4 Geoquímica

### 4.1 Química de elementos mayores en roca total

Se realizaron análisis químicos de elementos mayores para 15 muestras de xenolitos mantélicos y 2 muestras de basalto huésped PM27A-L y PM27B-L. Los detalles se presentan en la Tabla 3. El valor de PPC se eliminó normalizándolo, mientras que  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  se transformó a FeO multiplicándolo por 0.8998.

El número magnésico para las diversas muestras fue calculado según la razón:  $\#Mg = \frac{Mg^{+2}}{Fe^{+2} + Mg^{+2}}$

Según diagrama TAS (Le Bas et al. 1986, Figura 21) la lava hospedante corresponden a traqui-basalto alcalino.

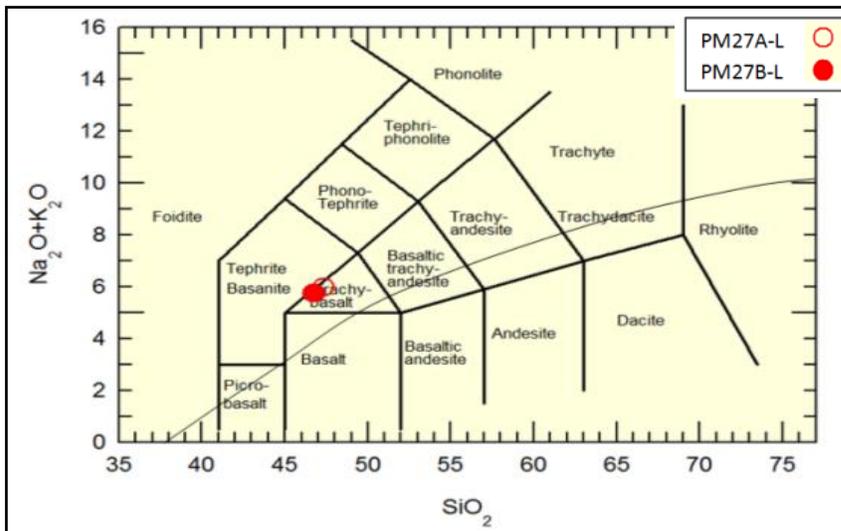


Figura 21: (A) Diagrama TAS (Le Bas et al. 1986) para los dos basaltos de Auvernia.

Tabla 6: Resumen de análisis geoquímicos para xenolitos y basaltos de Auvernia. Datos en porcentaje en peso.<sup>2</sup>

<b>MUESTRA</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3t</sub></b>	<b>MnO</b>	<b>MgO</b>	<b>CaO</b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	<b>PPC</b>	<b>SUMA</b>	<b># Mg</b>
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
<b>PM27A-1</b>	42.56	0.10	2.56	8.76	0.13	42.72	2.39	0.11	0.03	0.03	0.24	99.62	<b>0.97</b>
<b>PM27A-2</b>	46.87	0.02	1.77	8.92	0.12	41.06	0.67	0.01	0.01	0.01	0.10	99.53	<b>0.91</b>
<b>PM27A-4</b>	42.38	0.09	1.57	8.75	0.11	45.37	1.64	0.09	0.01	0.03	-0.34	99.69	<b>0.96</b>
<b>PM27A-5</b>	43.82	0.03	0.57	9.14	0.11	45.53	0.54	0.01	0.01	0.01	-0.69	99.05	<b>0.90</b>
<b>PM27A-9</b>	42.26	0.07	0.73	8.25	0.11	46.65	1.26	0.02	0.01	0.09	0.16	99.59	<b>0.95</b>
<b>PM27A-27</b>	45.79	0.29	2.42	7.79	0.11	30.57	11.22	0.54	0.04	0.04	0.75	99.56	<b>0.99</b>
<b>PM27B-1B</b>	42.32	0.06	0.72	8.86	0.12	46.95	0.71	0.04	0.01	0.02	-0.37	99.44	<b>0.91</b>
<b>PM27B-2</b>	44.54	0.06	0.59	8.67	0.12	44.95	0.66	0.03	0.02	0.04	-0.36	99.32	<b>0.91</b>
<b>PM27B-3</b>	44.12	0.09	2.50	8.26	0.12	42.32	2.19	0.11	0.01	0.01	-0.18	99.53	<b>0.97</b>
<b>PM27B-9</b>	44.04	0.12	2.93	11.83	0.12	38.25	2.10	0.12	0.01	0.01	-0.77	98.75	<b>0.97</b>
<b>PM27B-10</b>	43.57	0.07	1.74	8.73	0.12	43.56	1.63	0.06	0.01	0.01	0.11	99.60	<b>0.96</b>
<b>PM27B-12B</b>	42.81	0.07	1.52	8.82	0.12	45.68	0.81	0.03	0.01	0.01	-0.35	99.51	<b>0.92</b>
<b>PM27B-16</b>	45.21	0.07	1.91	7.99	0.11	43.51	0.74	0.02	0.01	0.02	-0.33	99.25	<b>0.93</b>
<b>PM27B-18</b>	43.53	0.08	1.70	8.97	0.12	42.51	2.66	0.14	0.01	0.01	-0.02	99.71	<b>0.98</b>
<b>PM27B-26</b>	46.67	0.07	2.17	8.90	0.11	40.22	1.43	0.01	0.01	0.01	-0.33	99.25	<b>0.96</b>
<b>PM27A-L</b>	47.36	3.07	13.94	12.05	0.15	8.77	7.68	3.95	2.02	0.77	-0.57	99.19	
<b>PM27B-L</b>	46.76	2.85	13.51	12.06	0.15	10.05	7.95	3.91	1.83	0.77	-0.40	99.44	

Los xenolitos de Auvernia presentan #Mg con rangos entre 0.87 y 0.92, correspondiendo a la muestra PM27B-9 el número más bajo.

#### 4.1.1 Diagramas óxidos vs MgO

En los diagramas de óxidos versus MgO se observa empobrecimiento en los componentes basálticos. Los componentes basálticos son los compuestos extraídos de la fusión parcial del manto superior para la creación de un magma básico como por ejemplo CaO, SiO<sub>2</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Se tiene como regla general que los xenolitos que más han sufrido procesos de fusión poseen mayor porcentaje en peso de MgO y menores porcentajes de componentes basálticos. Estos diagramas presenta una tendencia lineal, lo que es esperable pensando en un proceso de fusión parcial a partir de un mismo manto, sin embargo en los diagramas de CaO, TiO<sub>2</sub> y Na<sub>2</sub>O vs MgO se presenta una gran dispersión. Una primera deducción asociada a los diagramas es que no se encuentran diferencias geoquímicas de elementos mayores entre las muestras de xenolitos mantélicos halladas en cada basalto, variando en el mismo rango de composición (Figura 22), suponiendo una proveniencia de éstos desde el mismo manto.

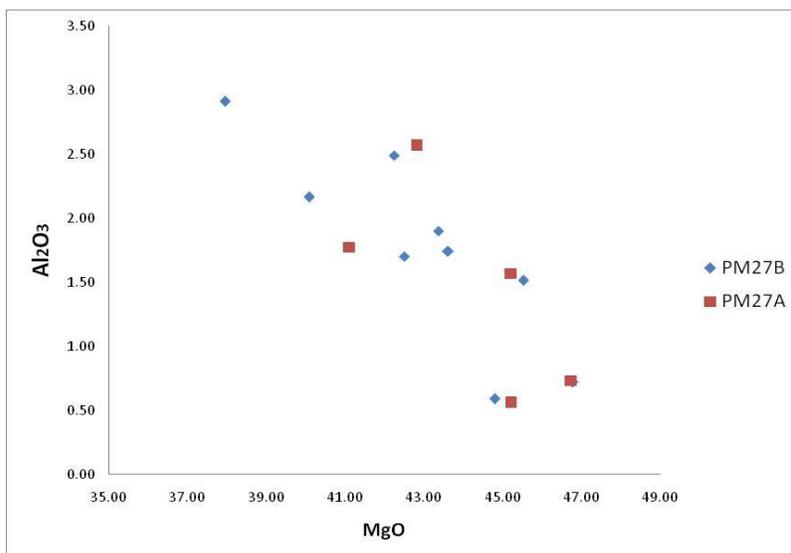


Figura 22: Diagrama Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vs MgO para xenolitos encontrados en Auvernia clasificados según el sitio que se extrajeron.

Existen particularidades en las mismas muestras que no presentan *spongy rim* (PM27A-2 y PM27B-26) en relación a el resto de las otras, consistentes en menor contenido de MgO y diferencias en relación de este elemento con el CaO, TiO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>O, presentando una tendencia distinta a la de las muestras que presentan *spongy rims* (Figuras 23,24 y 25. Círculo azul sin *spongy rim*, rojo con *spongy rim*). La muestra PM27B-9 presenta valores anómalos y distintos a las otras muestras. La muestra PMA27-27 correspondiente a la wherlita no se incluye en estos diagramas debido a que posee valores muy distintos a los otros, presentando bajos valores de MgO y altos de Na<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub> y CaO (ver Tabla 6).

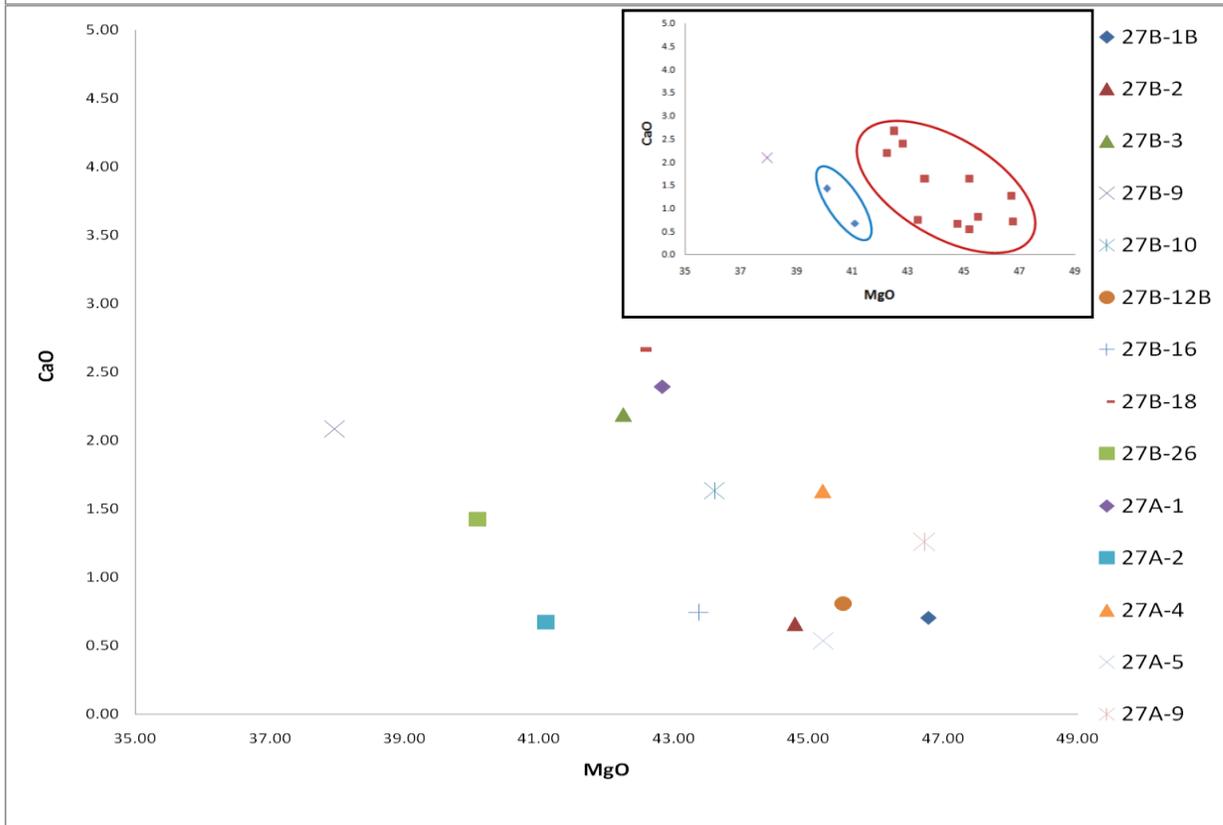
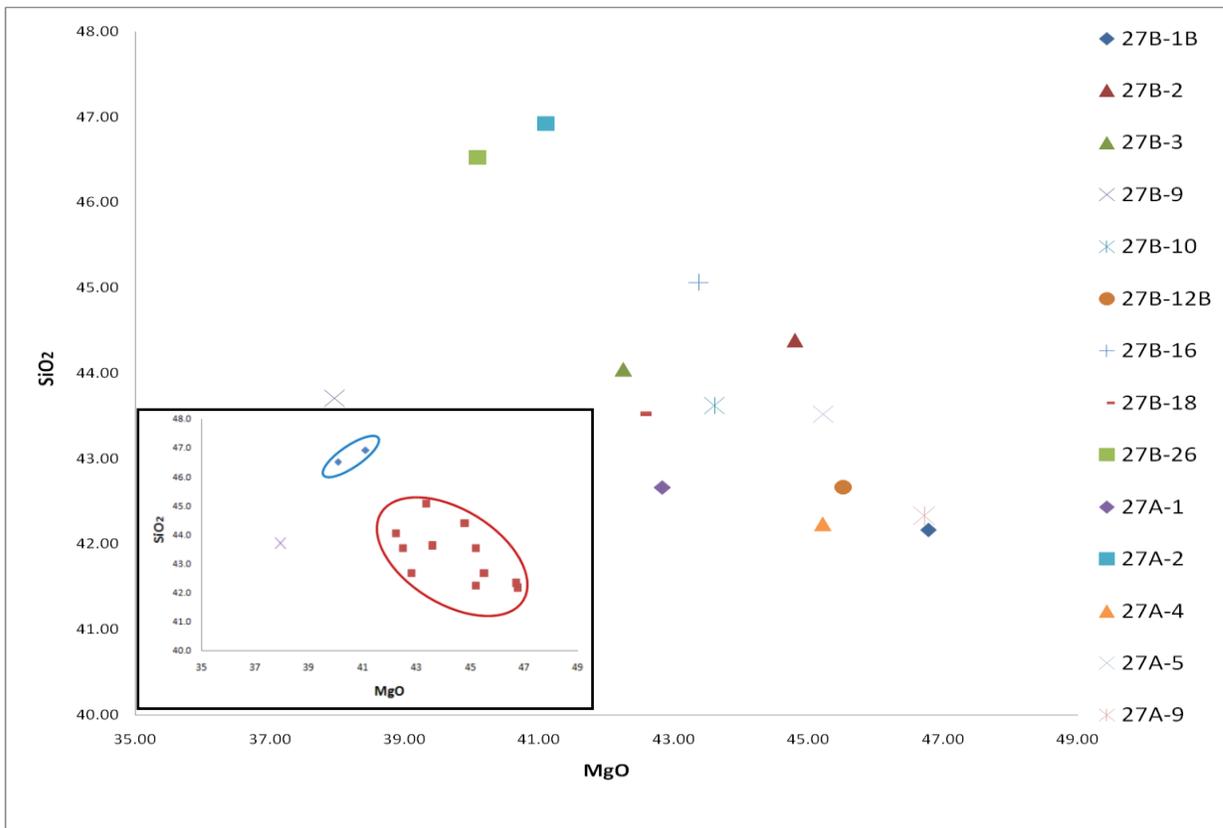


Figura 23: Gráficos de óxidos vs contenido de MgO para muestras de xenolitos de Auvernia, se excluye para todos los gráficos la muestra PM27A-27 por presentar valores muy diferentes. SiO<sub>2</sub> y CaO vs MgO. En círculo azul las muestras que no presentan *spongy rims*, círculo rojo las que si presentan.

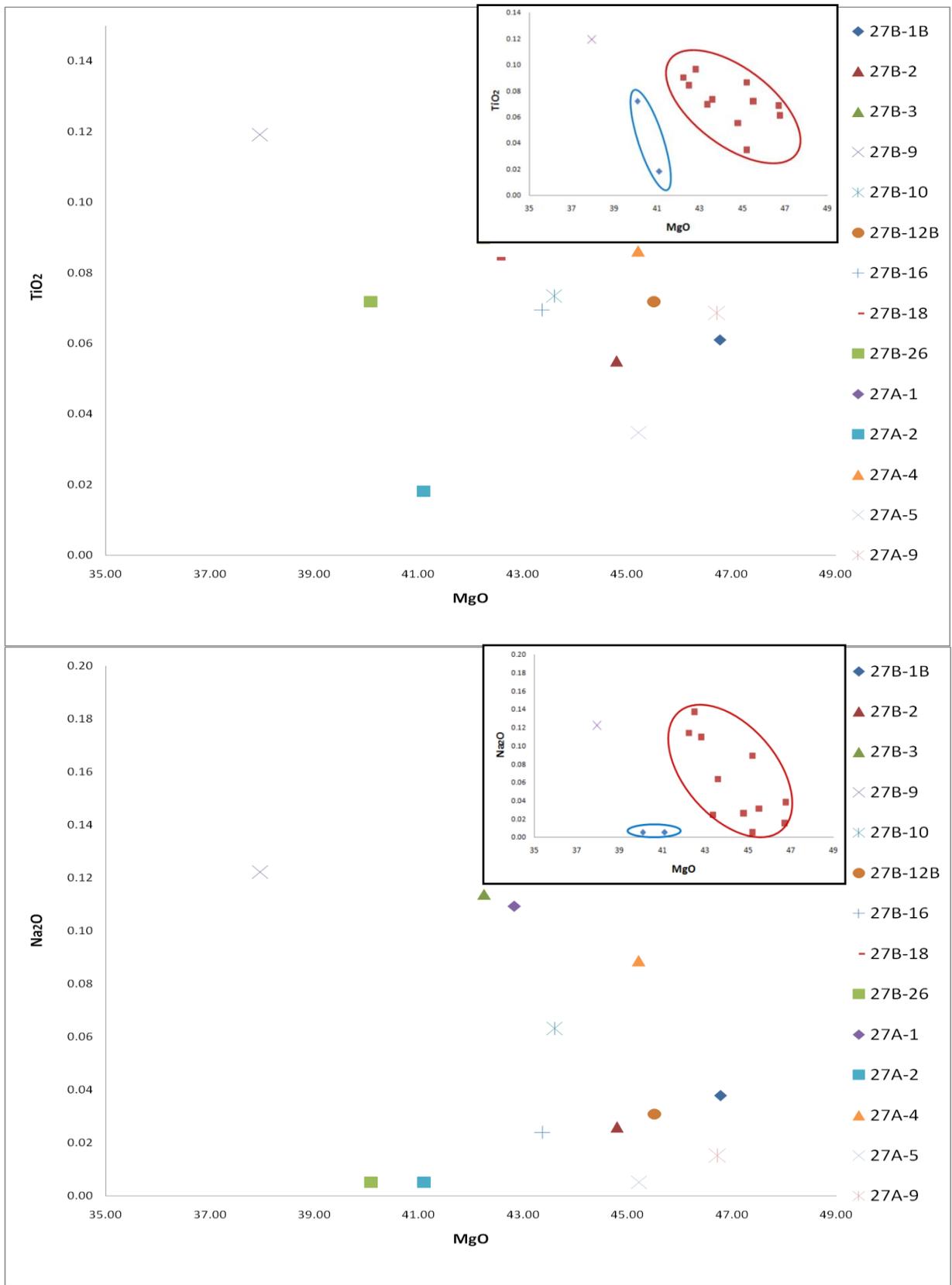


Figura 24: TiO<sub>2</sub> y Na<sub>2</sub>O vs MgO. En círculo azul las muestras que no presentan *spongy rims*, círculo rojo las que si presentan.

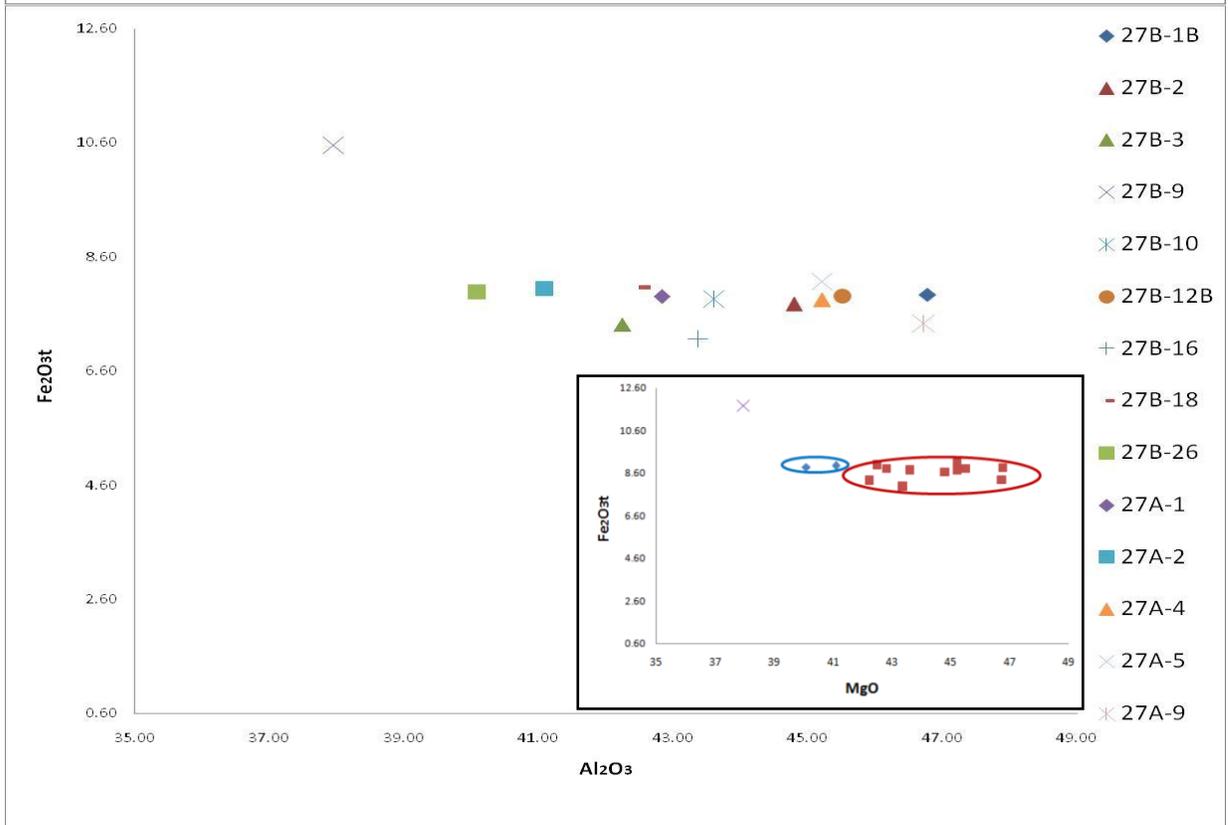
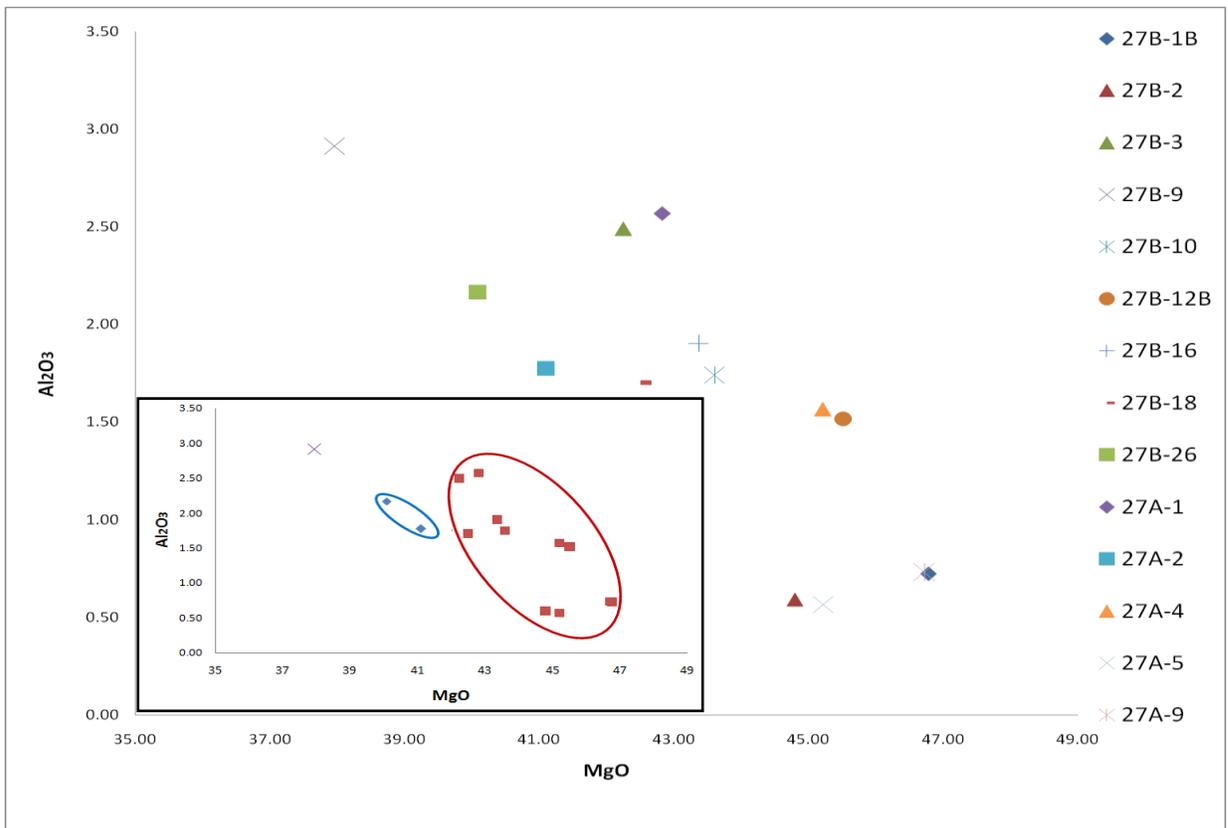


Figura 25:  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  como Fe total vs MgO. En círculo azul las muestras que no presentan *spongy rims*, círculo rojo las que si presentan.

## 4.2 Química mineral de elementos mayores

Se realizaron análisis de microsonda en minerales para las muestras PM27B-1B, PM27B-2c y PM27A-9, incluyendo un análisis a un *spongy rim* de la muestra PM27B-2c por medio de microsonda. Los detalles se encuentran en la Tabla 7.

El #Mg del olivino, ortopiroxeno y clinopiroxeno va entre 0.91 y 0.92, mientras que el #Mg de la espinela es más variable y va de 0.70 a 0.76. El olivino presenta contenidos de  $Fo_{91-92}$ . El ortopiroxeno corresponde a hiperstena, con contenidos entre  $En_{88.89-90.88}$   $Fs_{7.92-8.66}$   $Wo_{1.18-1.52}$ . El clinopiroxeno es dióxido y tiene composiciones que varían entre  $En_{48.86-50.89}$   $Fs_{4.35-5.23}$   $Wo_{43.96-46.58}$ .

Olivinos y ortopiroxenos presentan concentraciones similares de óxidos mayores para las tres muestras en relación a valores de #Mg, con excepción de  $TiO_2$  en el ortopiroxeno. Los clinopiroxenos presentan distintos valores en  $Na_2O$  y  $TiO_2$  si se comparan las tres muestras. El contenido de  $CaO$  y  $TiO_2$  se encuentra enriquecido en el *spongy rim* y empobrecido en  $Na_2O$  y  $Al_2O_3$  en relación al centro del clinopiroxeno. Las espinelas presentan contenidos variables de  $TiO_2$  y  $Al_2O_3$  para los distintos xenolitos (Figuras 26 y 27).

Tabla 7: Análisis de elementos mayores en % peso para minerales en las muestras PM27B-1B, PM27B-2c y PM27A-9. En, Fs y Wo; contenidos de enstatita, ferrosilita y wollastonita para piroxenos. Fo y Fa contenidos de fosterita y fayalita para olivino.

PM27B-1B	SiO2	TiO2	Al2O3	Cr2O3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na2O	NiO	Total	Mxs	#Mg	En	Fs	Wo	Fo	Fa
Ol	41.18	0.01	0.02	0.02	8.92	0.12	50.65	0.05	0.02	0.35	101.33	4 Ol 1	0.91				0.91	0.09
Ol	41.39	0.00	0.02	0.00	8.84	0.15	50.92	0.06	0.00	0.36	101.75	4 Ol 2	0.91				0.91	0.09
Opx	56.03	0.10	3.45	0.45	5.68	0.13	34.06	0.62	0.10	0.08	100.71	4 Opx 1	0.91	90.16	8.66	1.18		
Opx	55.85	0.10	3.55	0.43	5.51	0.13	33.88	0.65	0.12	0.12	100.34	4 Opx 2	0.92	90.29	8.46	1.25		
Cpx	53.00	0.36	5.44	1.14	2.40	0.06	15.50	20.34	1.77	0.05	100.06	4 Cpx 1	0.92	49.20	4.39	46.41		
Cpx	52.54	0.39	5.59	1.27	2.41	0.07	15.52	20.21	1.79	0.04	99.82	4 Cpx 2	0.92	49.36	4.44	46.20		
Cpx	52.71	0.43	5.67	1.27	2.45	0.09	15.34	20.35	1.80	0.03	100.15	4 Cpx 3	0.92	48.86	4.56	46.58		
Sp	0.04	0.18	47.92	21.72	11.57	0.16	19.60	0.00	0.01	0.30	101.50	4 sp 1	0.75					
Sp	0.03	0.23	47.58	21.70	11.35	0.14	19.92	0.01	0.01	0.29	101.26	4 sp 2	0.76					
PM27B-2c	SiO2	TiO2	Al2O3	Cr2O3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na2O	NiO	Total	Mxs						
Ol	41.27	0.01	0.03	0.05	8.82	0.11	50.79	0.08	0.01	0.39	101.57	1 Ol 1	0.91				0.91	0.09
Ol	41.10	0.00	0.03	0.04	8.64	0.10	50.97	0.06	0.02	0.40	101.36	1 Ol 2	0.91				0.91	0.09
Ol	41.14	0.00	0.02	0.03	8.78	0.11	50.95	0.08	0.01	0.36	101.48	1 Ol 3	0.91				0.91	0.09
Opx	56.10	0.08	3.29	0.53	5.52	0.11	34.20	0.69	0.15	0.12	100.79	1 Opx 1	0.92	90.31	8.37	1.32		
Opx	56.02	0.07	3.43	0.60	5.63	0.12	33.80	0.80	0.15	0.09	100.69	1 Opx 2	0.91	89.89	8.59	1.52		
Cpx	53.45	0.23	5.25	1.47	2.84	0.12	16.14	19.43	1.84	0.06	100.83	1 Cpx 1	0.91	50.81	5.23	43.96		
Cpx	53.22	0.23	5.40	1.47	2.82	0.08	16.11	19.36	1.79	0.08	100.57	1 Cpx 2	0.91	50.89	5.15	43.96		
Cpx	52.90	0.24	5.27	1.49	2.84	0.08	16.18	19.37	1.78	0.01	100.17	1 Cpx 2	0.91	50.97	5.19	43.85		
Cpx	52.47	0.45	3.35	1.50	3.01	0.09	16.99	22.02	0.57	0.06	100.51	1 Cpx 2 rim	0.91	49.16	5.04	45.80		
Sp	0.05	0.22	39.56	28.87	13.81	0.20	18.72	0.00	0.02	0.30	101.74	1 Sp 1	0.71					
Sp	0.04	0.23	39.33	28.78	13.84	0.18	18.48	0.00	0.00	0.25	101.14	1 Sp 2	0.70					
PM27A-9	SiO2	TiO2	Al2O3	Cr2O3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na2O	NiO	Total	Mxs						
Ol	41.28	0.00	0.02	0.01	8.27	0.14	51.33	0.04	0.02	0.36	101.46	2 Ol 1	0.92				0.92	0.08
Ol	41.17	0.00	0.02	0.02	8.30	0.11	51.67	0.07	0.01	0.38	101.75	2 Ol 2	0.92				0.92	0.08
Ol	41.17	0.00	0.02	0.02	8.25	0.10	51.34	0.06	0.02	0.43	101.40	2 Ol 3	0.92				0.92	0.08
Ol	41.27	0.01	0.01	0.00	8.26	0.11	51.07	0.05	0.02	0.37	101.15	2 Ol 4	0.92				0.92	0.08
Opx	56.23	0.13	3.35	0.58	5.27	0.14	34.28	0.62	0.14	0.08	100.84	2 Opx 1	0.92	90.76	8.05	1.19		
Opx	56.19	0.14	3.30	0.55	5.21	0.11	34.38	0.64	0.14	0.11	100.77	2 Opx 2	0.92	90.88	7.92	1.21		
Cpx	53.09	0.54	5.84	1.59	2.44	0.06	15.54	19.30	2.21	0.06	100.69	2 Cpx 1	0.92	50.41	4.58	45.01		
Cpx	53.03	0.55	5.83	1.61	2.40	0.08	15.58	19.16	2.23	0.10	100.56	2 Cpx 2	0.92	50.67	4.55	44.78		
Cpx	52.83	0.54	5.78	1.52	2.33	0.06	15.51	19.60	2.18	0.04	100.39	2 Cpx 3	0.92	50.13	4.35	45.52		
Sp	0.03	0.35	42.95	26.26	12.04	0.14	19.41	0.00	0.01	0.27	101.46	2 Sp 1	0.74					
Sp	0.03	0.31	42.93	25.67	11.91	0.16	19.37	0.00	0.02	0.28	100.67	2 Sp 2	0.74					
Sp	0.03	0.34	42.91	25.97	12.19	0.17	19.36	0.00	0.01	0.27	101.24	2 Sp 3	0.74					

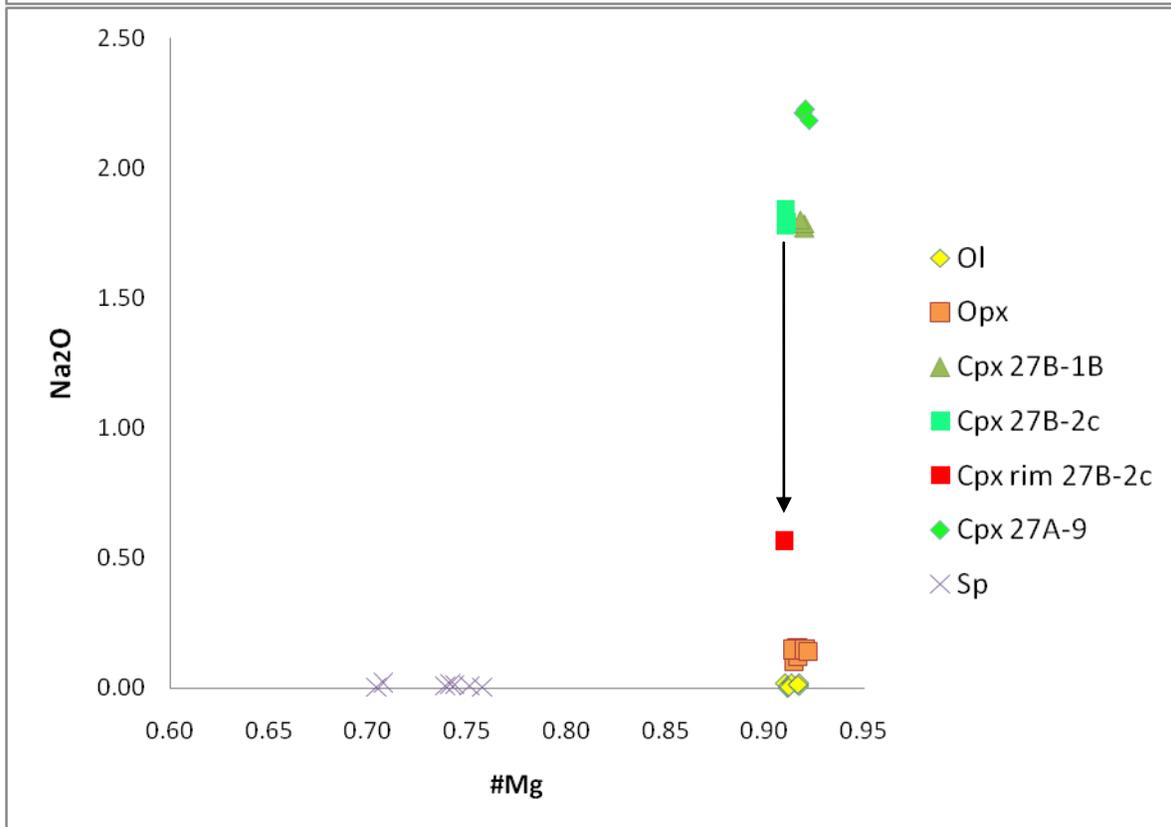
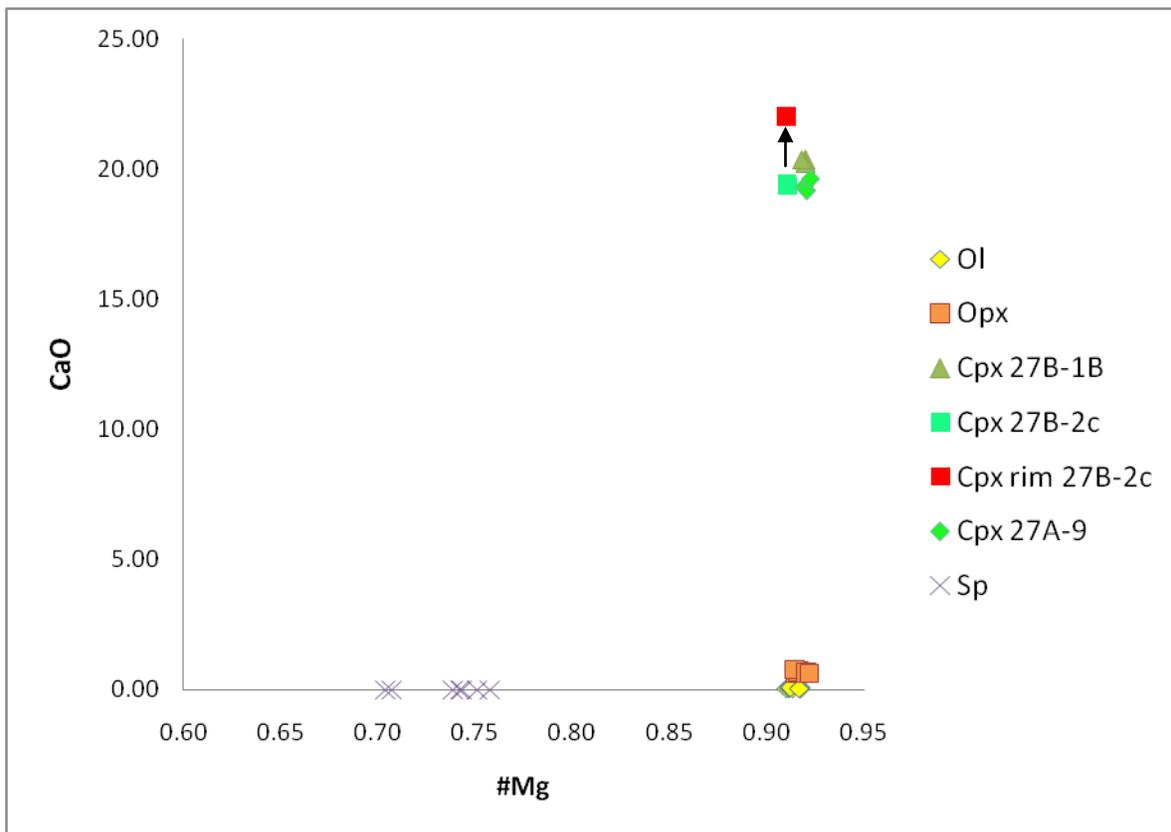


Figura 26: Gráfico de contenidos minerales de óxidos vs número magnésico en xenolitos. CaO y Na<sub>2</sub>O vs #Mg. Las flechas indican la tendencia del centro al spongy rim en la muestra PM27B-2c.

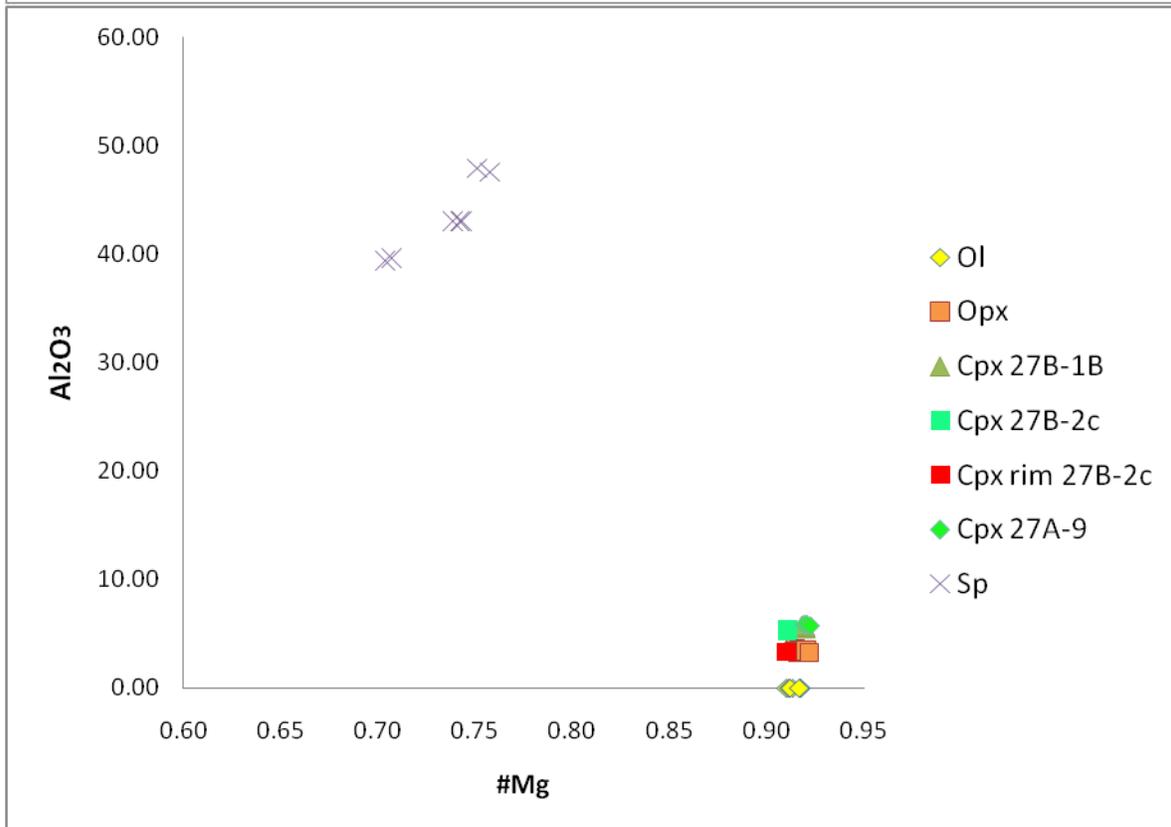
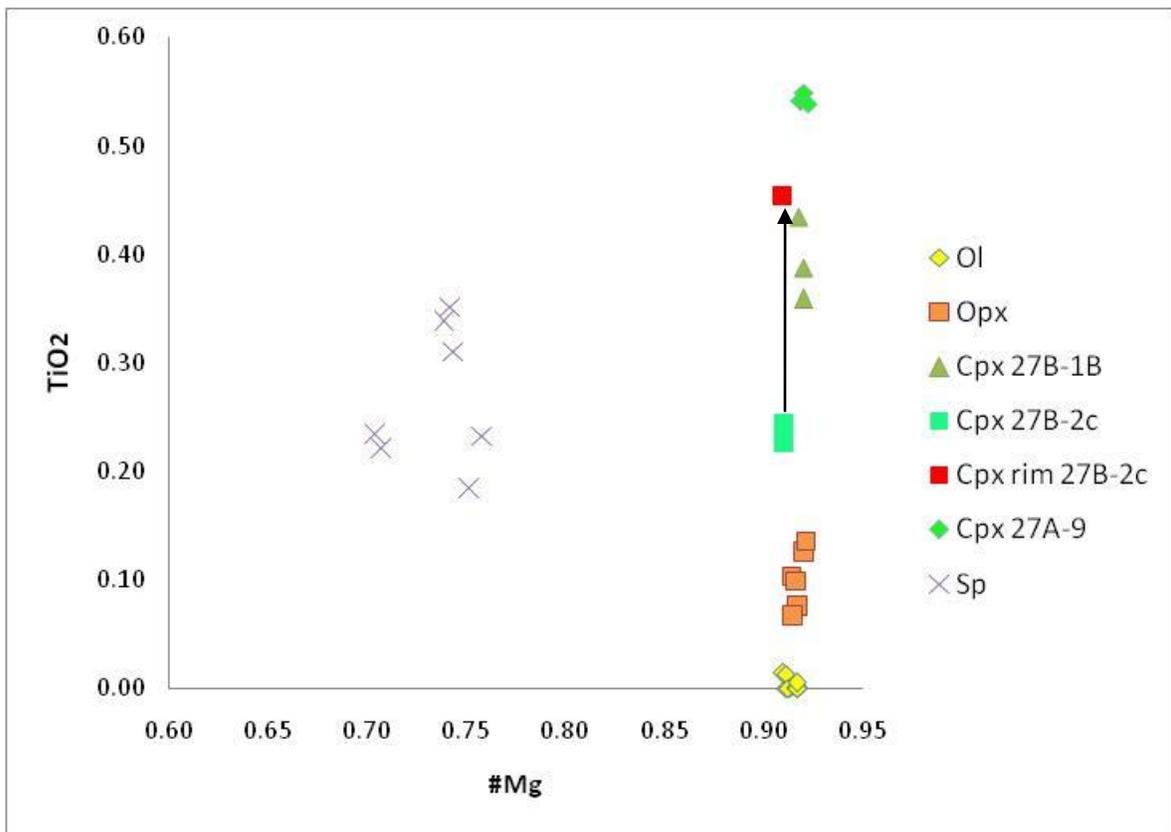


Figura 27: Gráfico de contenidos minerales de óxidos vs número magnésico en xenolitos. TiO<sub>2</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vs #Mg. Las flechas indican la tendencia del centro al spongy rim en la muestra PM27B-2c.

## 5 Condiciones de formación

En este capítulo se emplean distintos geotermómetros y un geobarómetro a fin de determinar las condiciones de presión y temperatura en las que estaban equilibrados los xenolitos. Todos los datos de contenido molar en piroxenos son calculados en base a 6 oxígenos.

### 5.1 Geotermometría

Se utilizan cinco geotermómetros distintos, tres propuestos por Brey y Khöler (1990) y dos definidos por Putirka(2008).

El primero propuesto Brey y Khöler (1990) está basado en intercambio de componente enstatítico entre Opx y Cpx dado por la ecuación:

$$T(^{\circ}K)_{BKN} = \frac{23664 + (24.9 + 126.3 * \#Fe^{cpx}) * P(kbar)}{13.38 + \ln K_D^2 + 11.59 * \#Fe^{opx}}$$

Con

$$K_D = \frac{\left(1 - \frac{N_{Ca}^{Cpx}}{1 - N_{Na}^{Cpx}}\right)}{\left(1 - \frac{N_{Ca}^{Opx}}{1 - N_{Na}^{Opx}}\right)}$$

$N_x^y$  es el contenido molar del catión x en el mineral y.  $\#Fe^{px} = \frac{Fe^{+2}}{Fe^{+2} + Mg^{+2}}$ , empleando contenidos molares en el piroxeno respectivo.

El segundo geotermómetro propuesto Brey y Khöler (1990) es basado en la partición de Na entre ortopiroxeno y clinopiroxeno y es definido por la ecuación:

$$T(^{\circ}K)_{Na\ Opx-Cpx} = \frac{35000 + 61.5 * P(kbar)}{\ln D_{Na}^2 + 19.8}$$

Con

$$D_{Na} = \frac{N_{Na}^{Opx}}{N_{Na}^{Cpx}}$$

El último geotermómetro empleado por Brey y Khöler (1990) es determinado por contenido de Ca en Opx, obteniendo la temperatura a través de la siguiente ecuación:

$$T(^{\circ}K)_{(Ca\ en\ Opx)} = \frac{6425 + 26.4 * P(kbar)}{-\ln N_{Ca}^{Opx} + 1.843}$$

Putirka(2008) a partir de datos experimentales y temperaturas obtenidas por el geotermómetro de Brey y Khöler (1990) propone una regresión lineal, basado en la partición de enstatita + ferrosilita ( $Fm_2Si_2O_6 = EnFs$ ; con  $FmO = FeO + MgO + MnO$ ) entre clinopiroxeno y ortopiroxeno, aumentando la precisión en relación a los datos experimentales. La ecuación resultante para el cálculo de temperatura es la número (36) en el ya mencionado trabajo y se calcula como:

$$\frac{10^4}{T(^{\circ}C)_{put-36}} = 11.2 - 1.96 \ln \left( \frac{N_{EnFs}^{cpx}}{N_{EnFs}^{opx}} \right) - 3.3 * N_{Ca}^{cpx} - 25.8 * \frac{N_{CrCaTs}^{cpx}}{2} + 33.2 * N_{Mn}^{opx} - 23.6 N_{Na}^{opx} - 2.8 * N_{En}^{opx} - 8.33 * N_{Di}^{opx} - 0.005 * P(kbar)$$

Para desarrollar la ecuación hay que comprender la diversa simbología, Putirka(2008) la define a través del siguiente algoritmo f

Se asignan los valores:

$$N_{Al(iv)}^{px} = 2 - N_{Si}^{px}; N_{Al(vi)}^{px} = N_{Al}^{px} - N_{Al(iv)}^{px}$$

Para clinopiroxeno se define la variable

$$N_{Jd}^{cpx} = N_{Al(iv)}^{cpx} \text{ o } N_{Na}^{cpx} \text{ asociandolo al menor valor.}$$

Si existe exceso de  $N_{Al(iv)}^{cpx}$  posterior de formar  $N_{Jd}^{cpx}$  se asigna éste a :

$$N_{CaTs}^{cpx} = N_{Al(vi)}^{cpx} - N_{Jd}^{cpx}$$

Si  $N_{Al(iv)}^{cpx} > N_{CaTs}^{cpx}$  entonces se define:

$$N_{CaTi}^{cpx} = \frac{N_{Al(vi)}^{cpx} - N_{CaTs}^{cpx}}{2}$$

Si no se cumple la relación se le asigna un valor 0. Los siguientes valores a asignar corresponden a:

$$N_{CrCaTs}^{cpx} = \frac{N_{cr}^{cpx}}{2}$$

$$N_{DiHd}^{cpx} = N_{Ca}^{cpx} - N_{CaTi}^{cpx} - N_{CaTs}^{cpx} - N_{CrCaTs}^{cpx}$$

$$N_{EnFs}^{cpx} = \frac{N_{Fe}^{cpx} + N_{Mg}^{cpx} - N_{DiHd}^{cpx}}{2}$$

Finalmente para el ortopiroxeno:

$$N_{En}^{opx} = \frac{N_{EnFs}^{opx} * N_{Mg}^{opx}}{N_{Mg}^{opx} * N_{Fe}^{opx} * N_{Mn}^{opx}}$$

$$N_{Di}^{opx} = \frac{N_{Ca}^{opx} * N_{Mg}^{opx}}{N_{Mg}^{opx} * N_{Fe}^{opx} * N_{Mn}^{opx}}$$

Con

$$\frac{N_{FsEn}^{opx} = N_{Mg}^{opx} + N_{Fe}^{opx} + N_{Mn}^{opx} - (N_{Ti}^{opx} + N_{Ca}^{opx} + N_{Al(iv)}^{opx} - N_{Na}^{opx} - N_{Cr}^{opx})}{2}$$

Este modelo funciona de mejor forma para muestras con #Mg>0.75. Debido a esto Putirka (2008) define un nuevo geotermómetro desarrollado de igual forma que el anterior, pero restringiendo el uso a muestras con #Mg>0.75, definido en su trabajo en la ecuación 37:

$$\frac{10^4}{T(^{\circ}C)_{put-37}} = 13.4 - 3.4 \ln\left(\frac{N_{EnFs}^{cpx}}{N_{EnFs}^{opx}}\right) + 5.59 * \ln\left(\frac{N_{Mg}^{cpx}}{N_{Mg}^{opx}}\right) - 8.8 * (\#Mg^{cpx}) + 23.85 * N_{Mn}^{opx} \\ + 6.48 * (N_{Al(iv)}^{opx} - N_{Na}^{opx} - N_{Cr}^{opx}) - 2.38 * N_{Di}^{cpx} - 0.044 * P(kbar)$$

Asignando valores análogamente al proceso anterior, y con #Mg<sup>cpx</sup> siendo el número de magnesio del clinopiroxeno.

## 5.2 Geobarometría

Para el cálculo de presión se empleó el geobarómetro definido por Putirka (2008) en base a regresiones lineales, utilizando la estrategia propuesta por Mercier et. al. (1984). Al igual que el último geotermómetro el geobarómetro es válido para muestras con #Mg>0.75. Se define en la ecuación 38 del trabajo de Putirka(2008) como:

$$P(kbar)_{put-38} = -279.8 + 293 * N_{Al(iv)}^{opx} + 455 * N_{Na}^{opx} + 229 * N_{Cr}^{opx} + 519 * N_{FsEn}^{opx} - 563 * N_{En}^{opx} + 371 * N_{Di}^{opx} + 327 * a_{En}^{opx} + \frac{1.19}{K_f}$$

Con

$$K_f = \frac{N_{Ca}^{opx}}{1 - N_{Ca}^{opx}}$$

$$N_{En}^{opx} = \frac{N_{FsEn}^{opx} * N_{Mg}^{opx}}{N_{Mg}^{opx} + N_{Mn}^{opx} + N_{Fe}^{opx}}$$

$$N_{Di}^{opx} = \frac{N_{Ca}^{opx} * N_{Mg}^{opx}}{N_{Mg}^{opx} + N_{Mn}^{opx} + N_{Fe}^{opx}}$$

Y la actividad de enstatita en ortopiroxeno es definida como:

$$a_{En}^{opx} = \left( \frac{0.5 * N_{Mg}^{opx}}{N_{Ca}^{opx} + 0.5 * N_{Fe^{+2}}^{opx} + N_{Mn}^{opx} + N_{Na}^{opx}} \right) \left( \frac{0.5 * N_{Mg}^{opx}}{0.5 * N_{Fe^{+2}}^{opx} + N_{Fe^{+3}}^{opx} + N_{Al(vi)}^{opx} + N_{Ti}^{opx} + N_{Cr}^{opx} + 0.5 * N_{Mg}^{opx}} \right)$$

Donde

$$Fe^{+3} = Al(iv) + Na - Al(vi) - Cr - 2Ti$$

$$N_{Fe^{+2}}^{opx} = N_{Fe}^{opx} - N_{Fe^{+3}}^{opx}$$

Con un error asociado de  $\pm 3.7$  kbar

Las distintos valores determinados por los geotermómetros y geobarómetros fueron calculados a partir de un archivo excel elaborado por Putirka(2008) obtenido de la página web de la *Mineralogical Society of America* ([www.minsocam.org/MSA/RIM/RiM69\\_Ch03\\_two-pyroxene\\_P-T.xls](http://www.minsocam.org/MSA/RIM/RiM69_Ch03_two-pyroxene_P-T.xls)) . Las fórmulas fueron revisadas y no presentan observación. Los resultados se detallan en la Tabla 8.

Las temperaturas determinadas por los diversos métodos se encuentran en rangos de 870° a 1130°C, teniéndose valores excepcionales de 1362 y 1391 °C determinados por el contenido de la partición de Na entre Opx y Cpx en el *spongy rim*.

Para los cinco geotermómetros se infiere que si bien es necesario asignar una presión para determinar la temperatura, ésta no influye de manera significativa, con máximas diferencias de hasta 40°C para presiones entre 10 y 20 kbar.

Las diferencias entre las temperaturas determinadas para los xenolitos por los distintos métodos no son de magnitudes importantes, con diferencias promedio menores a 40°C. Una excepción es el geotermómetro basado en contenido de Ca en ortopiroxeno, determinando menores temperaturas con diferencias promedio de 100°C en relación a los demás.

La temperatura determinada en el *spongy rim* en relación al centro del clinopiroxeno es la que presenta mayores desacuerdos. El geotermómetro basado en los intercambio de Na entre piroxenos calcula temperaturas mayores en el *spongy rim*, mientras que  $T_{BKN}$  y  $T_{put-37}$  otorgan una valor superior a la temperatura en el centro. El geotermómetro de Ca en ortopiroxeno y el  $T_{put-36}$  no presentan variaciones significativas.

Las presiones obtenidas para los tres xenolitos por los geobarómetros van entre 12 a 14.5 kbar, siendo 8.3 kbar en el *spongy rim* la presión más baja determinada.

Tabla 8 Temperaturas en °C determinadas por los distintos métodos. Presión en kbar.

Muestra	$T_{BKN}$ -mín.	$T_{BKN}$ -máx.	$T_{Ca}$ en Opx-mín	$T_{Ca}$ en Opx-máx	$T_{Na}$ Opx-Cpx-mín	$T_{Na}$ Opx-Cpx-máx
PM27B-1B	959	977	922	969	1009	1031
PM27B-2c	1065	1085	956	1004	1080	1103
PM27B-2c rim	980	999	956	1004	1362	1391
PM27A-9	1012	1030	918	965	1020	1042
Muestra	T-Put(36)-mín	T-Put (36)-máx	T-Put(37)-mín	T-Put (37)-máx	P(kbar) Put (38)	
PM27B-1B	990	1042	971	1014	12.1	
PM27B-2c	1070	1130	1061	1113	13.0	
PM27B-2c rim	1070	1131	983	1027	8.3	
PM27A-9	1031	1087	1029	1078	14.5	

## 6 Análisis y discusión.

### 6.1 Relaciones petrografía-geoquímica y problemas de representatividad

Cuando se comparan las diversas metodologías para la determinación del porcentaje mineral en las muestras se pueden juntar dos grupos de resultados similares. Los determinados a través de la sección transparente, y los determinados a través de geoquímica de roca total. Una explicación al porqué ocurre esto es la información contenida en cada grupo. El primero analiza la sección transparente, es decir un área en 2D, mientras que el segundo analiza un volumen de roca, abarcando 3D, incluyendo más información. Al ver el problema de esa forma es fácil darse cuenta que en rocas de grano grueso y de poca área, como los xenolitos mantélicos, basta que existan heterogeneidades locales para cambiar drásticamente los porcentajes minerales.

### 6.2 Química de roca total y petrografía

Según la clasificación de Pearson (2005), los xenolitos mantélicos del volcán Auvernia son clasificados en el grupo 1B-lherzolita rica en Cr-Diópsido, correspondientes a xenolitos hallados en magmas alcalinos en una configuración no cratónica (no pertenecientes al Eon Arqueano), con  $\#Mg > 0.85$  y un promedio  $\#Mg = 90$ .

Para los xenolitos de Patagonia Bjerg et. al. (2005) determina que a un mayor grado de deformación, evidenciado por su textura y posición en el ciclo descrito por Mercier y Nicolas (1985) se tienen muestras que han sufrido mayores procesos de fusión parcial. Sin embargo los xenolitos mantélicos de Auvernia no muestran ese patrón (Figura 28). Una posible explicación es que casi la totalidad de las muestras clasifica como protogranular I, siendo la transición a la textura porfiroclástica muy leve. La muestra clasificada como wherlita tampoco cumple lo mencionado, caracterizada por la composición más primitiva de todas las muestras. Una excepción corresponde a la muestra PM27B-1A, con textura protogranular II, que coincide con ser una de las muestras con mayor contenido de MgO y menor contenido de  $Al_2O_3$  indicando mayores procesos de fusión parcial. A partir de estas tendencias lineales se deduce que los xenolitos mantélicos de Auvernia han sufrido diversos procesos de fusión parcial

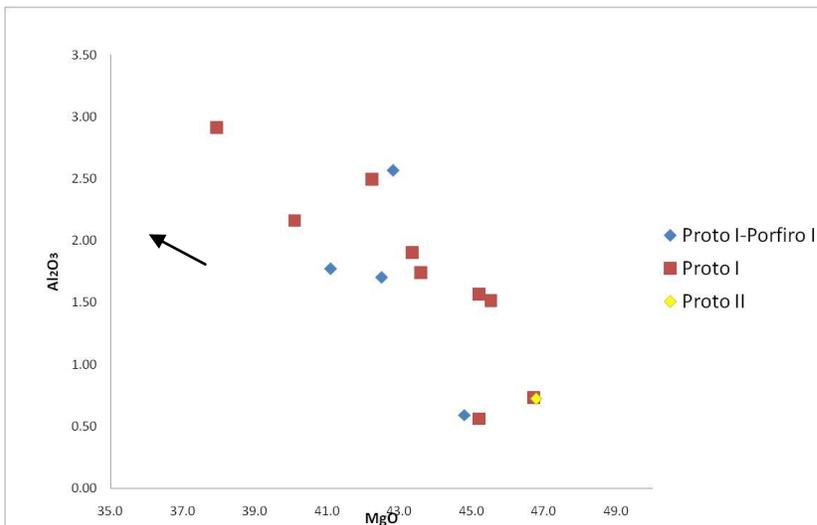


Figura 28: Gráfico de  $Al_2O_3$  vs  $MgO$  para las muestras según clasificación Mercier y Nicolas (1975). La flecha indica hacia donde se encuentra la wherlita.

Otra relación esperada es la deducida a partir de la reacción para formar un fundido basáltico a partir de las rocas del manto. Pearson (2005) grafica esta creación a partir de la fusión de 0.83 moles de clinopiroxeno, 0.33 moles de ortopiroxeno y 0.06 moles de espinela, desplazándose la composición mineralógica a una más pobre en clinopiroxeno. A partir de lo se espera composiciones de lherzolitas sean más primitivas que las de las hazburgitas, suposición que no se cumple. Esto puede ser explicado debido a que la mayoría de las muestras presentan proporciones de minerales muy cercanas al límite de la lherzolita-hazburgita, lo que sumado al problema de representatividad analizado anteriormente causa que su clasificación a partir de la sección transparente no necesariamente sea correcta.

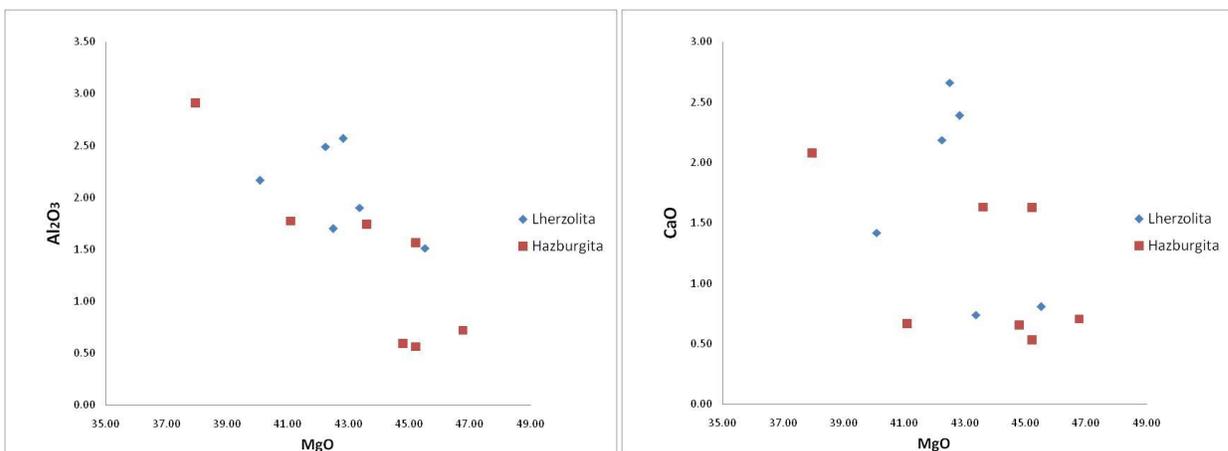


Figura 29:  $Al_2O_3$  y  $CaO$  vs  $MgO$ , las lherzolitas y hazburgitas están similarmente distribuidas.

### 6.3 Clasificación de xenolitos mantélicos

A partir de la presencia de spongy rims y respaldado en la presencia de química mineral los xenolitos mantélicos de Auvernia pueden ser clasificados en tres grupos:

**Grupo 1:** Corresponde a las muestras PM27A-2 y PM27B-26. No presentan *spongy rims* en los clinopiroxenos y además son las únicas muestras que presentan claros rasgos de exsolución dentro de piroxenos. Presentan menores valores de MgO y los menores valores de NaO<sub>2</sub>.

**Grupo 2:** Corresponde a todas las muestras restantes, salvo la wherlita. Petrográficamente todas muestran *spongy rims*.

**Grupo 3:** Correspondiente a la wherlita. Los clinopiroxenos en esta muestra son los que son más afectados por la presencia de *spongy rims*, además no se presentan ortopiroxenos ni espinelas. Presenta los menores valores de MgO y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y los mayores de NaO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub> y CaO.

La muestra PM27B-9 se excluye de la clasificación dentro de los grupos, pues no se encuentra un patrón asociado a los anteriores ni tampoco se explican los bajos valores de MgO, SiO<sub>2</sub> y altos valores de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Las asociaciones realizadas para las muestras están en directa relación con la presencia de los *spongy rims* en clinopiroxenos. Estos han sido analizados por distintos autores, algunos de los cuales postulan la creación por un metasomatismo producido por el basalto hospedante (Shaw et al., 2006), por una fusión parcial de clinopiroxeno consecuencia de un evento descompresivo previo a la interacción con el basalto hospedante (Su et al., 2011), o por una fusión parcial incongruente inducida por penetración de fluidos de baja densidad (Carpenter et al., 2002).

En el caso de los xenolitos de Auvernia no se observa petrográficamente que los *spongy rims* estén asociados al basalto hospedante, no encontrándose en zonas de contacto directo, y sí en zonas donde no existen signos de interacción con éste (un indicador mejor para interacción basalto-xenolito sería las reacciones observadas en la espinela u ortopiroxeno).

Carpenter et al. (2002) en base a relaciones petrográficas y químicas de elementos presentes en *melt pockets* asocia la creación de *spongy rims* a un fundido de baja densidad. En su trabajo sugiere a los *melt pocket* como testigos de un fundido primario y coetáneo responsable del metasomatismo, dado similitudes entre #Mg en ellos y los clinopiroxenos. Así mismo da cuenta de bajas razones de K/Na en *melt pockes* que son consistentes con el empobrecimiento en razones NaAlSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>/ NaFe<sup>+3</sup>Si<sub>2</sub>O<sub>6</sub> apreciados en los *spongy rims*.

Su et al. (2011) plantea a partir de relaciones petrográficas la creación de los *spongy rims* asociados a un evento descompresivo ocasionando fusión parcial, contemplando un mayor desarrollo de esta textura en sitios donde los cristales poseen más espacio como en puntos triples y en bordes más amplio. Además de determinar presencia de ilmenita dentro de los *spongy rims*, la que sería provocada por un proceso de exsolución durante un evento descompresivo. En contra de la formación de la textura por un fundido de baja densidad, como el discutido en el párrafo anterior, observa diferencias entre los contactos de los clinopiroxenos con *spongy rims* con minerales y los *melt pockets*, pudiéndose apreciar a los *spongy rims* preservados en el primer caso, mientras que en el contacto con los *melt pockets* se estarían disolviendo, evidenciando dos eventos. Un primero de creación de los *spongy rims* y un segundo asociado a la infiltración de un fundido responsable de crear los *melt pockets*.

Para los xenolitos mantélicos del volcán Auvernia resulta difícil discriminar el origen de la textura de *spongy rim* dado que no se poseen análisis ni clara identificación de los *melt pockets*, además de no apreciarse relaciones de estos con el espacio (no existe mayor desarrollo en los puntos triples ni en las fracturas como menciona Su et al. (2011)). Sin embargo, para tener una posible tentativa de respuesta y basado en estudios realizados por Gorrington y Kay (2000a) y Laurora et al. (2001) en Gobernador Gregores, localidad cercana (ver Figura 1), de edad similar en cuanto a los basaltos portadores de los xenolitos y que presenta *spongy rims* en los clinopiroxenos, se postula la formación de la textura observada en el clinopiroxeno a través de fundidos de baja densidad. La creación de esta textura a través de metasomatismo asociado a fundidos es más intuitiva además para el caso de la wherlita, la cual pudo haber sido creada por una mayor cercanía o un mayor tiempo de residencia del fundido responsable del metasomatismo; el que podría haber actuado como catalizador para una recristalización de tipo poligonal.

En este punto surge otra interrogante la que corresponde a la génesis y el tipo del fundido de baja densidad, Gorrington y Kay (2000a) y Laurora et al. (2001) entregan dos soluciones diferentes:

El primero postula un metasomatismo asociado a un fundido carbonatítico derivado del manto, a partir de indicadores como altas razones Ca/Al, Zr/Hf y bajo Ti/Eu, además de una tendencia a la mineralogía de wherlita. Laurora et al. (2001) postula que los indicadores de metasomatismo carbonatítico entregan evidencia inconclusa, teniéndose enriquecimiento en TiO<sub>2</sub> y en algunos xenolitos altas razones CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pero bajas de Na<sub>2</sub>O/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, indicando solamente un enriquecimiento en CaO, además observa petrográficamente que los minerales de ortopiroxeno se encuentran formándose más que disolviéndose, asociando a las wherlitas a posibles dunitas a la que se les adiciona clinopiroxeno. Adicionalmente reconoce apatito rico en Cl, distinto al rico en F típico de localidades asociadas a metasomatismo

carbonatítico, debido a lo que propone un fundido silicatado rico en Cl derivado del slab responsable del metasomatismo.

Una primera pista para determinar el origen del agente de metasomatismo y recordando que las localidades de Auvernia y Gobernador Gregores son las más al este de Patagonia es la que entrega Rivalenti et al. (2004). En su trabajo da cuenta de la disminución del componente del slab y aumento de la signatura E-Morb típica de OIB hacia el E en xenolitos de Patagonia.

Para tener una segunda aproximación para determinar el causante del metasomatismo se emplea un diagrama (Figura 30A) que muestra razones de elementos que presentan variación *spongy rim*-centro del mineral (Na y Ca) normalizados por un elemento inmóvil (Al). Adicionalmente se agrega al gráfico los valores de los basaltos hospedantes de Auvernia y química de xenolitos de Cerro Redondo, localidad en la cual Schilling et al.(2005) da cuenta de un metasomatismo asociado a interacción con el basalto hospedante, con presencia de *spongy rims*. Pudiendo apreciarse una tendencia a la mineralogía de la wherlita como propone Gorrington y Kay (2000a), reforzando la idea de metasomatismo derivado del manto. Adicionalmente en un segundo gráfico (Figura 30B) se muestran valores de fundidos carbonatíticos obtenidos por Sweeney (1994), donde M4 corresponde a resultados experimentales de composición de un fundido carbonatítico con bajas razones Ka/Na, mientras M6 corresponde a un fundido carbonatítico en equilibrio con una hazburgita de espinela, pudiendo asociársele a los xenolitos mantélicos de Auvernia una tendencia este último.

Se debe mencionar que a diferencia de los xenolitos estudiados aquí, los xenolitos mantélicos de Gobernador Gregores presentan además minerales como anfíbolos, flogopita y apatito, lo que puede ser explicado por diferencias en fundidos metasomatizantes derivados del manto, bastaría tenerse una menor cantidad de agua en Auvernia para no formar minerales hidratados. También puede influir la concentración de Na, debido a que las micas y anfíboles llevan este elemento en su estructura, la concentración de este elemento es claramente mayor en Gobernador Gregores.

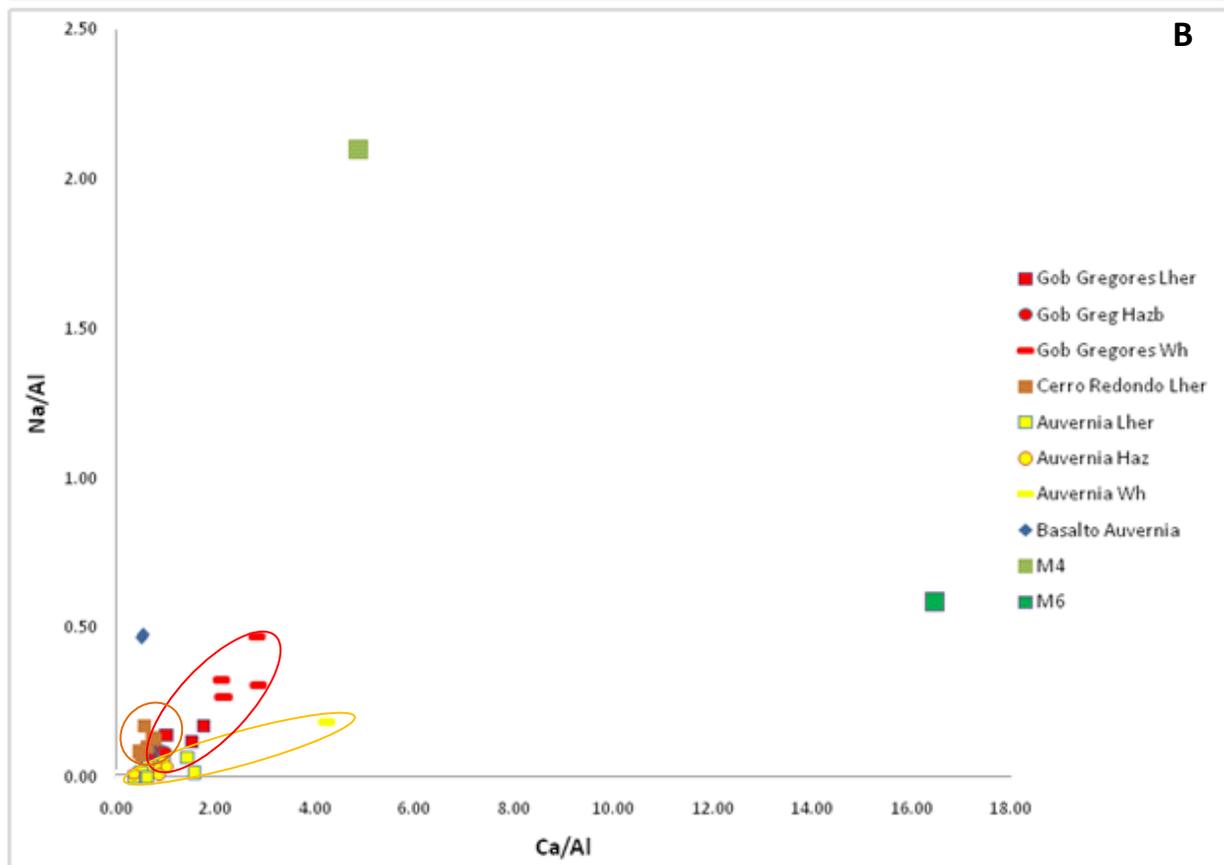
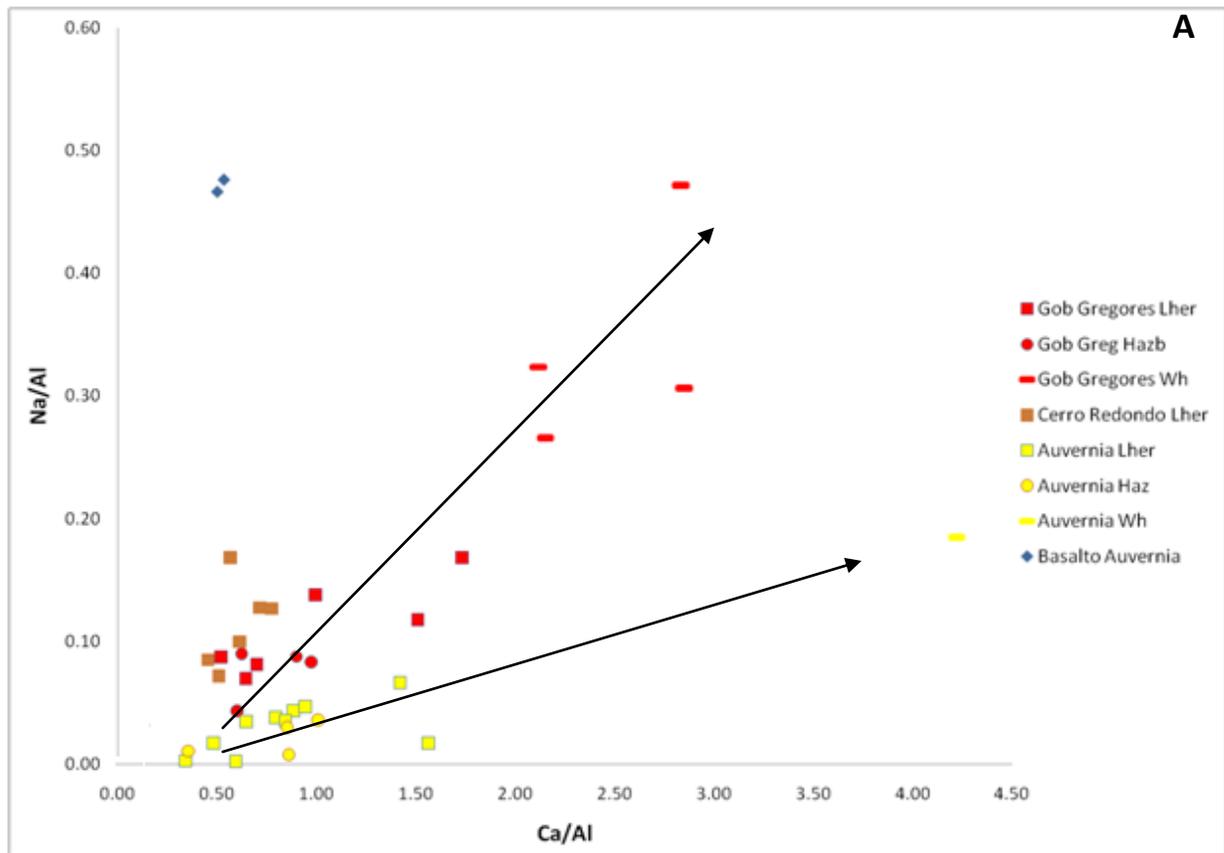


Figura 30 : Gráfico de contenido Na y Ca vs razón Ca/Al.

## 6.4 Química mineral y petrografía

Si bien los distintos grupos están diferenciados por la presencia de los *spongy rims*, las diferencias de elementos mayores existentes entre el grupo 1 y 2 no se ven reflejadas en la totalidad en la química mineral. Así se tiene que en el Na<sub>2</sub>O se encuentra empobrecido en los *spongy rims* en relación al centro del mineral, mientras que las muestras que presentan *spongy rims* están enriquecidas en Na<sub>2</sub>O en relación a las que no presentan. Una posible explicación a esto sería que el contenido de Na<sub>2</sub>O, alojado principalmente en clinopiroxenos, fuese distinto para las muestras del grupo 1 y 2, sin embargo suponiendo que las muestras provienen de un mismo manto no debiesen existir diferencias significativas. Una posible explicación corresponde a que el Na<sub>2</sub>O en exceso esté alojado entre los granos o fracturas de los xenolitos. Un ejemplo de este suceso es el reportado por Ntaflos et. al. (2007) en Tres Lagos, localidad que presenta enriquecimientos de elementos en tierras raras livianas, que no son consistentes con los contenidos de las mismas en los clinopiroxenos, asociando esos contenidos a fluidos alojados en los espacios minerales..

## 6.5 Geotermobarometría

Se eligió el geotermómetro definido en la ecuación 37 del trabajo de Putirka(2008) como indicador de la temperatura representativa. Si bien diversos autores como Putirka(2008), Witt-Eickschen G y O'Neill (2005) , Ntaflos et a.l(2007) y Rivalenti et al(2004) han considerado como el geotermómetro más confiable al T<sub>BKN</sub> de Brey y Köhler (1990), Putirka(2008) realiza mejoras en la precisión en relación a resultados experimentales. De todas formas los dos geotermómetros no presentan mayores diferencias en la determinación de temperaturas. Se descarta el geotermómetro basado en el intercambio de Na dado que su contenido en el *spongy rim* se encuentra alterado y ya que es el único elemento que es tomado en cuenta se puede influir de sobremanera en el resultado al determinar su temperatura.

Tabla 9: Temperatura en °C y presión en kbar escogidas como representativas para las muestras.

Muestra	T-Put(37)-mín	T-Put (37)-máx	P(kbar) Put (38)
PM27B-1B	971	1014	12.1
<b>PM27B-2c</b>	<b>1061</b>	<b>1113</b>	<b>13.0</b>
PM27B-2c rim	983	1027	8.3
<b>PM27A-9</b>	<b>1029</b>	<b>1078</b>	<b>14.5</b>

La temperatura obtenida debiese corresponder a la temperatura de equilibrio del mineral en el sector que fue obtenido del manto, sin embargo puede estar influida por procesos de deformación y recristalización, y el evento de metasomatismo. De las texturas descritas solamente el xenolito PM27B-2 presenta algún grado de deformación, con cristales orientados en sectores siendo un indicio de textura porfiroclástica, sin embargo no es posible observar gran recristalización, por lo que se sugiere que éste proceso no influye de gran manera.

Para la interpretación de la temperatura del *spongy rim* se debe tener cuidado, pues el cálculo de las temperaturas de los distintos geotermómetros se basa en el intercambio de elementos entre orto y clinopiroxeno, sin embargo se supone la reacción generadora de esta textura dada por un fundido carbonatítico el cual no presenta ningún cambio aparente de composición en el ortopiroxeno, por lo que la temperatura obtenida puede no ser la real. Lo mismo ocurre para el caso de la presión, la cual además presenta un gran error asociado ( $\pm 3.7$ ).

Con la consideración anterior la temperatura del *spongy rim* en relación a las otras muestras presenta solamente valores mayores a la PM27B-1B, pudiendo estar afectado el registro de la temperatura el proceso de metasomatismo. Desde el punto de vista de los datos obtenidos por el geobarómetro es interesante notar que el *spongy rim* presenta las presiones más bajas, con diferencias de 4 kbar con las otras, sin embargo se debe tener en cuenta que esa cifra es cercana al error de método.

Otra observación a realizar viene dada por las texturas de exsolución, las que se presentan bien definidas en las muestras que no presentan *spongy rims* y se observan escasamente en las que sí. Si se toma en cuenta que en promedio la temperatura de exsolución de piroxenos es de 900 °C entonces un evento de metasomatismo con la temperatura ya mencionada borraría ese rasgo, explicando la diferencia entre las rocas que presentan *spongy rims* y las que no.

Con todas las consideraciones mencionadas anteriormente se plotean los datos en un diagrama de P-T modificado de Schilling et al(2005), con datos de localidades cercanas, observándose a las muestras con temperaturas más cercanas a Cerro Fraile (Kilian y Stern 2002), con un gradiente mayor al determinado para Pali Aike por Chapman (1986)(Figura 31A). Valores más cercanos son los determinados por Bjerg et al.(2005), para distintas muestras de xenolitos de Patagonia, con gradientes de 13.8 °C/km similares a los encontrados en Australia, gradiente alto asociado a un intenso magmatismo de tras arco ocurrido durante el Plioceno - Pleistoceno.

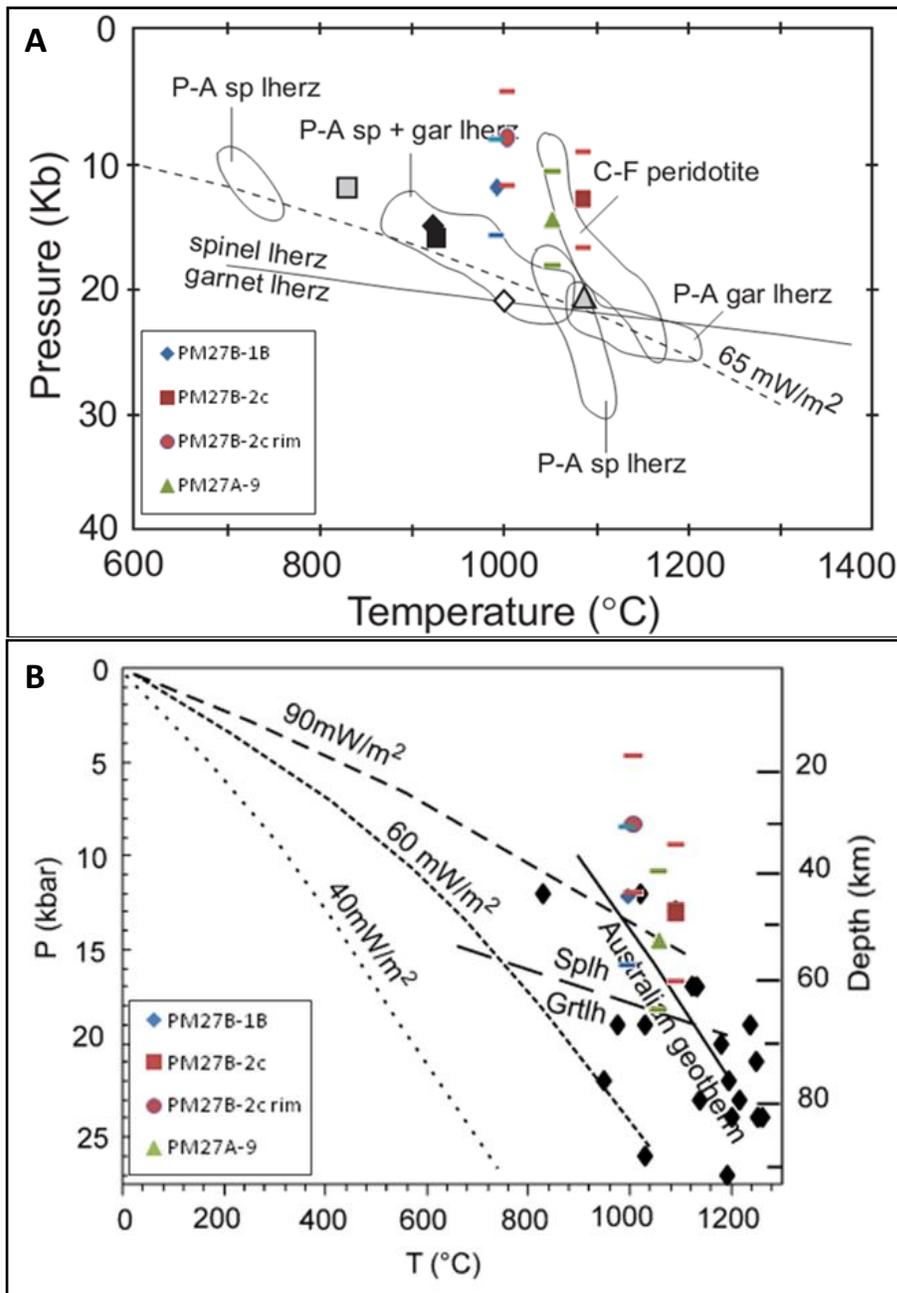


Figura 31: (A) Diagrama P-T obtenido de Schilling et al 2005. P-A (Pali Aike) Kempton et al., 1999a), C-F (Cerro del Fraile) (Kilian y Stern, 2002) símbolos en grises corresponden a las muestras de Cerro Redondo(Schilling et al. 2005). Gradiente de 65 mW/m<sup>2</sup> determinado por Chopman (1986) para xenolitos de Pali Aike. (B) Diagrama P-T obtenido de Bjerg et al.(2005). Puntos negros determinados para diversas localidades de xenolitos en Patagonia. Datos de geoterma Australiana de O'Reilly and Griffin (1985).

## 6.6 Edad

Griffin et al.(2003) a partir de diversas muestras de manto con edades conocidas realiza un diagrama en el cual asigna Eones a las rocas según contenido de fosterita y el porcentaje modal del olivino(Figura 32). Este diagrama se debe usar con precaución, pues procesos tales como metasomatismo pueden alterar el contenido modal de olivino en la roca, lo que es evidente en la wherlita de Auvernia que presenta contenidos de olivino sumamente bajos en relación a las demás muestras. Otro aspecto a considerar es la amplitud en miles de años que contemplan los distintos Eones, entregando un carácter muy vago a la aproximación de ésta.

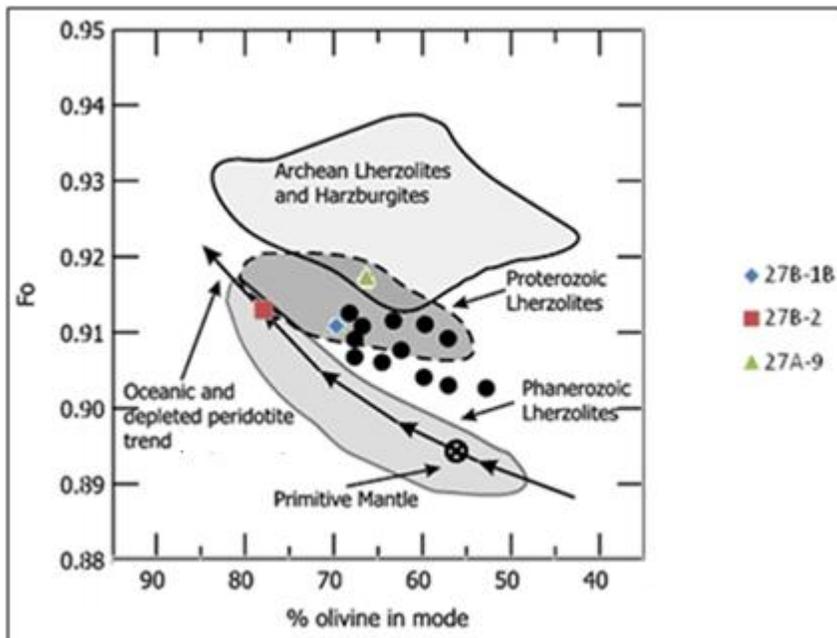


Figura 32: Diagrama realizado por Griffin et al.(2003) para determinación de edades de manto. Círculos negros son datos de muestras de Tres Lagos(Ntaflos et al. 2007). Adicionalmente se agrega la tendencia de empobrecimiento para peridotitas y rocas oceánicas y propuesta por Boyd (1989). Valor del manto primitivo de McDonough y Sun (1995)

Con lo anteriormente mencionado, se deduce del gráfico que las tres muestras de xenolito del volcán Auvernia se encuentran en el campo de las lherzolitas Proterozoicas. De forma de corroborar éstos datos e intentar otorgar una edad más precisa se cita al trabajo de Schilling et al (2008), en el que analizando el sistema isotópico Re-Os obtiene edades modelo de 1.34 a 2.11 Ga, correspondiente a Proterozoico Superior-Medio para la localidad de Gobernador Gregores y Cerro Redondo en el Macizo del Deseado, siendo probablemente las muestras de Auvernia de similar edad.

## 7 Conclusiones

Los xenolitos mantélicos de Auvernia pertenecen a la facies de la espinela y han sufrido diversos procesos de fusión parcial a través de su historia.

Se encontraron problemas de representatividad en las secciones transparentes de los xenolitos mantélicos de Auvernia debido a su tamaño, por lo que se recomienda tomar con cuidado las clasificaciones que impliquen porcentajes de minerales en la roca.

De las relaciones petrográficas y geoquímicas se distinguen tres grupos de xenolitos para Auvernia, los que representan distintas etapas de interacción con un fundido de baja densidad carbonatítico de origen astenosférico (sin interacción grupo 1, con interacción grupo 2, con gran tiempo de interacción grupo 3) con cantidades de agua insuficientes para formar minerales hidratados como flogopita o anfíbola. Producto de la interacción se crean texturas de reacción conocidas como *spongy rims* en los clinopiroxenos, además de la desaparición de rasgos de exsolución. Las diferencias en contenidos de Na<sub>2</sub>O son asignadas a enriquecimiento intergranular producto del mismo evento.

Las condiciones y P-T de las cuales se obtuvieron los xenolitos del manto corresponden a 8.3-14.5 ±3.7 kb y temperaturas de 970 y 1130°C, similares a las encontradas en Cerro el Fraile (Kilian y Stern, 2002), con gradientes mayores a los 65 mW/m<sup>2</sup> determinados en Pali Aike por Chapman (1986).

Los xenolitos mantélicos del volcán Auvernia pertenecen al manto litosférico del Macizo del Deseado de edad Proterozoica superior a media basado en edades modelo de Schilling et al.(2008) en localidades cercanas al volcán Auvernia.

## 8 Referencias

Aliani P., Bjerg E., Ntaflos T., 2004. Evidencias de metasomatismo en el manto sublitosférico de Patagonia. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 59(4), 539-555.

Bjerg E., Ntaflos T., Kurat G., Dobosi G., Labudía C., 2005. The upper mantle beneath Patagonia, Argentina, documented by xenoliths from alkali basalts. *Journal of South American Earth Sciences* 18, 125–145.

Bodinier J., Godard M., 2005. Orogenic, ophiolitic, and abyssal peridotites. Carlson R., Holland H., Turekian K., (Eds). *Treatise on geochemistry: The mantle and core 2*, 103 – 170.

Boullier A-M, Nicolas A, 1973. Texture and fabric of peridotite nodules from kimberlites at Mathae, Thaba Putsoa and Kimberley. En: Nixon, P.H.(Ed) *Lesotho kimberlites. Maseru, Lesotho*. 57–66.

Boyd F., 1989. Composition and distinction between oceanic and cratonic lithosphere. *Earth and Planetary Science Letters* 96, 15–26.

Brey G., Khöler T., 1990. Geothermobarometry in Four-phase Lherzolite II. New Thermobarometers, and Practical Assessment of Existing Thermobarometers. *Journal of Petrology* 31(6), 1353-1378.

Carpenter R., Edgar A., Thibault Y., 2002. Origin of spongy textures in clinopyroxene and spinel from mantle xenoliths, Hessian Depression, Germany. *Mineral Petrology* 74,149–162.

Chapman D., 1986. Thermal gradients in the continental crust. En: Dawson, J., Carswell, D., Hall J., Wedepohl K.,(Eds).The Nature of the Lower Continental Crust, vol. 24. *Geological Society of London.*, 63 – 70.

Conceição R., Mallman G., Koester E., Schilling M., Bertotto G., Rodriguez-Vera A., 2005. Andean subduction-related xenoliths: Isotopic evidence of Sr-Nd decoupling during metasomatism. *Lithos* 82, 273-287.

Cortiñas J., Homoc J., Lucero M., Gobbo E., Lafftte G., Viera A., 2005. Las cuencas de la región del Deseado. En: Chebl, G., (Ed). Frontera exploratoria de la Argentina, 14. *Instituto Argentino del Petróleo y Gas*, 289 306.

Fernández R., Blesa A., Moreira A., Echeveste H., Mykietiuik K, Andrada de Palomera P., Tessone M., 2008. Los depósitos de oro y plata vinculados al magmatismo jurásico de la Patagonia: Revisión y perspectivas para la exploración. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 63 (4), 665 – 681.

Figari E., Courtade S., 1993. Evolución tectosedimentaria de la Cuenca de Cañadón Asfalto, Chubut, Argentina. *12 Congreso Geológico Argentino y 2º Congreso de Exploración de Hidrocarburos*. Actas 1, 66 – 77.

Giacosa R., Márquez M., Panza J., 2002. Basamento Paleozoico inferior del Macizo del Deseado. In: Haller, M., (Ed.). *Geología y Recursos Naturales de la provincia de Santa Cruz, Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino I-2*, 33 – 44.

Giacosa R., Zubia M., Sánchez M., Allard J., 2010. Meso-Cenozoic tectonics of the southern Patagonian foreland : Structural evolution and implications for Au -Ag veins in the eastern Deseado Region (Santa Cruz, Argentina). *Journal of South American Earth Sciences* 30 ,134-150.

Gorring M., Kay S., 2000a. Carbonatite metasomatized peridotite xenoliths from southern Patagonia: implications for lithospheric processes and Neogene plateau magmatism. *Contribution Mineral Petrology* 140, 55-72.

Gorring, M., Kay, S., 2000b. Mantle Processes and Sources of Neogene Slab Window Magmas from Southern Patagonia, Argentina. *Journal Of Petrology*, 42(6):1067-1094.

Gorring, M., Kay, S., Zeitle, P., Ramos, V., Rubiolo D., Fernandez, M., Panza, J., 1997. Neogene Patagonian plateau lavas: Continental magmas associated with ridge collision at the Chile Triple Junction. *Tectonics*, 16(1), 1-17.

Griffin W., O'Really S., Abe N., Aulbach S., Davies R., Pearson N., Doyle B., Kivi K., 2003. The origin and evolution of Archean lithospheric mantle. *Precambrian Research* 127, 19-41.

Guido D., Escolaya M., Schalamuk B., 2004. The basement of the Deseado Massif at Bahía Laura, Patagonia Argentina: a proposal for its evolution. *Journal of South American Earth Sciences* 16, 567-577

Harte B., 1977. Rock nomenclature with particular relation to deformation and recrystallisation textures in olivine-bearing xenoliths. *Journal of Geology* 85,279-288.

Harte B., Hawkesworth C., 1989. Mantle domains and mantle xenoliths. En: Ross J.,(Ed) Kimberlites and Related Rocks. *Geological Society of Australia, special publication* 14 (2), 649–686.

Homovic J., Constantini L., 2001. Hydrocarbon exploration potential within interplate shear-related depocenters: Deseado and San Julián basins, southern Argentina. *American Association of Petroleum Geologist* 85 (10), 1795-1816.

Kempton P., Hawkesworth C., Lopez-Escobar L., Pearson D., Ware A , 1999b. Spinel ± garnet lherzolite xenoliths from Pali Aike: Part 2. Trace element and isotopic evidence bearing on the evolution of lithospheric mantle beneath southern Patagonia. En: Gurney J., Gurney J., Pascoe M., Richardson S. (Eds.). *The J.B., Dawson Volume. Proceedings of the International Kimberlite Conference* 7 ( 1). 415 –428.

Kempton P., Lopez-Escobar L., Hawkesworth, C., Pearson D., Ware A., 1999a. Spinel ± garnet lherzolite xenoliths from Pali Aike: Part 1. Petrology, mineral chemistry and geothermobarometry. En: Gurney J., Gurney J., Pascoe M., Richardson S. (Eds.). *The J.B., Dawson Volume. Proceedings of the International Kimberlite Conference* 7 (1) 403– 414 .

Kilian R., Stern C., 2002. Constraints on the interaction between slab melts and the mantle wedge from adakitic glass in peridotite xenoliths. *European Journal Mineral*, 14 (1), 25 – 36.

- Larson R., 1991. Latest pulse of Earth: Evidence for a mid-Cretaceous superplume. *Geology* 19, 547–550.
- Laurora A., Mazzucchelli M., Rivalenti G., Vannucci R., Zannetti A., Barbieri M., Cingolani C., 2001. Metasomatism and Melting in Carbonated Peridotite Xenoliths from the Mantle Wedge The Gobernador Gregores Case (Southern Patagonia). *Journal of Petrology*, 42(1), 69-87.
- Le Bas M., Le Maitre R., Streckeisen A., Zanettin B., and 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.
- Leanza A., 1958. Geología Regional. En: *La Argentina, Suma de Geografía I-III*, 217-349. Editorial Peuser.
- Lesta P., Ferello R., 1972. Región extraandina del Chubut y norte de Santa Cruz . En A., Leanza (Ed.) *Geología Regional Argentina Academia Nacional de Ciencias*, 601-654.
- McDonough W., Sun S., 1995. The composition of the Earth. *Chemical Geology* 120, 223–253.
- Mercier J., Nicolas A., 1975. Textures and fabrics of upper mantle peridotites as illustrated by basalt xenoliths. *Journal of Petrology* 16(2), 454-487.
- Mercier J., Benoit V., Girardeau J., 1984. Equilibrium state of diopside-bearing harzburgites from ophiolites: geobarometric and geodynamic implications. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 85,391–403.
- Moreira P., Fernández R., Etcheverry R., Schalamuk I., 2005. Complejos de domos Jurásicos (~150 Ma) La Josefina y Maria Esther, sector central del Macizo del Deseado, Patagonia. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 66(3), 335-348.
- Nixon P., 1987. *Mantle Xenoliths*. Nixon P., Wiley & Sons J., (Eds) 844 p.
- Ntaflos Th., Bjerg E., Labudia C., Kurat G., 2007. Depleted lithosphere from the mantle wedge beneath Tres Lagos southern Patagonia, Argentina. *Lithos* 94, 46 – 65.
- O'Reilly S., Griffin W., 1985. A xenolith-derived geotherm for southeastern Australia and its geophysical implications. *Tectonophysics* 111, 41–63
- Palma M., Ubaldón M., 1988. Las sedimentitas Godwanicas de la Formación La Golondrina en la estancia Dos Hermanos, Provincia de Santa Cruz. *Revista de la asociación geológica Argentina XLIII(3)*, 388-403.
- Pankhurst R., Rapela C., Loske W., Márquez M., Fanning C., 2003. Chronological study of the pre-Permian basement rocks of southern Patagonia. *Journal of South American Earth Sciences* 16(1), 27–44.
- Panza J., Franchi M., 2002. Magmatismo Basáltico Cenozoico Extrandino. *Geología y Recursos Naturales de Santa Cruz. Relatorio del XV Congreso Geológico Argentino. El Calafate*, 1-14, 201-236.
- Pearson D., Canil D., Shirey B., 2005. Mantle Samples Included in Volcanic Rocks: Xenoliths and Diamonds. En: Carlson R., Holland H., Turekian K., (Eds). *Treatise on geochemistry: The mantle and core* 2, 171-276.

- Putirka K., 2008. Thermometers and Barometers for Volcanic Systems. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry* 69, 61-120.
- Ramos V., 1979. Tectónica de la región del Río y Lago Belgrano. Cordillera Patagónica, Argentina. *II Congreso Geológico Chileno*. Actas I(B) 1-32.
- Ramos V., 1983. Evolución tectónica y metalogénesis de la cordillera Patagónica. *II Congreso Nacional de Geología Económica, Argentina*. Actas I, 108-124.
- Ramos V., 2002. El magmatismo paleógeno de la cordillera patagónica. En: Haller M. (Ed). Geología y Recursos Naturales de Santa Cruz. *Relatorio del XV Congreso Geológico Argentino. El Calafate*. I-11, 165-175.
- Ramos, V., Mahbulg K., 1992. Southern Patagonian plateau basalts and deformation: backarc testimony of ridge collisions. *Tectonophysics* 205, 261-282.
- Rivalenti G., Mazzuchelli M., Laurora A., Ciuffi S., Zanetti A., Vannucci R., Cingolani., 2004. The backarc mantle lithosphere in Patagonia, South America. *Journal of South American Sciences*, 121-152.
- Scambelluri M., Vannucci R., De Stefano A., Preite-Martinez M., Rivalenti G., 2009. CO<sub>2</sub> fluid and silicate glass as monitor of alkali basalt/peridotite interaction in the mantle wedge beneath Gobernador - Gregores, Southern Patagonia. *Lithos* 107, 121-133.
- Schilling M., Carlson R., Conceição R., Dantas C., Bertotto G., Koester E., 2008. Re –Os isotope constraints on subcontinental lithospheric mantle evolution of southern South America. *Earth and Planetary Science Letters* 268, 89 – 101.
- Schilling M., Conceição R., Mallmann G., Koester E., Kawashita K., Herve´ F., Morata D., Motoki A., 2005. Spinel-facies mantle xenoliths from Cerro Redondo, Argentine Patagonia: Petrographic, geochemical, and isotopic evidence of interaction between xenoliths and host basalt. *Lithos* 82, 485 – 502.
- Shaw C., Heidelbach F., Dingwell D., 2006. The origin of reaction textures in mantle peridotite xenoliths from Sal Island, Cape Verde: the case for “metasomatism” by the host lava. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 151, 681–697.
- Stern C., Kilian R., Olker B., Hauri E., Kyser T., 1999. Evidence from mantle xenoliths for relatively thin (~100 km) continental lithosphere below the Phanerozoic crust of southernmost South America. *Lithos* 48, 217 – 235.
- Stipanovic P., Rodrigo F., Baulies O, Martinez C., 1968. Las formaciones presenonianas en el denominado Macizo Nordpatagónico y regiones adyacentes. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 23(2), 67-98.
- Streckeisen A., 1976. To each plutonic Rock its proper name. *Earth Science Review*. 12, 1-33.

Su B., Zhang H, Sakyi P., Yang Y., Ying J., Tang Y., Qin K., Xiao Y., Zhao X., Mao Q., Ma Y., 2011. The Origin of spongy texture in minerals of mantle xenoliths from the Western Qinling, central China. . *Contributions to Mineralogy and Petrology* 161, 465-482.

Sweeney R., 1994. Carbonatite melt compositions in the Earth's mantle. *Earth and Planetary Science Letters* 128, 259-270.

Wang J., Hattori K., Li J., Stern C., 2008. Oxidation state of Paleozoic subcontinental lithospheric mantle below the Pali Aike volcanic field in southernmost Patagonia. *Lithos* 105, 98 – 110.

Witt-Eickschen G., O'Neill H., 2005. The effect of temperature on the equilibrium distribution of trace elements between clinopyroxene, orthopyroxene, olivine and spinel in upper mantle peridotite. *Chemical Geology* 221, 65-101.

## **CAPITULO ANEXO**

### **METODOLOGIA EXPERIMENTAL**

## Resumen

En el siguiente capítulo se desarrolla una nueva metodología para la determinación de porcentajes en secciones transparentes a partir de un tratamiento realizado en el programa *ENVI 4.7* en las imágenes obtenidas por escáner mencionadas en el capítulo anterior. Se emplean dos métodos distintos prediseñados en el programa, correspondientes a Neural Net (NN) y Support Vector Machine (SVM), los que presentan buenos resultados visuales, funcionando de mejor forma el último método mencionado. Para comparación cuantitativa se realizan análisis de conteo modal, sin embargo, dado que éstos no se realizan en exactamente la misma superficie tratada por el programa no se obtienen buenas correlaciones con los valores obtenidos por los métodos NN y SVM.

## Procesamiento de imágenes

Para el procesamiento de imágenes se utilizaron los programas Photoshop C.2 y ENVI 4.7 en las imágenes de secciones completas obtenidas a través del escáner *EPSON STYLUS PHOTO RX520 Series*. Debido a que los minerales en los xenolitos mantélicos a nicoles paralelos presentan colores característicos y bien definidos, se utilizó el programa *ENVI 4.7* para reconocerlos y determinar porcentajes en las secciones transparentes. Ya que en el programa *ENVI 4.7* solo se puede trabajar en regiones rectangulares y los xenolitos poseen superficies irregulares, se utilizó en primera instancia el programa *Photoshop C.2* para definir un fondo rectangular de color completamente distinto al observado en la mineralogía, de forma de no influir los porcentajes. El color elegido es definido en el programa *Photoshop* por los parámetros R: 255, G:0, B=255. Adicionalmente se omitieron áreas poco nítidas y zonas exteriores en contacto con el magma hospedante. En la Figura anexo imágenes 1 se aprecia el resultado.

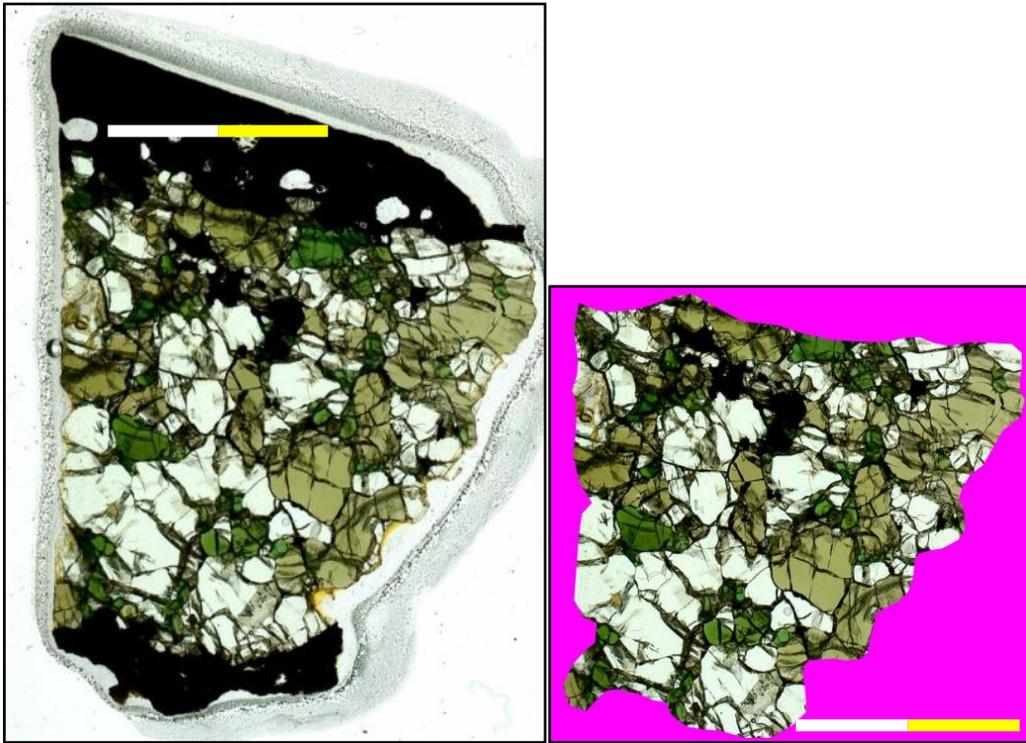


Figura anexo imágenes 1 Proceso de Imágenes en Photoshop C.2. Se define el área del xenolito y se omiten sectores poco nítidos.

Finalizado el tratamiento en el programa *Photoshop* se realiza el siguiente proceso en el programa *ENVI*:

- A)** Se abre la imagen en el programa *ENVI* y se guarda como formato *ENVI Standard*. Para esto se emplea *File - Save File As - Envi Standard* en la ventana principal del programa.
  
- B)** Se definen regiones de interés (ROI), las cuales van a ser las áreas que representen los colores observados para cada mineral. Para esto se emplea *Tool - Region of interest - ROI Tools*, en la barra de opciones de la imagen. Lo óptimo para cada ROI es emplear polígonos simples y de un solo color, abarcando la máxima cantidad de tonalidades observadas en cada mineral. A mayor cantidad y complejidad de polígonos el tiempo de procesamiento es mayor, no variando de forma significativa los resultados obtenidos. En el caso de este trabajo las ROI de interés definidas y sus respectivos colores son 1.-ortopiroxeno, (rojo), 2.- clinopiroxeno (verde), 3.- espinela (azul), 4.-olivino (amarillo), 5.- fractura (cyan), 6.- borde (coral).Un ejemplo de las regiones asignadas se observan en la Figura anexo imágenes 2B.
  
- C)** Ya definidas las ROI se emplea la función del programa que va a extrapolar e identificar las distintas mineralogías. En este trabajo se emplearon dos, Neural Net (NN) y Support Vector Machine (SVM). Para el empleo de éstas se va al menú principal a *Classification – Supervised- Neural Net o Support Vector Machine*, con los parámetros predeterminados por el programa. En ambos casos este procedimiento entrega dos archivos distintos, un primero con una sola banda y el segundo con bandas asignadas a las distintas ROI. En la Figura anexo 2C, D se observan los resultados para ambos métodos definidos para una misma ROI.
  
- D)** Para calcular los porcentajes de cada mineral se emplea la opción *Compute Statistics*, ubicada en el menú principal de ENVI en *Basic Tools – Statistics - Compute Statistics* y se seleccionan los parámetros *Basic stats e Histograms* para el archivo de una sola banda entregado por el proceso anterior.
  
- E)** En el caso de la existencia de dos o más secciones transparentes para un mismo xenolito se procede a la medida del área total de cada uno. Para esto se emplea la opción *Measuremen Tool* ubicada en *Basic Tools* en el menú principal del programa.

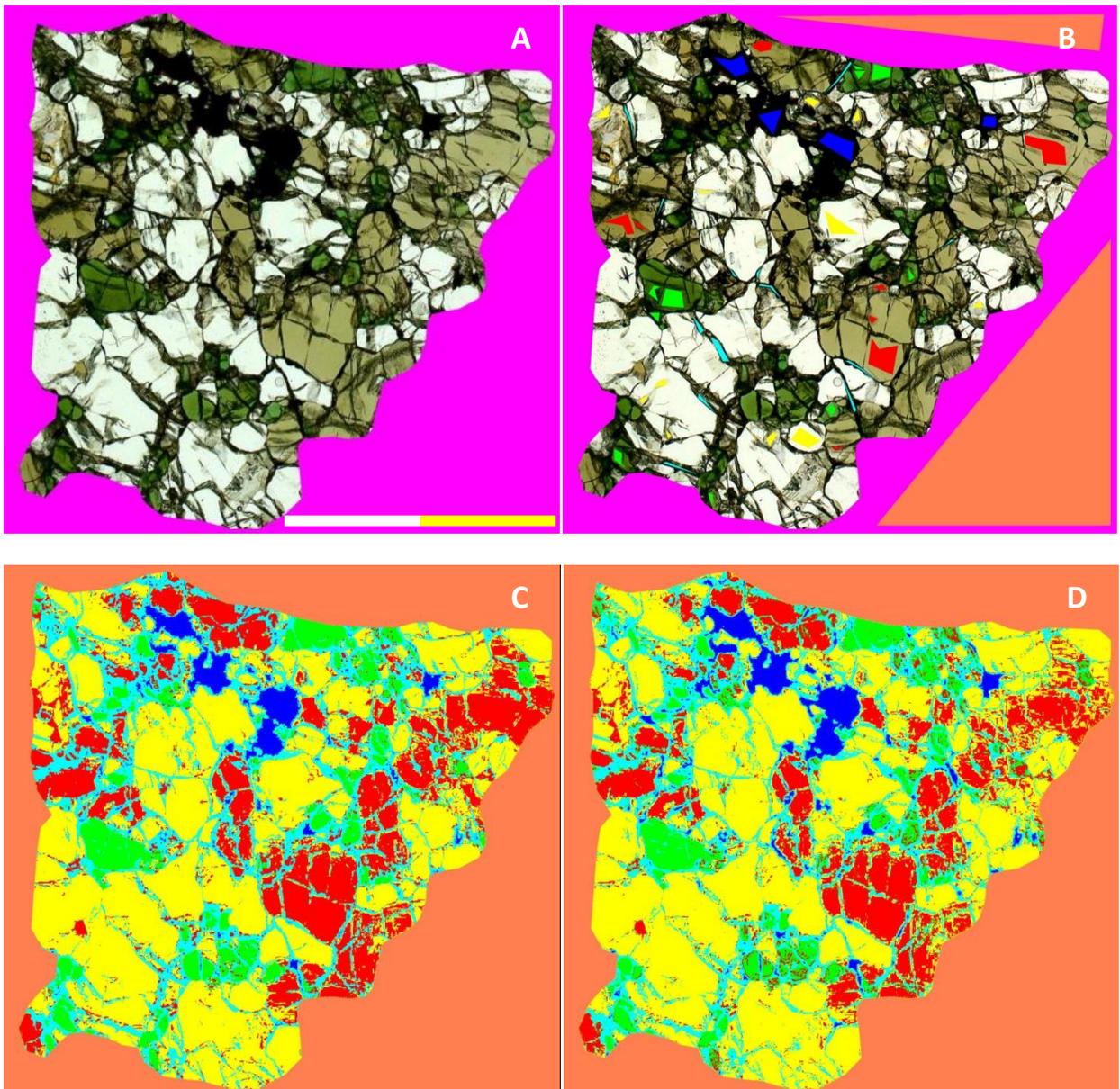


Figura anexo imágenes 2: (A) Imagen posterior al tratamiento por programa *Photoshop C.2*. (B)Definición de áreas de interés(ROI) (C) Resultado de procesamiento de imágenes SVM. (D) Resultado de procesamiento de imágenes NN.

## Análisis cualitativo de los resultados

Para la realización de este análisis se compararon visualmente las secciones transparentes y las imágenes entregadas por los métodos NN y SVM.

Se observa, en una primera apreciación, una buena correlación entre lo observado en la muestra y lo inferido por ambos métodos, identificando de forma correcta en la generalidad de los casos a cada mineral, teniéndose una sobrestimación de las fracturas en los bordes. Si se comparan las imágenes en detalle se puede ver que tanto SVM como NN sobrestiman la cantidad de espinela, confundiéndola con fracturas oscuras y zonas de infiltración de lava, como se observa en la Figura anexo imágenes 3A, siendo mayor el error para las imágenes obtenidas por el método NN. Para el ortopiroxeno se aprecia una sobrestimación en zonas de fracturas dentro del olivino que exhiben tonos levemente rojizos, siendo nuevamente el error visual mayor para el caso de NN (Figura anexo imágenes 3C). El Cpx se tiende a subestimar con el método NN asignándole un mayor porcentaje a fracturas (Figura anexo imágenes 3B ). Para muestras con muy poca cantidad de mineral de un tipo se tiene la omisión de éste por parte del método NN (p.e. muestras PM27B-3 y PM27A-5, ver anexos petrografía Figura 8,24).

En las muestras con mucha contaminación de basalto, o donde los minerales no se ven de forma nítida, no se obtienen resultados claros para el método SVM. (p.e. PM27B-2b y c, ver anexos petrografía Figura 21 y 22). En muestras con minerales con colores bien definidos, sin infiltración de basalto y con menor cantidad de fracturas ambos métodos entregan resultados parecidos (p.e. PM27A-27, PM27A-9, ver anexos petrografía Figura 10, 12).

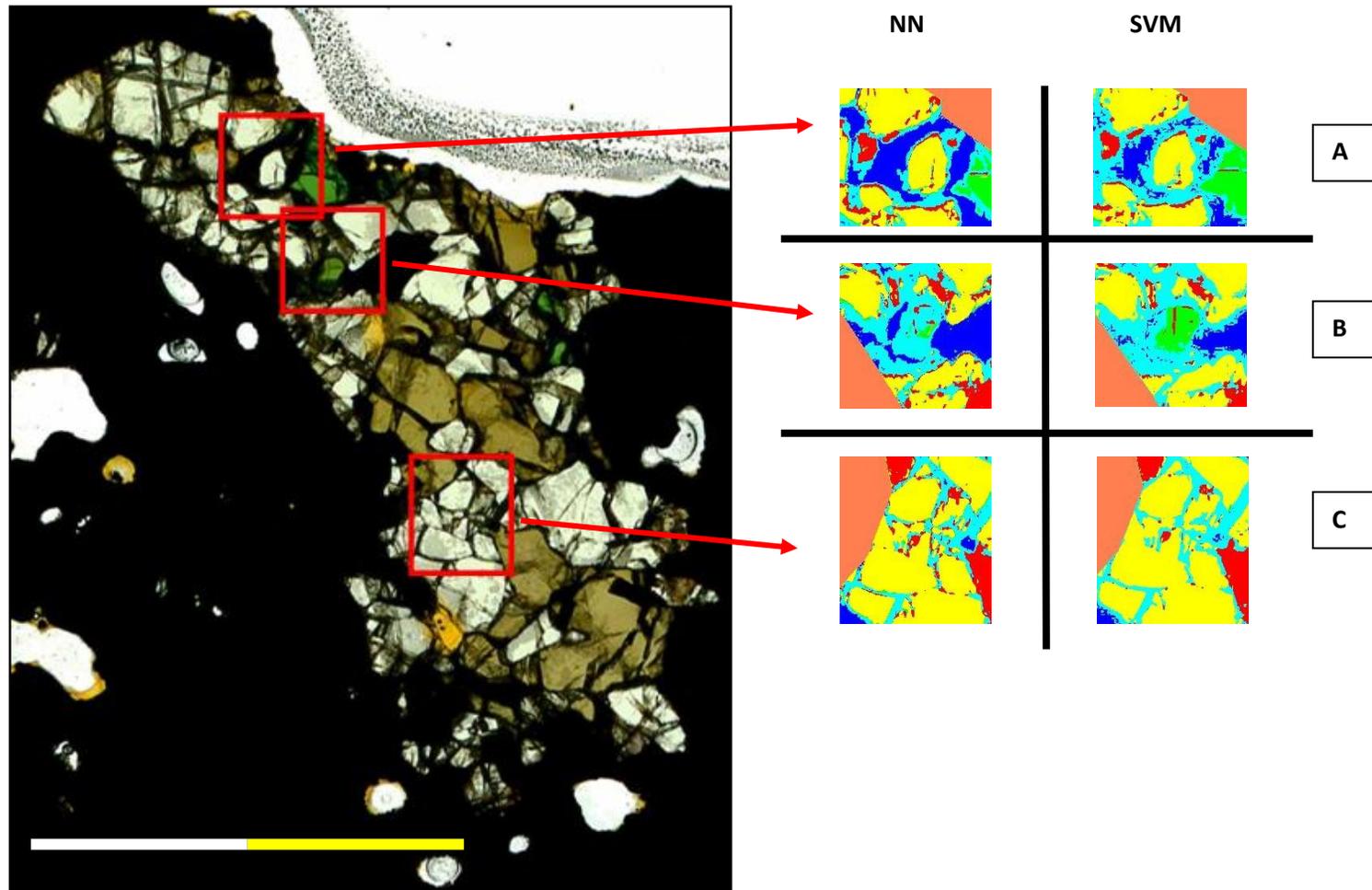


Figura anexo imágenes 3: (A) Interpretación errónea de Sp en fractura, la que es más acentuada para el método de NN. (B) El método NN no determina al Cpx. (C) Opx asignado en espacio de fracturas, nuevamente el error es mayor para NN. Barra de escala 0.5 cm da una.

## Análisis cuantitativo

Para poder realizar un análisis cuantitativo de los resultados se efectuó conteo modal (CM) en la totalidad de los cortes. Los resultados de éste y el número de puntos usado para cada corte se detallan en la Tabla 3. La cantidad de puntos utilizados no es la misma para todos los cortes, pues al ser las secciones demasiado heterogéneas se seleccionó la mayor cantidad de área posible para cada sección, de forma de tener una mayor representatividad.

Adicionalmente con el mismo fin de comparar resultados se realizó la determinación de porcentajes modales para tres muestras empleando la química de elementos mayores y química mineral a través del método de los mínimos cuadrados.

Se acepta un error de hasta un 20% de diferencia, tomando en cuenta el mayor error aceptado comúnmente para muestras de análisis químicos.

Tabla Anexo imágenes 1: Número de puntos utilizado por sección y porcentajes determinado para cada muestra

	N° puntos	Opx	Cpx	Sp	OI	Total
PM27A-1	3000	18.7	9.6	4.4	67.1	99.8
PM27A-2	2879	22.7	6.5	2.4	68.2	99.8
PM27A-4	1792	25.3	6.0	0.4	68.0	99.7
PM27A-5	1661	38.7	1.4	0.6	59.1	99.8
PM27A-9	1683	23.0	4.7	5.8	66.3	99.8
PM27A-27	1208	0.0	34.0	0.0	65.9	99.9
PM27A-28	2144	13.9	6.0	3.1	76.9	99.9
PM27B-1A	1352	26.7	7.1	0.2	65.9	99.9
PM27B-1B	1961	24.0	5.6	0.5	69.7	99.8
PM27B-2 a	2891	10.0	4.3	0.0	85.5	99.8
PM27B-2 b	4495	15.0	4.3	0.4	80.1	99.8
PM27B-2 c	4136	9.0	1.4	1.5	87.9	99.8
PM27B-3	1644	30.5	6.5	2.6	60.3	99.9
PM27B-4	1132	18.7	4.4	2.7	74.1	99.9
PM27B-9	711	30.9	4.9	3.2	60.9	99.9
PM27B-10	606	19.8	1.1	3.4	75.5	99.8
PM27B-12A	1719	14.1	2.6	3.2	80.0	99.8
PM27B-12B	528	1.5	11.3	0.5	86.5	99.8
PM27B-12B(a)	547	9.8	3.2	2.3	84.4	99.7
PM27B-16	2531	10.9	3.7	5.2	80.0	99.8
PM27B-18	2435	21.0	7.7	2.7	68.5	99.9
PM27B-23	892	41.1	6.0	1.2	51.5	99.8
PM27B-25	312	35.7	5.7	0.3	58.1	99.8
PM27B-25(a)	417	7.4	7.4	2.6	82.4	99.8
PM27B-26	2808	30.7	11.8	3.0	54.2	99.7

## **Eliminación de valor de borde y fracturas**

Para determinar los porcentajes minerales lo primero que se realizó fue eliminar el valor del “borde”, restando éste del total y normalizando los otros al cien por ciento, conservando sus proporciones. Para distribuir el valor de fracturas se realizaron dos procedimientos distintos. Los resultados para los distintos métodos se detallan en la Tabla anexo imágenes 2

Tabla anexo imágenes 2: Porcentajes de porcentajes minerales determinados por distintos métodos CM: Conteo modal

	Opx SVM	Opx NN	Opx CM	Cpx SVM	Cpx NN	Cpx CM	Sp SVM	Sp NN	Sp CM	OI SVM	OI NN	OI CM
PM27A-1	27.57	23.72	18.70	6.83	8.81	9.60	5.64	8.33	4.40	59.96	59.14	67.10
PM27A-2	24.59	25.55	22.70	4.74	4.34	6.50	2.94	4.89	2.40	67.73	65.22	68.20
PM27A-4	22.42	23.28	25.30	4.42	4.24	6.00	2.49	0.18	0.40	70.67	72.30	68.00
PM27A-5	42.05	40.95	38.70	1.72	2.01	1.40	1.01	0.00	0.60	55.22	57.04	59.10
PM27A-9	24.02	21.60	23.00	5.38	3.78	4.70	6.62	5.67	5.80	63.98	68.94	66.30
PM27A-27	0.00	0.00	0.00	35.19	45.83	34.00	0.00	0.00	0.00	64.81	54.17	65.90
PM27A-28	11.11	16.78	13.90	5.83	7.10	6.00	4.07	9.46	3.10	79.00	66.66	76.90
PM27B-1A	21.48	25.82	26.70	8.03	5.99	7.10	1.03	0.83	0.20	69.46	67.36	65.90
PM27B-1B	-	23.74	24.00	-	4.70	5.60	-	8.17	0.50	-	63.40	69.70
PM27B-2 a	-	6.25	10.01	-	4.24	4.27	-	0.00	0.00	-	89.51	85.51
PM27B-2 b	-	23.27	15.00	-	3.53	4.30	-	0.00	0.40	-	73.20	80.10
PM27B-2 c	-	14.02	9.00	-	0.80	1.40	-	0.00	1.50	-	85.17	87.90
PM27B-3	33.17	35.25	30.50	5.52	7.27	6.50	1.33	0.00	2.60	59.97	57.48	60.30
PM27B-4	23.07	28.71	18.70	4.13	5.16	4.40	4.25	4.19	2.70	68.54	61.94	74.10
PM27B-9	38.03	38.80	30.90	3.34	2.48	4.90	6.24	12.98	3.20	52.39	45.74	60.90
PM27B-10	15.41	20.37	19.80	1.29	1.52	1.10	3.05	10.98	3.40	80.26	67.13	75.50
PM27B-12A	-	13.05	14.05	-	4.04	2.60	-	2.66	3.20	-	80.24	79.97
PM27B-12B	4.18	8.45	1.50	10.30	10.43	11.30	1.65	1.81	0.50	83.86	79.31	86.50
PM27B-12B (a)	6.76	6.14	9.80	4.16	5.80	3.20	3.01	2.63	2.30	86.07	85.42	84.40
PM27B-16	10.72	8.23	10.90	4.83	5.20	3.70	4.82	6.03	5.20	79.62	80.54	80.00
PM27B-18	21.38	27.25	21.00	11.68	17.07	7.70	3.50	7.52	2.70	63.44	48.16	68.50
PM27B-23	38.39	45.97	41.10	8.16	21.41	6.00	0.00	0.00	1.20	53.45	32.62	51.50
PM27B-25A	28.45	29.28	35.70	3.04	2.28	5.70	5.99	8.01	0.30	62.52	60.43	58.10
PM27B-25A(a)	7.43	14.37	7.40	5.99	2.42	7.40	0.00	7.82	2.60	86.58	75.39	82.40
PM27B-26	21.82	22.80	30.70	12.33	10.66	11.80	4.39	4.06	3.00	61.46	62.47	54.20

### ***Método 1: Distribución proporcional a porcentajes minerales.***

Se distribuyó el porcentaje de fracturas en proporciones correspondientes a los porcentajes de Ol, Cpx y Opx normalizados a un cien por ciento. El valor de la Sp se dejó igual al obtenido posterior a la normalización del valor "borde". Los valores obtenidos se observan en la Tabla anexo imágenes 2.

Este procedimiento se realizó suponiendo que el olivino, el clinopiroxeno y el ortopiroxeno poseen una dureza similar, por lo que se esperaba que se fracturasen de forma equivalente. Así, se distribuye el porcentaje de fracturas proporcionalmente a la cantidad de cada mineral en el corte. Las áreas que corresponden a espinelas no se observan fracturadas tras el proceso de imágenes en el programa ENVI, razón por la cual no se les asigna porcentaje correspondiente a fractura.

Para un análisis más visual se emplearon las Figuras anexo imágenes 4,5,6 y 7, donde se grafican los resultados obtenidos por este método (eje y), versus los obtenidos por el análisis de conteo modal (eje x). El resultado óptimo sería el valor de la identidad (línea azul). Adicionalmente se muestran líneas verdes, amarillas y rojas que muestran errores de 5, 15 y 20 por ciento respectivamente.

#### **Análisis de resultados**

Se observa una buena aproximación para el Ol por el método SVM, encontrándose dentro del 15 % de error en la totalidad de sus valores, estando la mayoría dentro del 5%. No se observa lo mismo para el método NN, donde las muestras PM27B-9,18 y 23 presentan subestimación con más de 20% de error y mayor dispersión entre las muestras.

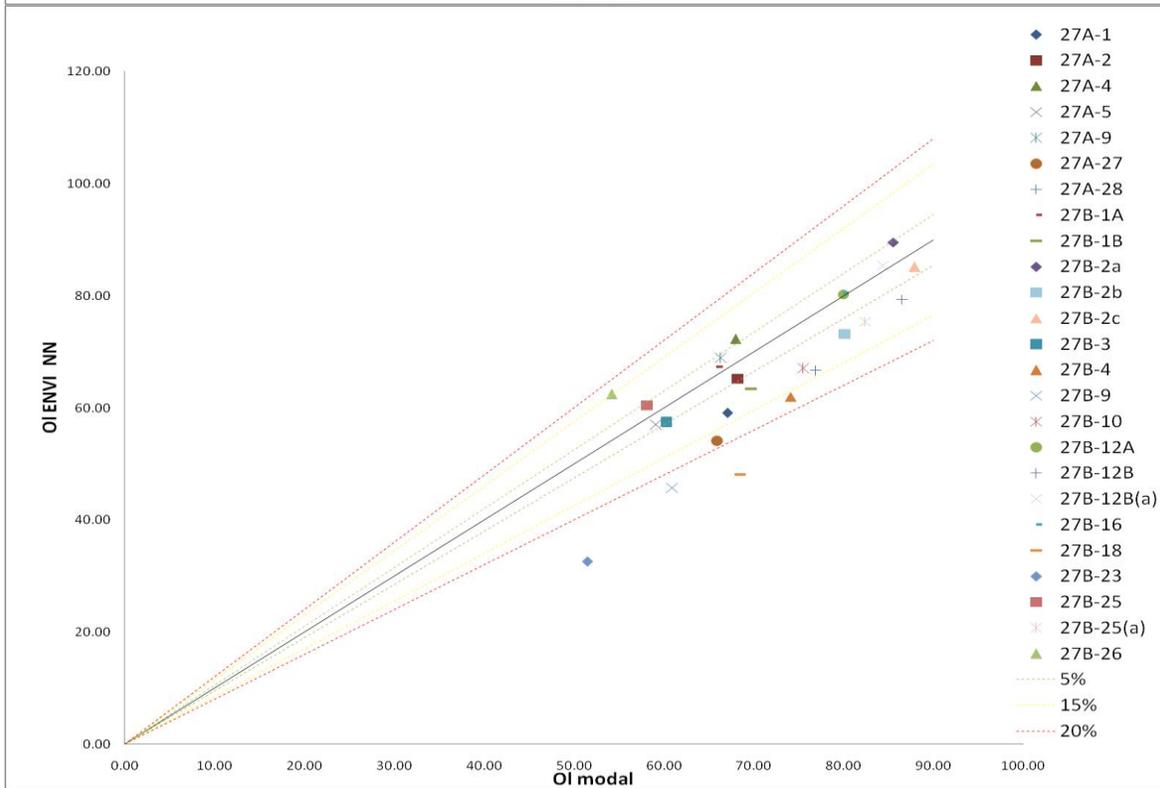
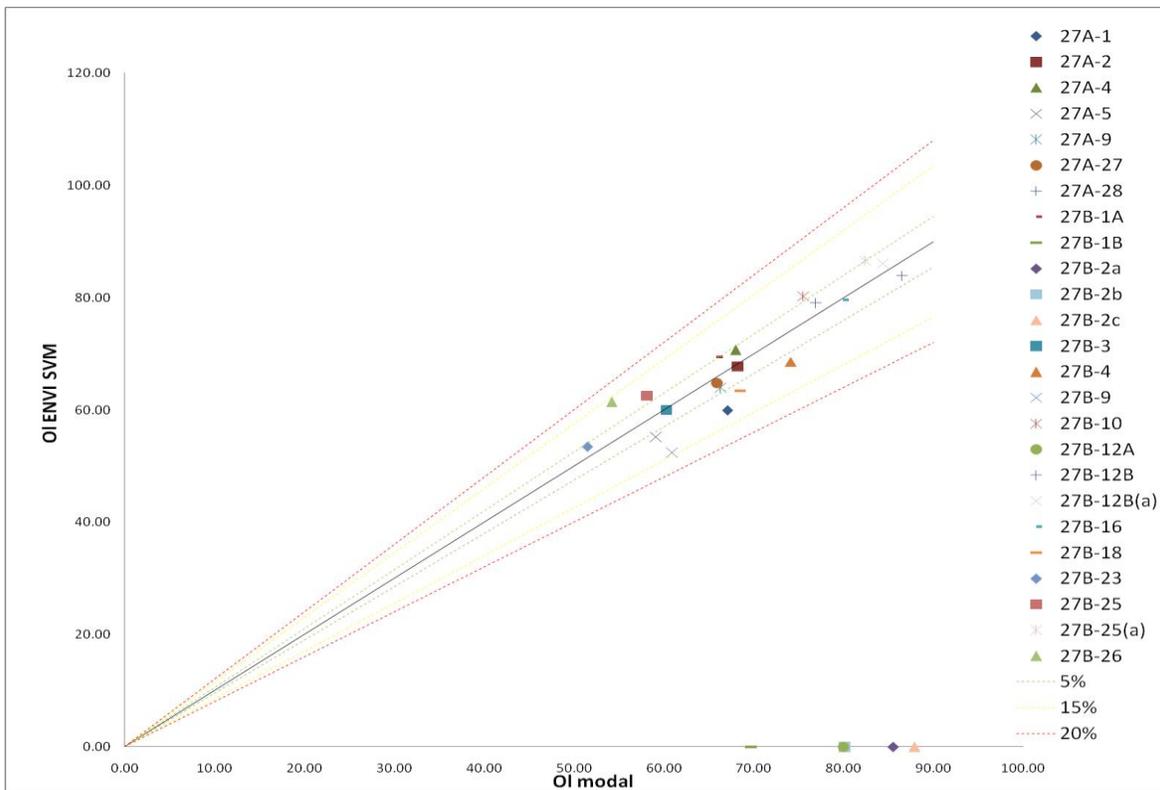


Figura anexo imágenes 4: Porcentajes de OI determinados por SVM y NN (método 1) vs porcentajes determinados por método de conteo modal. Errores de 5, 15 y 20% representados con líneas verde, amarilla y roja respectivamente.

Los valores de Opx y Cpx presentan gran dispersión para ambos métodos. En el caso del Opx el 20% de las muestras sobrepasan el 20 % de error, mientras que para el método NN estos alcanzan el 40% de las muestras. Para el Cpx el 40% de los datos no se encuentra dentro del valor del 20% en ambos casos.

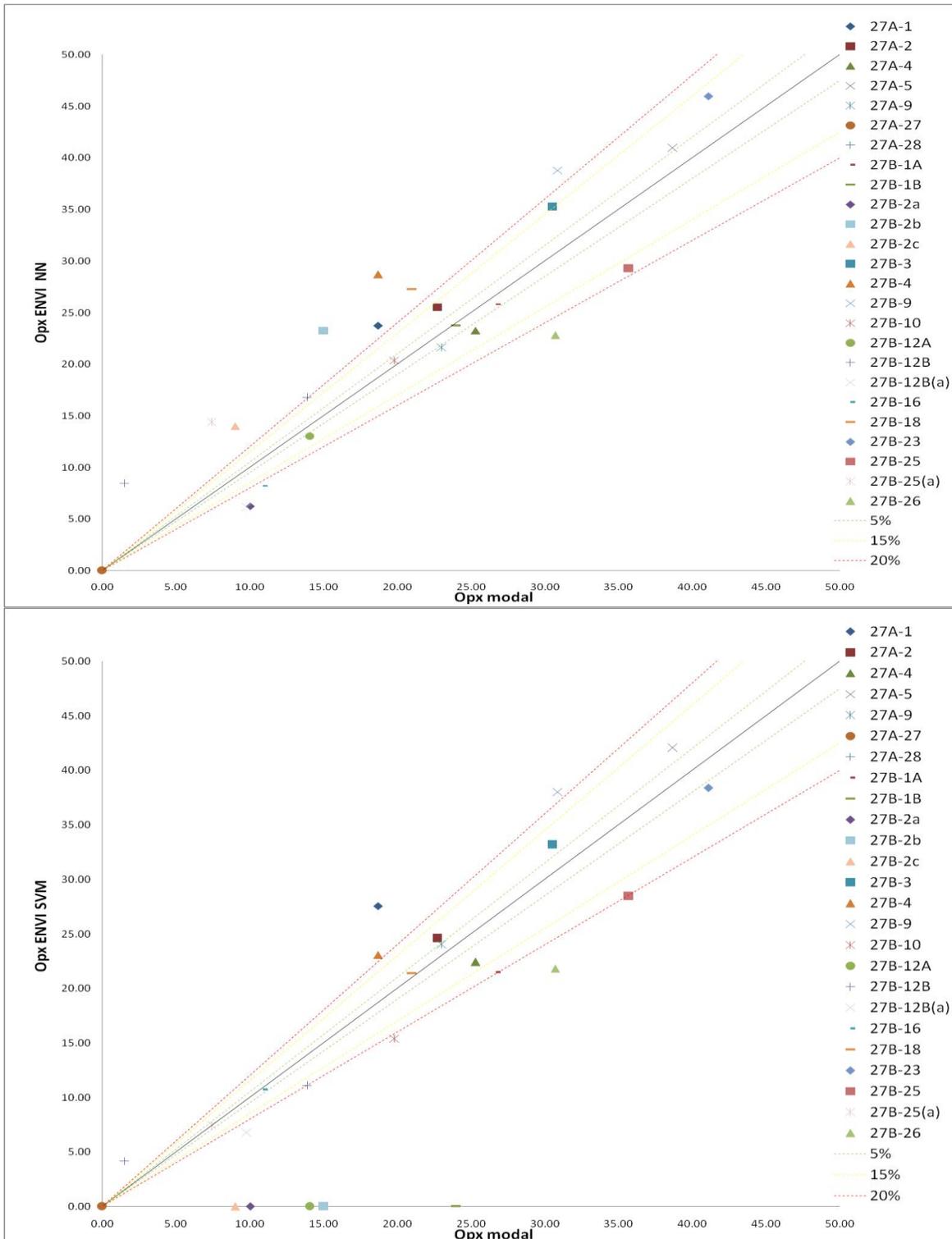


Figura anexo imágenes 5: Porcentajes de Opx\$ determinados por SVM y NN (método 1) vs porcentajes determinados por método de conteo modal. Errores de 5, 15 y 20% representados con líneas verde, amarilla y roja respectivamente.

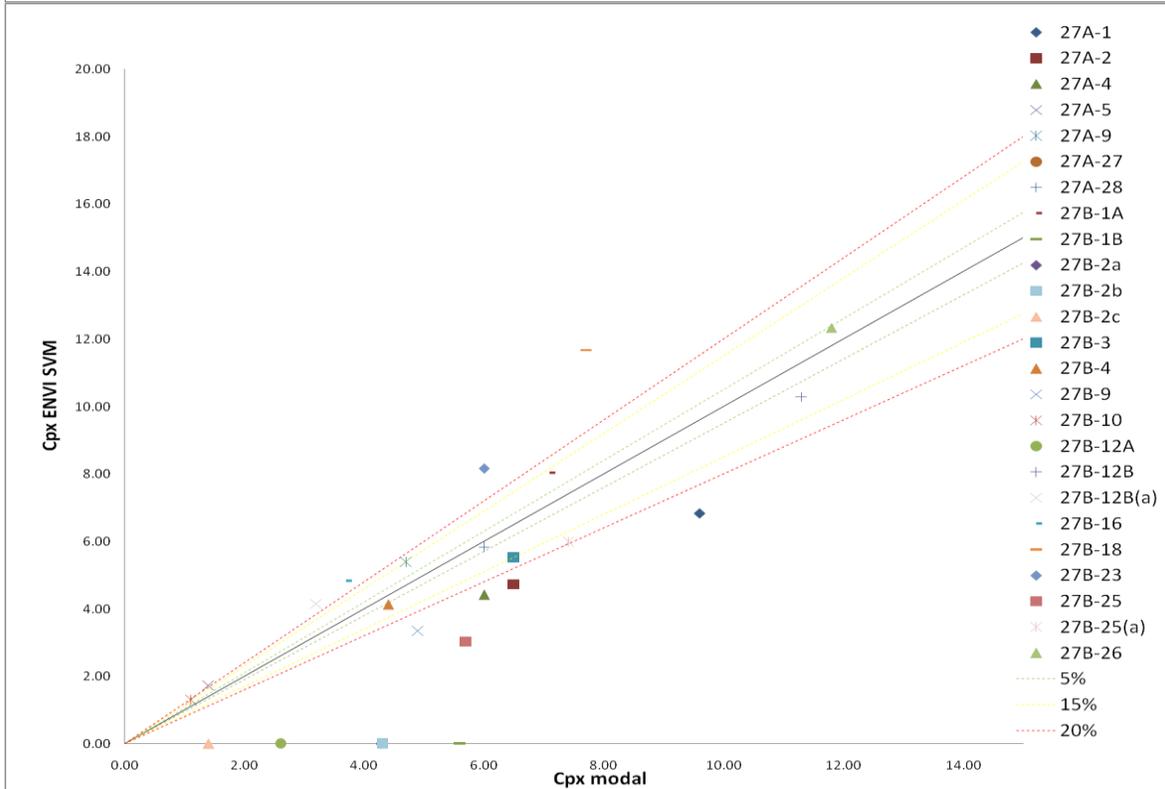
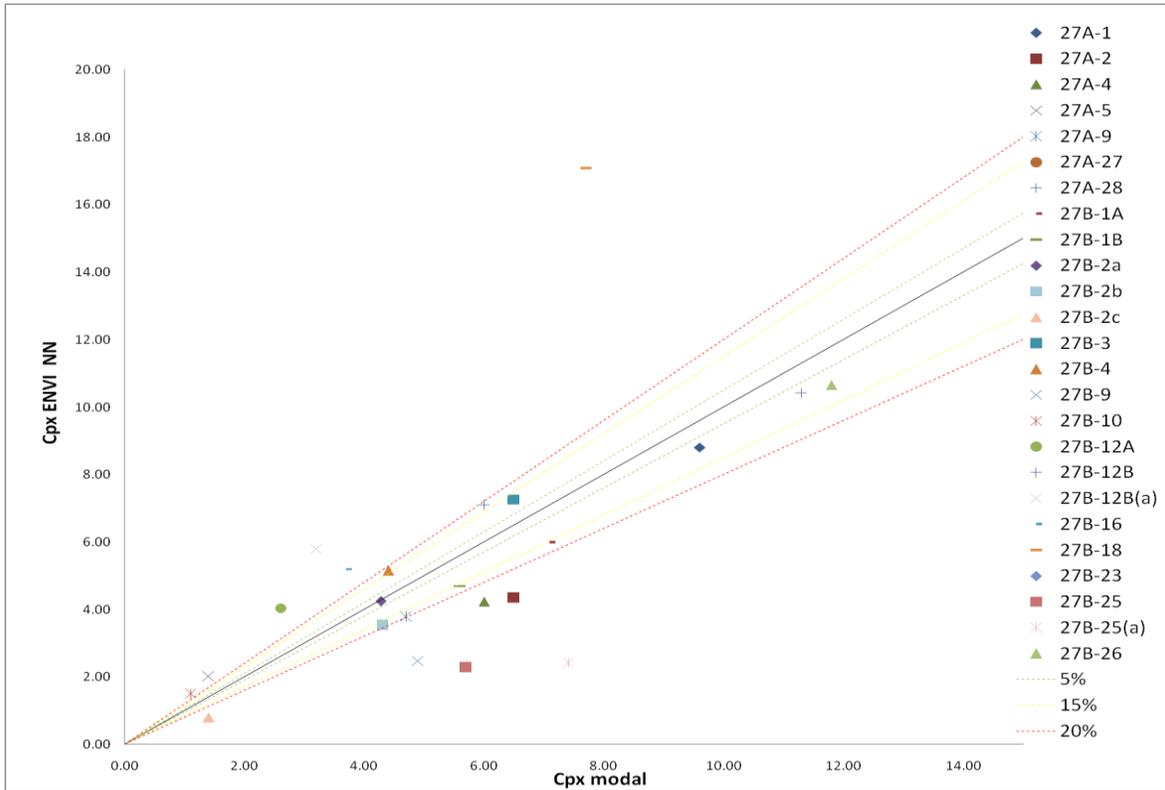


Figura anexo imágenes 6: Porcentajes de Cpx determinados por SVM y NN (método 1) vs porcentajes determinados por método de conteo modal. Errores de 5, 15 y 20% representados con líneas verde, amarilla y roja respectivamente.

La Sp con los dos métodos es sobrestimada, siendo mayor para el método NN alcanzando el 50% de las muestras.

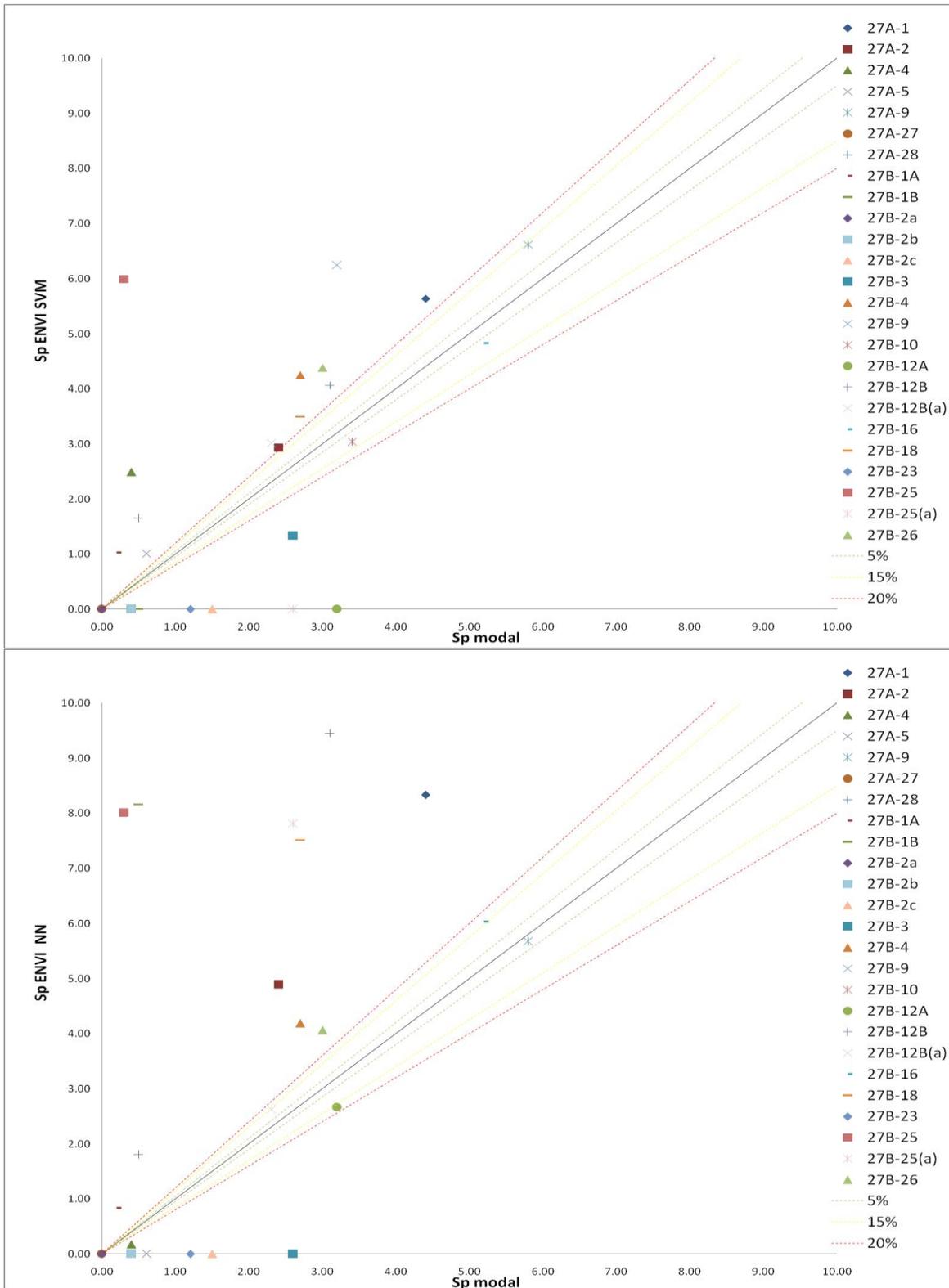


Figura anexo imágenes 7: Porcentajes de Sp determinados por SVM y NN (método 1) vs porcentajes determinados por método de conteo modal. Errores de 5, 15 y 20% representados con líneas verde, amarilla y roja respectivamente.

***Método 2: Distribución a través de interpolación lineal con factor de corrección.***

Para este procedimiento es necesario emplear los resultados obtenidos de los análisis de conteo modal.

De la gráfica donde se plotean de los datos obtenidos por NN y SVM versus los obtenidos por el porcentaje de conteo modal para los distintos minerales (Figura anexo imágenes 8 y 9) se observa que la mayoría de los puntos se encuentran bajo el valor de la identidad (línea azul). Esto es de esperar puesto que todavía no se ha distribuido el valor de las fracturas, y en las imágenes obtenidas a través de ENVI se ve claramente que las fracturas son identificadas dentro de los minerales, restándoles superficie. De este gráfico además se ve una tendencia cercana a lineal entre los puntos para el ortopiroxeno, el olivino y el clinopiroxeno.

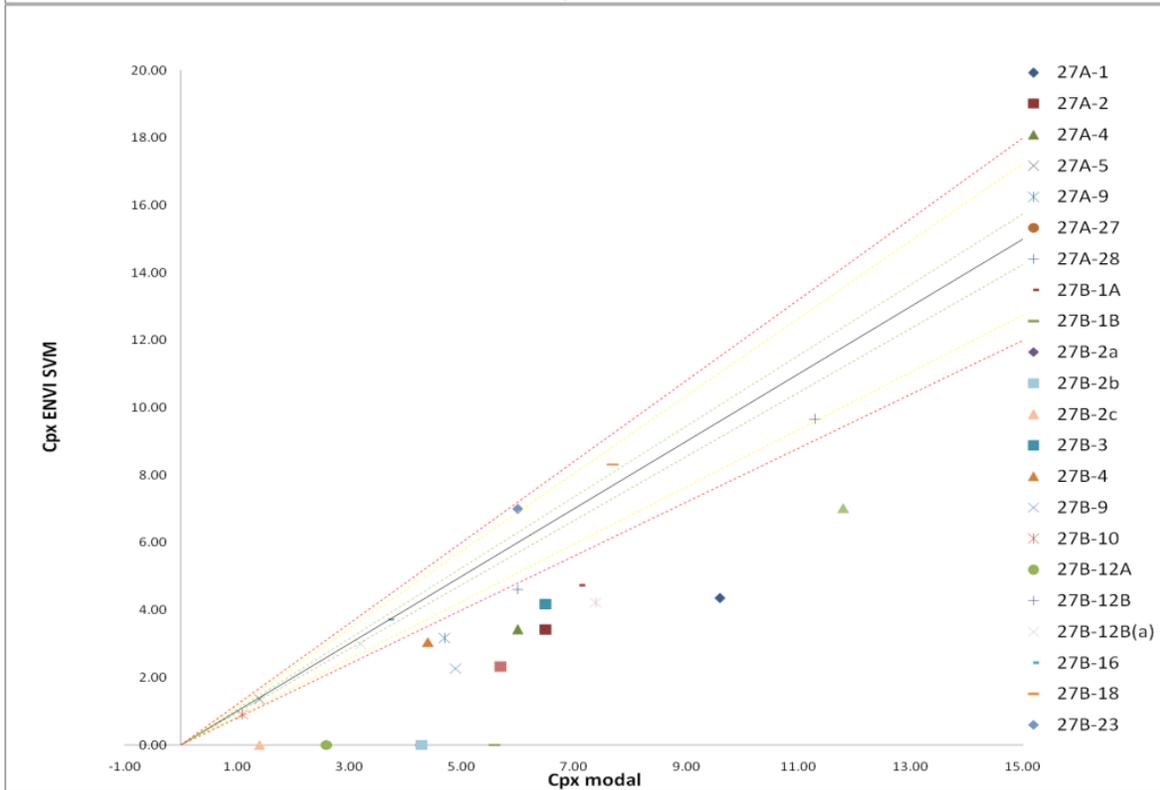
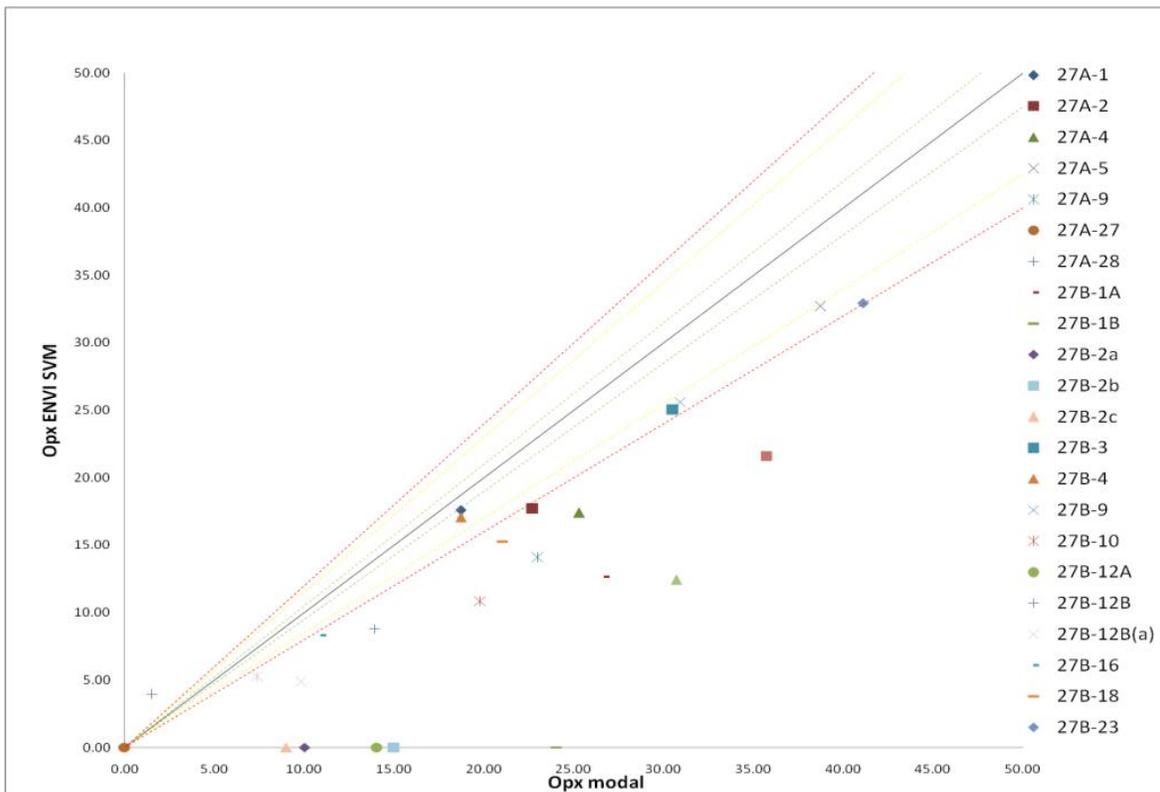


Figura anexo imágenes 8: Porcentajes de Opx y Cpx determinados por el método SVM previa asignación de porcentaje de fracturas.

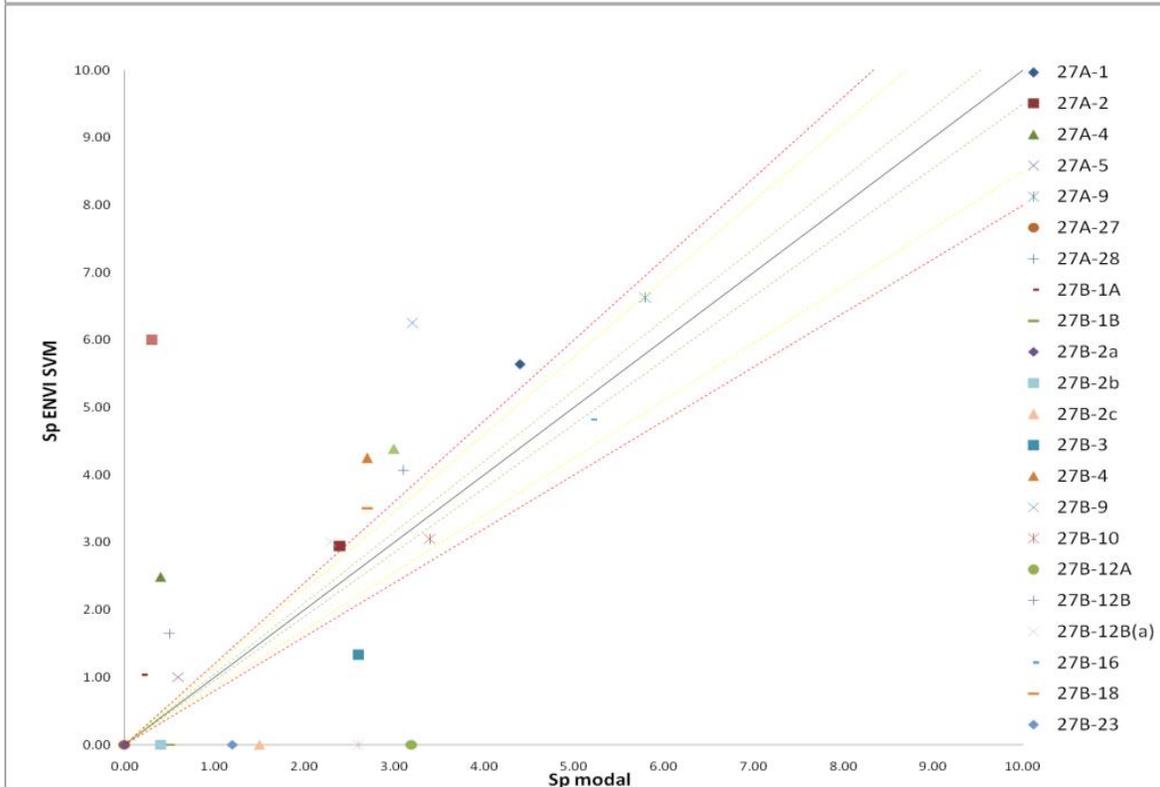
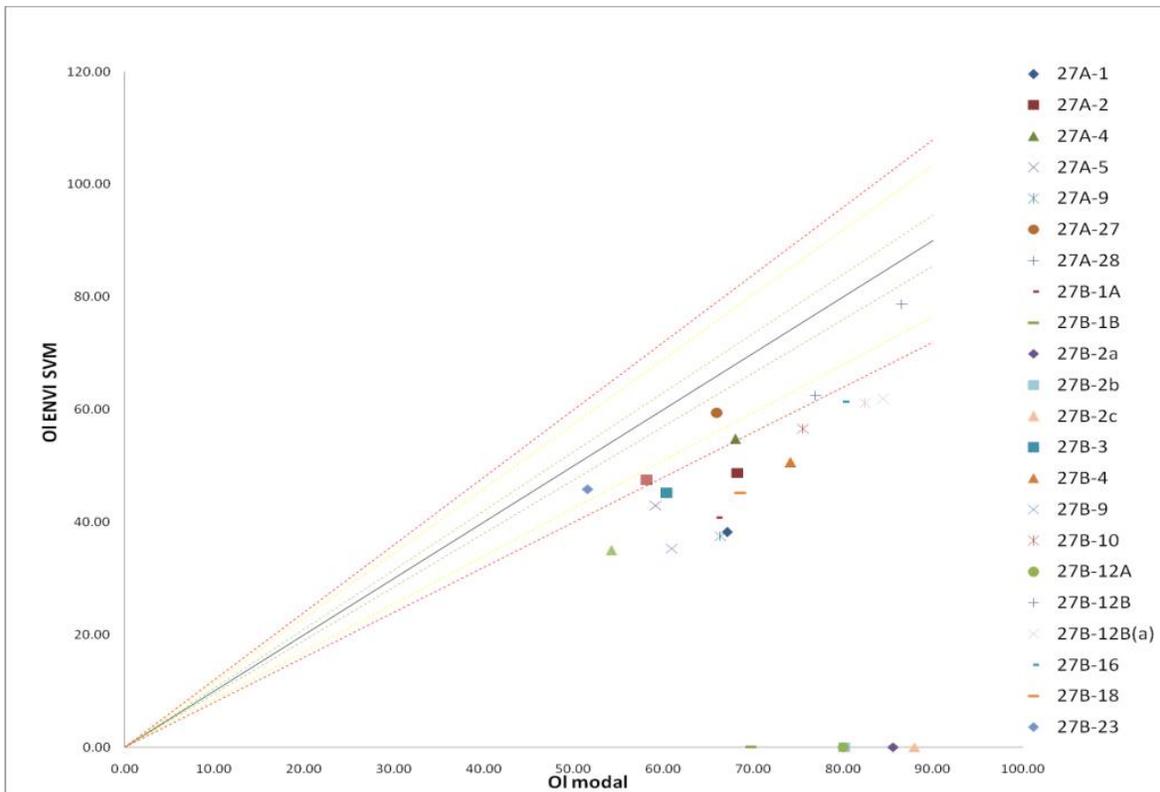


Figura anexo imágenes 9: Porcentajes de OI y Sp determinados por el método SVM previa asignación de porcentaje de fracturas.

De lo anterior se desprende el segundo método, el cual consiste en la realización de una interpolación lineal del total de los distintos puntos, seguida de un desplazamiento de esa función hacia la identidad llevado a cabo a través de un factor(o función) de corrección. La forma de obtener este factor es restar la función identidad menos la ecuación interpolada. Este factor es el que es empleado para asignar un porcentaje de las fracturas a cada mineral sumando el valor obtenido por NN o SVM más el valor de corrección multiplicado por el mismo valor del mineral.

En el caso de la espinela, debido a que los valores se encuentran muy dispersos y estando la mayoría sobre la identidad, no se le realiza este procedimiento dejando el porcentaje determinado por el programa sin cambios. Es importante señalar que el error asociado a la interpolación lineal de la espinela es muy grande ( $R^2 = 0.284$  en caso de NN y  $R^2 = 0.39$  para SVM)

Ya que este proceso en realidad no toma en cuenta el porcentaje de las fracturas sino el error sistemático en relación al porcentaje de la muestra obtenido por el conteo modal, la suma de los valores corregidos no entrega un cien por ciento; para solucionar esto y aprovechándose que el porcentaje modal de olivino en las secciones es mucho mayor en relación a los otros minerales, y por lo tanto menos sensible al error, el procedimiento se realiza solamente para el clinopiroxeno y el ortopiroxeno. Luego el valor del porcentaje del olivino se determina como el cien por ciento menos el valor de la espinela y los porcentajes corregidos de los otros minerales.

Los valores obtenidos de las interpolaciones lineales para el Opx y Cpx para SVM son:

$$Opx \rightarrow y = 0.711x \quad R^2 = 0.826$$

$$Cpx \rightarrow y = 0.942x - 1.378 \quad R^2 = 0.938$$

Luego el factor de corrección propuesto para asignar porcentaje de fracturas corresponde a la función identidad menos el valor de la interpolación lineal, obteniéndose:

$$F_{C_{SVM} \text{ Opx}} = 0.289x$$

$$F_{C_{SVM} \text{ Cpx}} = 0.058x + 2.378$$

Mientras que los determinados para NN son:

$$Opx \rightarrow y = 0.75x + 0.893 \quad R^2 = 0.768$$

$$Cpx \rightarrow y = 1.291x - 2.393 \quad R^2 = 0.808$$

Dejando como factores de corrección

$$Fc_{NN \ Opx} = 0.25x - 0.893$$

$$Fc_{NN \ Cpx} = 0.058x - 0.378$$

Finalmente para obtener los valores del Opx y Cpx corregidos para los métodos NN o SVM se hace la siguiente operación:

$$Px_{corregido} = Px_{NN-SVM} + Px_{NN-SVM} * Fc_{px \ NN-SVM}$$

El valor de la espinela es el mismo inferido por el método en primera instancia, luego de normalizar el valor de borde.

El porcentaje correspondiente al olivino es la resta del 100% menos los valores anteriores.

Los resultados obtenidos se detallan en la Tabla anexo imágenes 2. Para ilustrar de forma más gráfica se emplea los mismos diagramas usados en el método anterior.

Como se muestra en la Figura anexo imágenes 10, el olivino sigue teniendo una gran exactitud. Encontrándose la mayoría de los valores bajo el 5% de error y sólo uno fuera del 20% para el caso de SVM. Para NN se tienen 3 muestras sobre el 20% y una dispersión mayor en relación a la identidad.

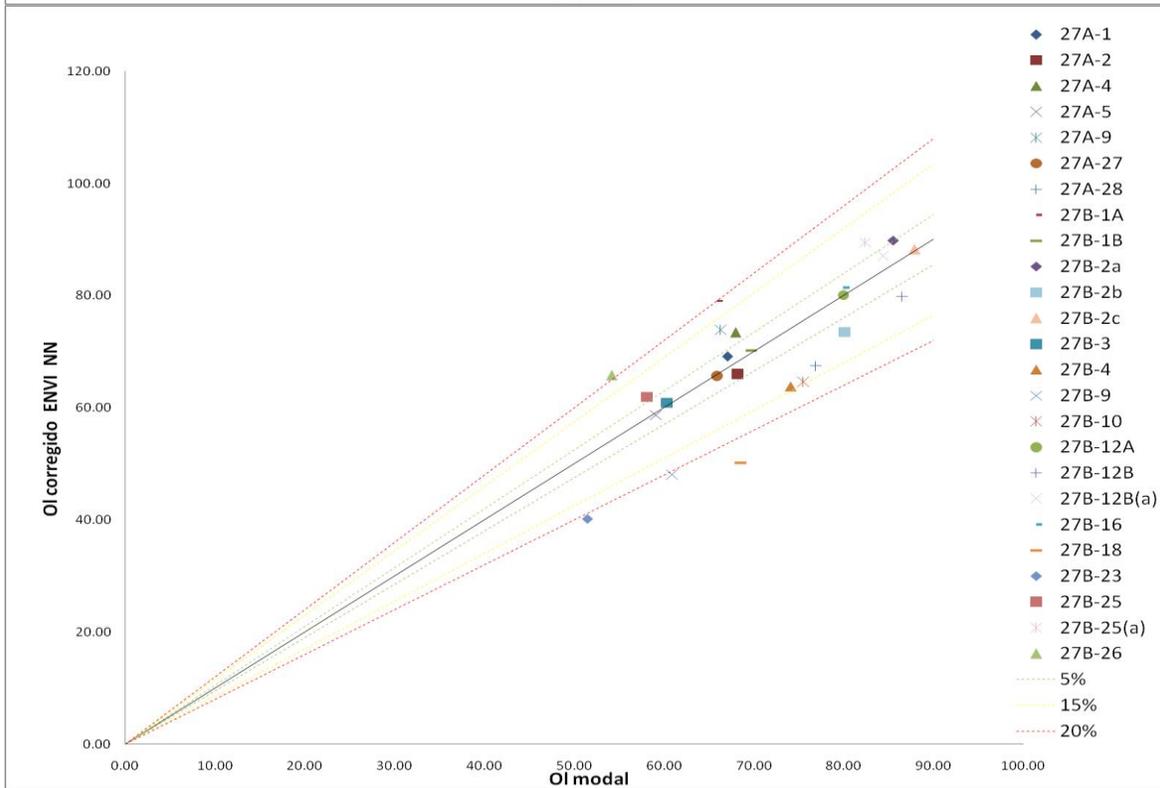
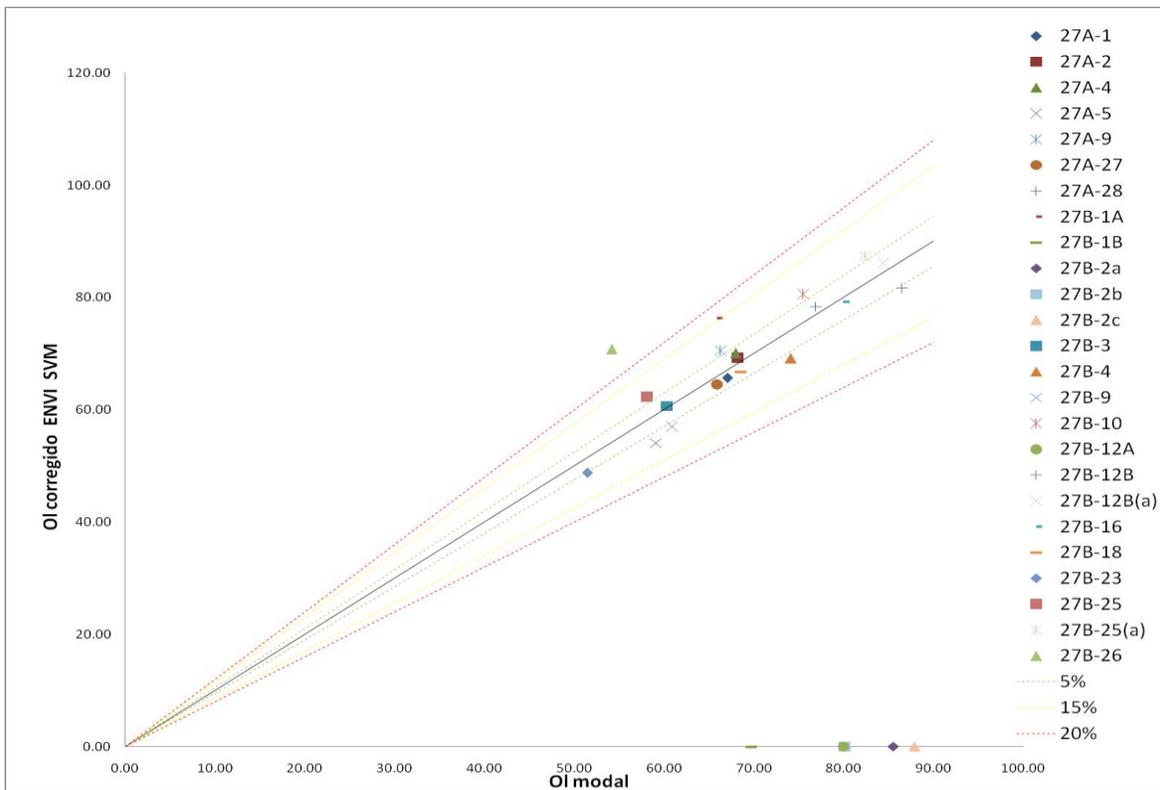


Figura anexo imágenes 10: Porcentajes de OI determinados por SVM y NN (método 2) vs porcentajes determinados por método de conteo modal. Errores de 5, 15 y 20% representados con líneas verde, amarilla y roja respectivamente.

En el caso del ortopiroxeno para SVM se aprecian 6 muestras sobre el 20% de error, estando concentrados en valores inferiores al determinado por conteo modal. Para NN más del 40% de las muestras presentan un error asociado sobre el 20% dispersándose en valores inferiores y superiores.

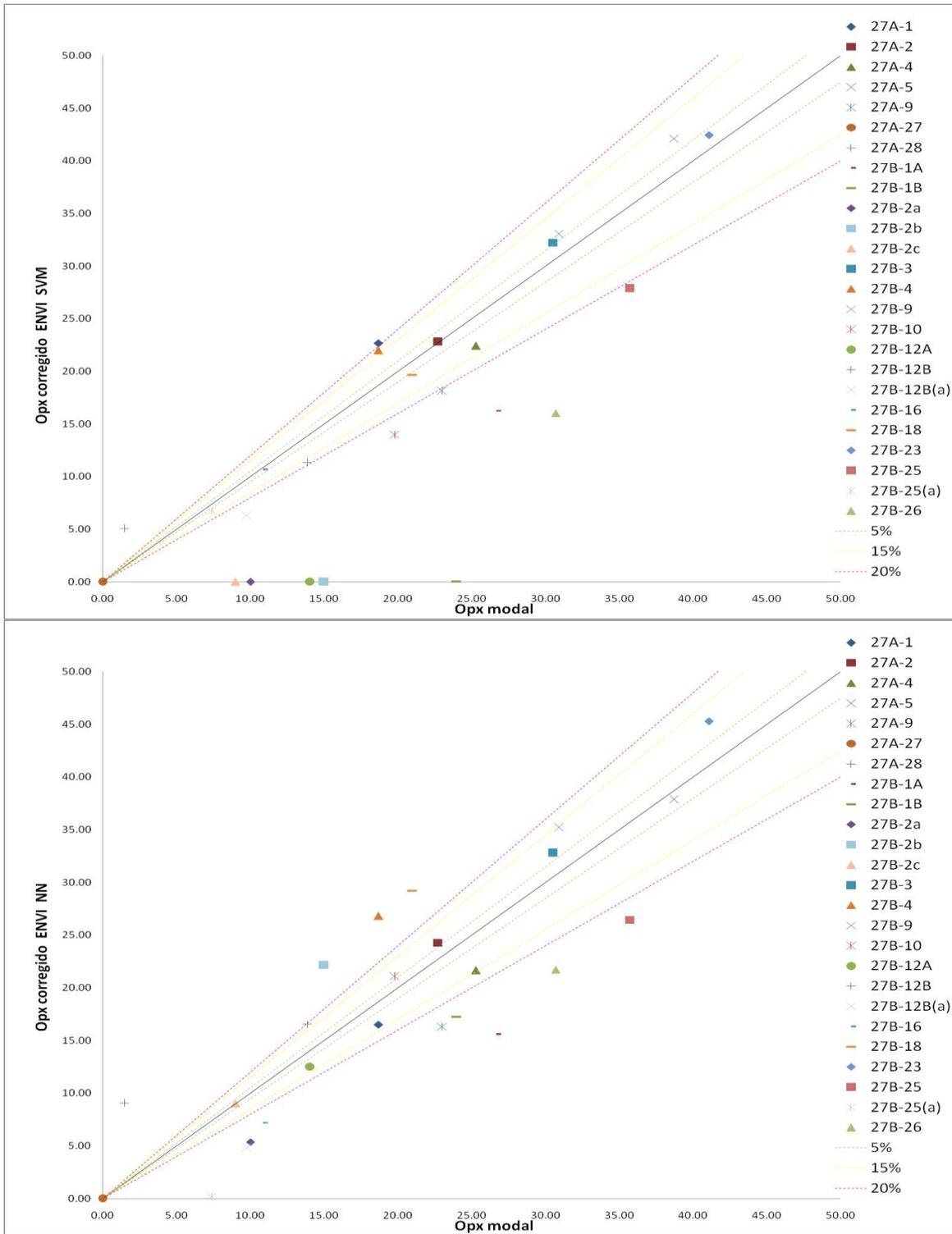


Figura anexo imágenes 11 : Porcentajes de Opx determinados por SVM y NN (método 2) vs porcentajes determinados por método de conteo modal. Errores de 5, 15 y 20% representados con líneas verde, amarilla y roja respectivamente.

Para el clinopiroxeno tanto NN como SVM presentan más de un 20% de error en más del 50% de las muestras.

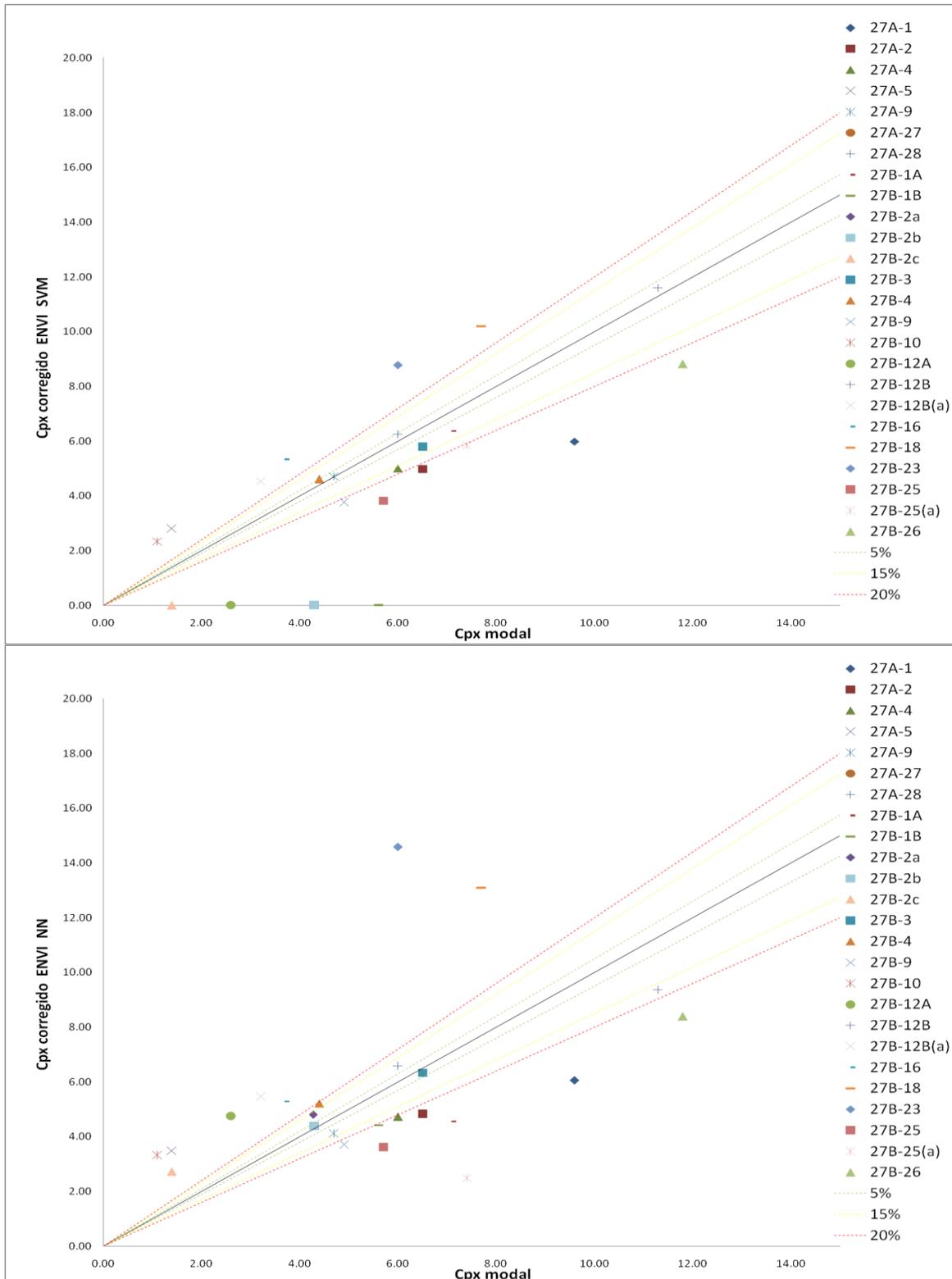


Figura anexo imágenes 12: Porcentajes de Cpx determinados por SVM y NN (método 2) vs porcentajes determinados por método de conteo modal. Errores de 5, 15 y 20% representados con líneas verde, amarilla y roja respectivamente.

## Discusión

Si bien la correlación cualitativa entre la sección transparente y la imagen determinada por el programa, salvo la espinela es buena a primera vista, se observan grandes errores para los diversos análisis cuantitativos tomando como referencia la determinación de porcentajes a través de conteo modal.

Desde el punto de vista de los distintos minerales analizados este error es mayor mientras menor sea el porcentaje determinado por el conteo modal, así el error para todas las metodologías resulta  $Sp > Cpx > Opx > Ol$ ; esto es de esperar si se toma en cuenta que a un menor porcentaje en la sección, mayor es la holgura del error, por ejemplo si se tiene un 60% de un mineral en la muestra, como el caso promedio del olivino, un error dentro del 20% va a corresponder a una variación de  $\pm 12\%$  en el porcentaje total, mientras que en el caso de un clinopiroxeno con un valor promedio menor al 8%, el error del 20% va a estar asociado a  $\pm 1,6\%$ .

Una posible explicación al problema del error puede ser la distribución del porcentaje del valor “fracturas”, el cual es en promedio mayor al 25% del total de la muestra ya normalizada, este valor es alto comparado al resto de los minerales, como por el ejemplo el ortopiroxeno con un 16% y aún más para el clinopiroxeno con un promedio  $< 8\%$ .

Cuando se comparan las dos metodologías para la distribución del porcentaje de fracturas se aprecian resultados con buena confianza para olivino y baja confianza para los demás, apreciándose un mejor desempeño del análisis realizado por la función SVM. La metodología número dos entregó mejores resultados para la distribución del ortopiroxeno y menor dispersión para el clinopiroxeno. Con esto se logra apreciar que la determinación de las fracturas por el programa está más cerca de ser considerado de un error sistemático a que una distribución uniforme entre Ol-Opx-Cpx.

Otra forma de explicar el error correspondería a revisar la representatividad de los cortes. Los xenolitos de Auvernia son extremadamente pequeños, de forma que algunos están compuestos por pocos minerales, además de no estar uniformemente distribuidos, siendo esto evidente en los cortes PM27B-4, PM27B-5, PM27B-9, PM27B-27, PM27B-1A, PM27B- 4, PM27B-9. Con esto en consideración, y además la forma de realizar el conteo modal, la que no abarca todo el corte, sino solamente una sección correspondiente a uno de los costados, la posibilidad de distintos resultados es bastante elevada aunque el método de análisis de imágenes funcione correctamente.

En vista de lo anteriormente descrito se sugiere comprobar el método para un área definida y exactamente la misma en la cual se realice un análisis de conteo modal u otro análisis que involucre a imágenes. No se sugiere comparar tampoco el análisis de imágenes con el análisis modal derivado de geoquímica, pues para secciones pequeñas es probable que los resultados difieran en gran medida debido a que en los de imágenes no se incluye la tercera dimensión.



## **ANEXO PETROGRAFIA**

PM27A-1	
Nombre de Roca	Lherzolita de Sp
Texturas	Protogranular II-leves indicios de porfiroclástica
Descripción mineralógica	El Opx presenta tamaños que van desde 1 a 5mm, siendo el mayor de medidas 5x2mm, y midiendo la mayoría 2mm. El Olivino por su parte presenta cristales entre 1 y 6mm, el mayor de medidas 6x4mm se presenta parcialmente fracturado, pero conserva su integridad como un cristal. Existen olivinos levemente elongados en la parte central cuyo largo es 2mm. El promedio de cristales es 2mm. El Cpx y la Sp presentan tamaños pequeños, midiendo el primero entre 1 y 2mm y el segundo alcanzando solo el milímetro.
Otros	El xenolito presenta infiltración del basalto en la parte superior, ésta es en forma de vetillas que alcanzan espesores de 0.25mm. Se observa poca reacción en el xenolito, afectando principalmente a los bordes en contacto con la lava, donde se ve reaccionando a la Sp, Ol y el Opx, siendo este último el mayor afectado. En el centro del xenolito se observan espinelas con leves bordes de reacción y Cpx con <i>spongy rims</i> (Fig Anexo 1B).
Mineralogía accesoria	El xenolito posee abundantes sulfuros de tamaños inferiores a 10 $\mu\text{m}$ los cuales en sectores están orientados. El mayor de los sulfuros mide 40 $\mu\text{m}$ y corresponde a pirita, con alteración de hematita y magnetita junto a limolita en un Cpx(Fig. Anexo 1C).

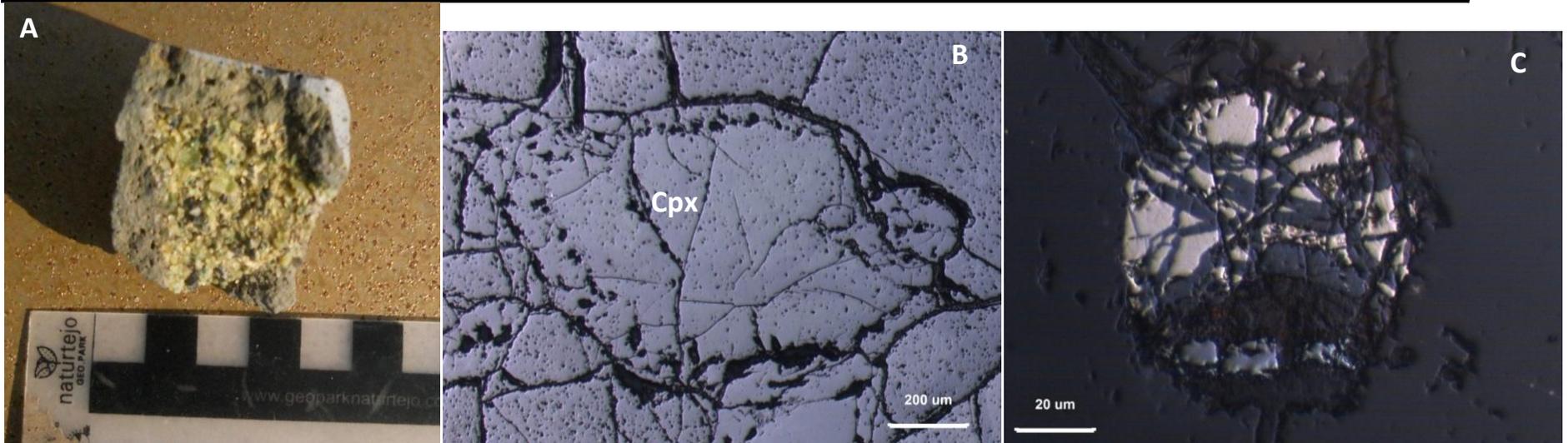


Figura Anexo 1: (A) Xenolito PM27A-1 en muestra de mano, barras de escala 1 cm. (B) Microfotografía obtenida con luz reflejada, *spongy rim* en Cpx. (C) Sulfuro de mayor tamaño encontrado en el xenolito.

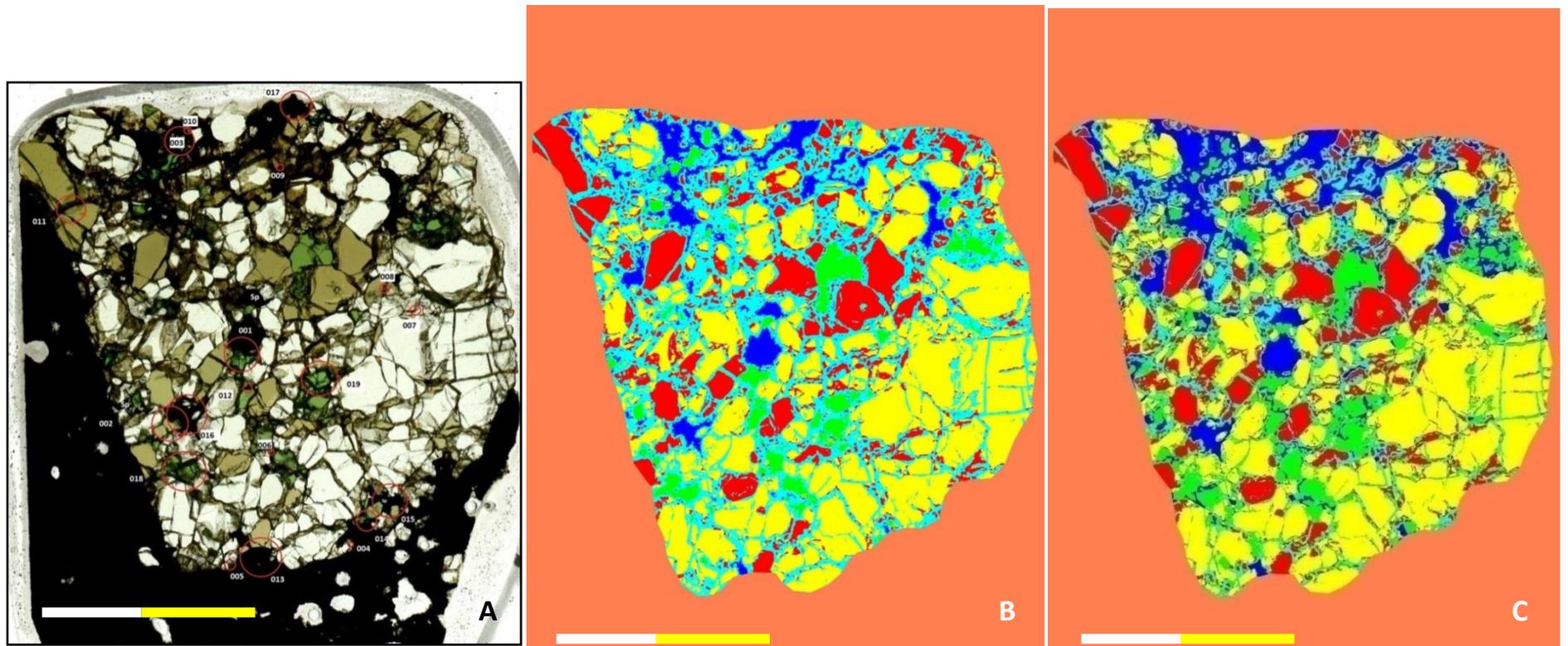


Figura Anexo 2: Barras de escala 0,5 cm (A) Imagen obtenida de Escáner Epson, muestra PM27A-1. (B) Resultado para SVM. (C) Resultado para NN.

PM27A-2	
Nombre de Roca	Hazburgita de Sp
Texturas	Protogranular l-leves indicios de porfiroclástica
Descripción mineralógica	El Opx presenta tamaños que van de 1 a 7mm, siendo el mayor cristal de medidas 7x5mm. Se aprecian en la parte media-inferior del corte cristales más pequeños y elongados de 1 x 0.5mm. El Ol presenta tamaños que van de 4 a 2mm, encontrándose la mayoría de los granos en 2mm. Al igual que el Opx se aprecian cristales orientados y elongados en la parte media-inferior de 1 x 0.5mm. El Cpx y la Sp presenta tamaños promedio de 1mm, mientras que el mayor tamaño en Sp es de 1.5mm
Otros	Se observa poca reacción en el xenolito, afectando principalmente a los bordes en contacto con la lava, donde se ve reaccionando fuertemente la Sp(Figura Anexo 3C), y Opx, el Ol se ve afectado de menor forma. Los Cpx en contacto con la lava no se observan con mayor reacción. En el centro del xenolito se observan espinelas y Cpx sin desequilibrios aparentes. Se observan algunas espinelas o illmenitas de menor tamaño elongadas al interior de los Cpx dispuestas en una dirección(Figura Anexo 3B). En los Opx se encuentran vetillas de exsolución dispuestas en el clivaje que probablemente correspondan a Cpx.
Mineralogía accesoria	El xenolito posee abundantes sulfuros de tamaños inferiores a 10 µm los cuales en sectores están orientados. El mayor de los sulfuros mide 20 µm y corresponde a pirita dentro de un Ol.

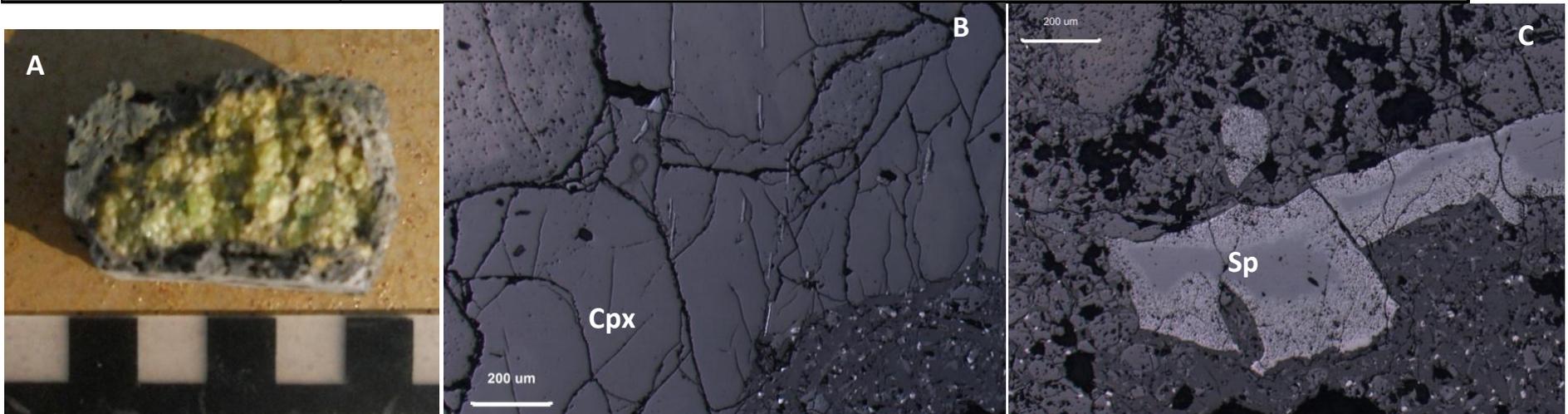


Figura Anexo 3: (A) Xenolito PM27A-2 en muestra de mano, barras de escala 1 cm. (B) Microfotografía obtenida a luz reflejada; minerales isótopos orientados dentro de Cpx. (C) Fuerte reacción de espinela en contacto con basalto.

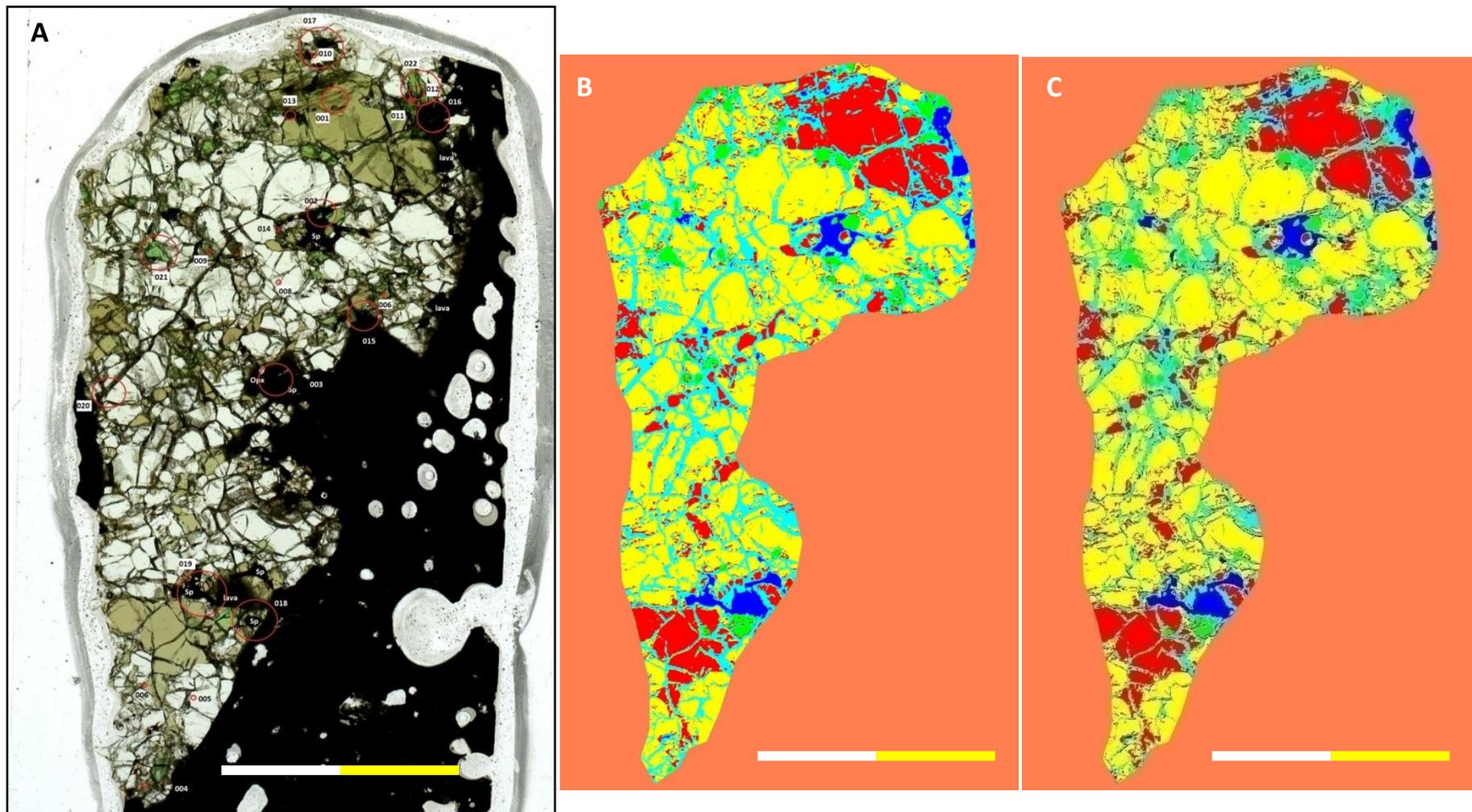


Figura Anexo 4: Barras de escala 0,5 cm (A) Imagen obtenida de Escáner Epson, muestra PM27A-2. (B) Resultado para SVM. (C) Resultado para NN.

PM27A-4	
Nombre de Roca	Hazburgita de Sp
Texturas	Protogranular I
Descripción mineralógica	El Opx y el Ol presenta tamaños que van de 1 a 5mm, teniendo 2mm de tamaño la mayoría de los cristales de Ol.El Cpx presenta tamaños que van de 1 a 2mm. Las Sp tienen tamaños inferiores a 1 mm.
Otros	Se observa localmente basalto en la parte central del xenolito el cual está haciendo reaccionar espinela(Figura Anexo 5C), sin embargo no se aprecia una mayor interacción además de los bordes en contacto con la lava, donde se ven los Opx y Sp reaccionando de mayor forma. Los Cpx presentan <i>spongy rims</i> .
Mineralogía accesoria	El xenolito posee sulfuros, el mayor de tamaños cercanos a los 20 $\mu\text{m}$ corresponde a pirita Ol(Figura Anexo 5B).

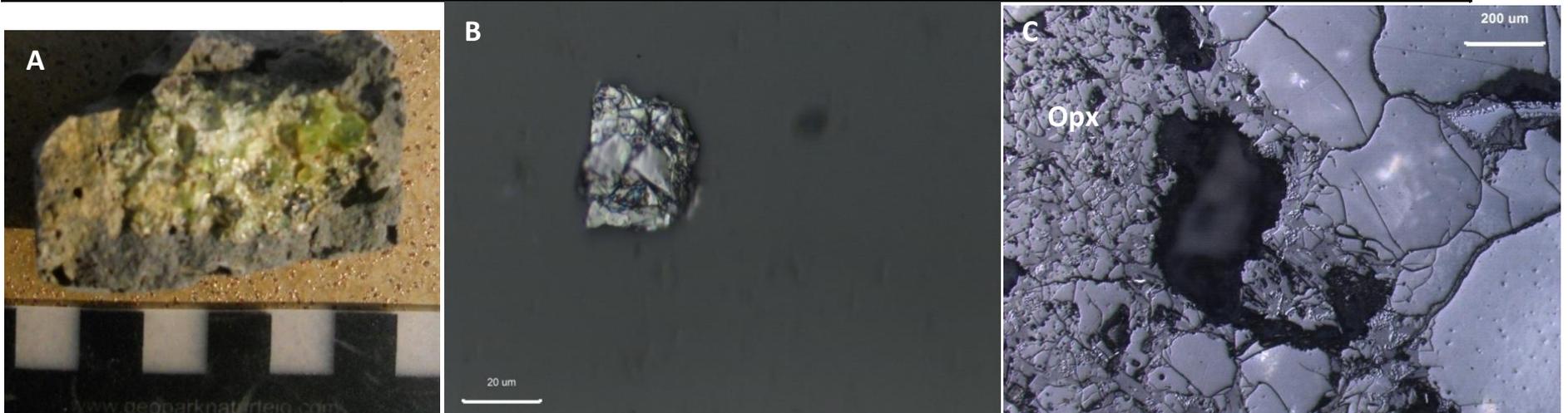


Figura Anexo 5: (A) Xenolito PM27A-4 en muestra de mano, barras de escala 1 cm. (B) Microfotografía obtenida a luz reflejada, pirita dentro de Ol. (C) Fuerte reacción de espinela y ortopiroxeno en contacto con zona de infiltración de basalto.

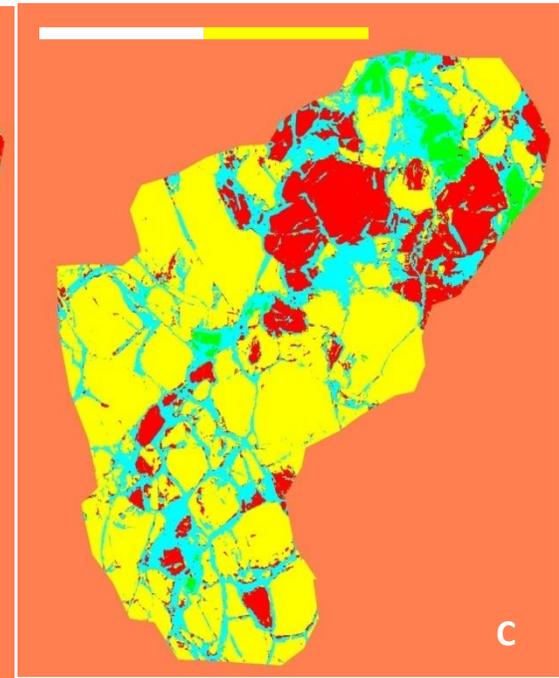
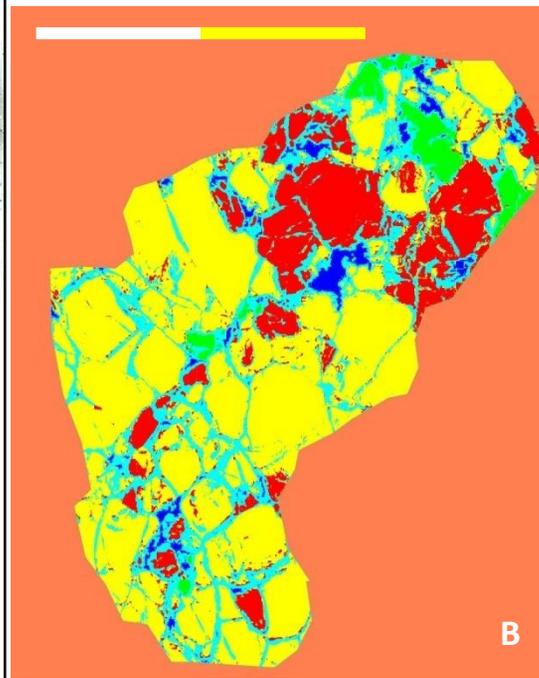
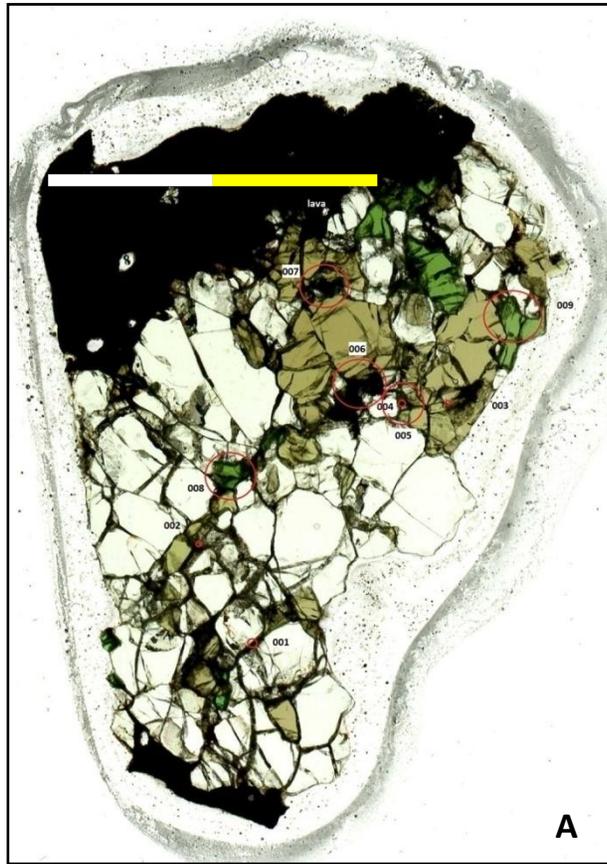


Figura Anexo 6: Barras de escala 0,5 cm (A) Imagen obtenida de Escáner Epson, muestra PM27A-4. (B) Resultado para SVM. (C) Resultado para NN.

PM27A-5	
Nombre de Roca	Hazburgita de Sp
Texturas	Protogranular I
Descripción mineralógica	El tamaño de Opx va entre 1 a 6 mm. El mayor mide 6x4mm y está caracterizado por la presencia de clivaje de piroxeno(Figura Anexo 7B).El Ol presenta tamaños de 1 a 3mm, teniendo la mayoría de los cristales la medida máxima. Se tiene solamente un cristal de Cpx el cual tiene medida de 2x1.5mm. La Sp es escasa y mide menos de un milímetro.
Otros	No se observa mayor interacción de la lava en el xenolito más que en el contacto con la lava, donde el Opx se observa reaccionando de mayor forma que el Ol. El cristal de Cpx presenta <i>spongy rims</i> (Figura 7C).
Mineralogía accesoria	El xenolito tiene escasa presencia de sulfuros, siendo el más importante calcopirita secundaria de 20 $\mu\text{m}$ en un contacto entre Opx y Ol. Se observan algunos sulfuros alineados.

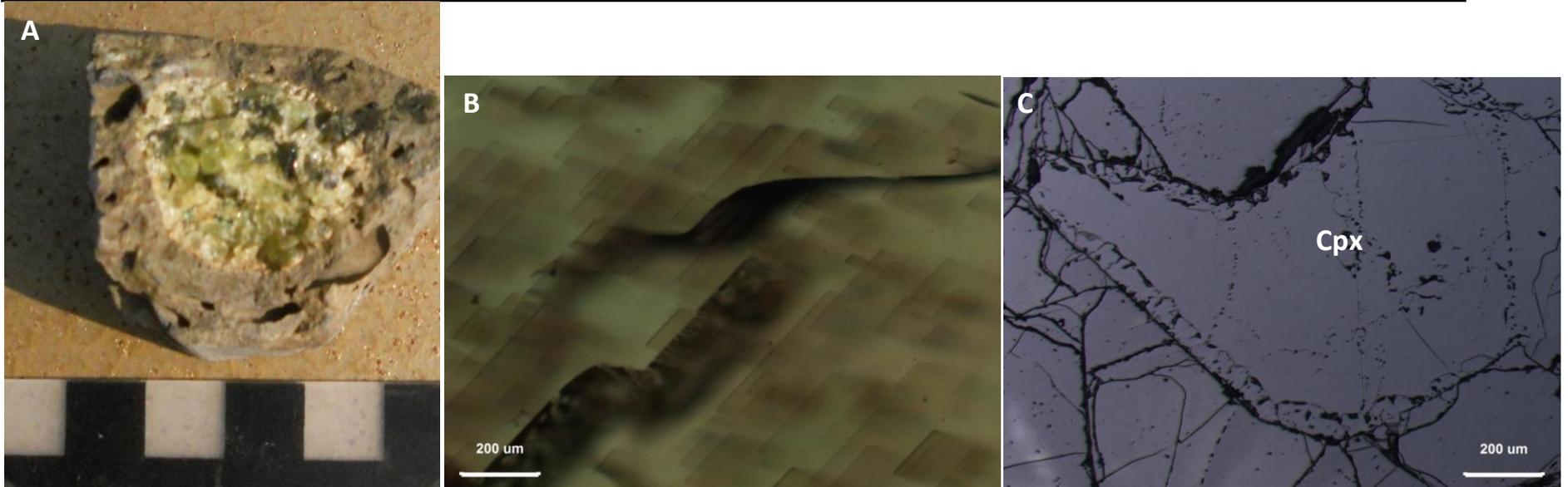


Figura Anexo 7: (A) Xenolito PM27A-5 en muestra de mano, barras de escala 1 cm. (B) Microfotografía obtenida a luz transmitida, clivaje en 90° de Opx. (C) Obtenida a luz reflejada, *spongy rim* en Cpx.

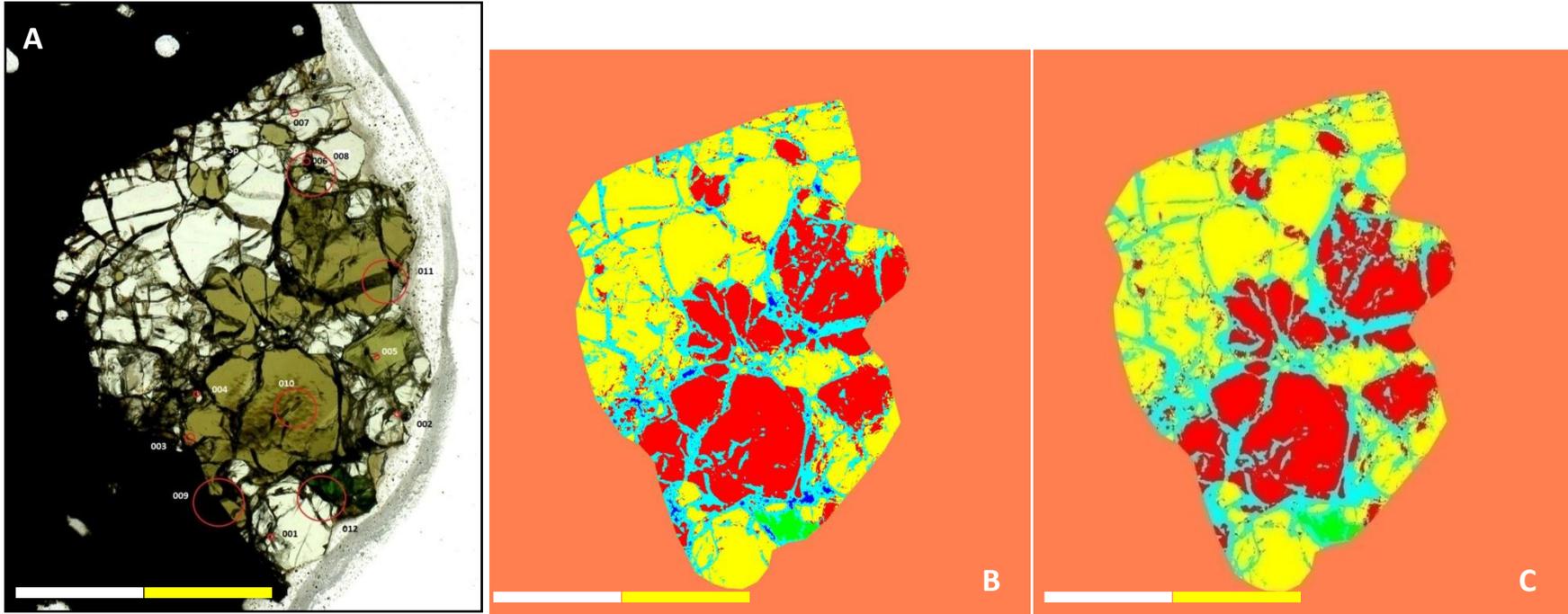


Figura Anexo 8: Barras de escala 0,5 cm (A) Imagen obtenida de Escáner Epson, muestra PM27A-5. (B) Resultado para SVM. (C) Resultado para NN.

PM27A-9	
Nombre de Roca	Lherzolita de Sp
Texturas	Protogranular I
Descripción mineralógica	El Ol presenta tamaños entre 1 y 4mm, encontrándose la mayor población con medidas cercanas a 2mm. El mayor presenta medidas de 4x3mm. El Opx, el Cpx y la Sp presentan tamaños uniformes y cercanos a 2mm, 1.5mm y 1mm respectivamente.
Otros	Se observa poca reacción en el xenolito, afectando principalmente a los bordes en contacto con la lava, donde el Opx posee mayor grado de reacción que el Ol. No se aprecian texturas de reacción en Sp a lo largo de todo el corte(Figura Anexo 9C). Los Cpx presentan <i>spongy rims</i> . (Figura Anexo 9B)
Mineralogía accesoria	El xenolito tiene escasa presencia de sulfuros, no superando ninguno de estos los 10 µm. En sectores se encuentran pequeñas burbujas orientadas.

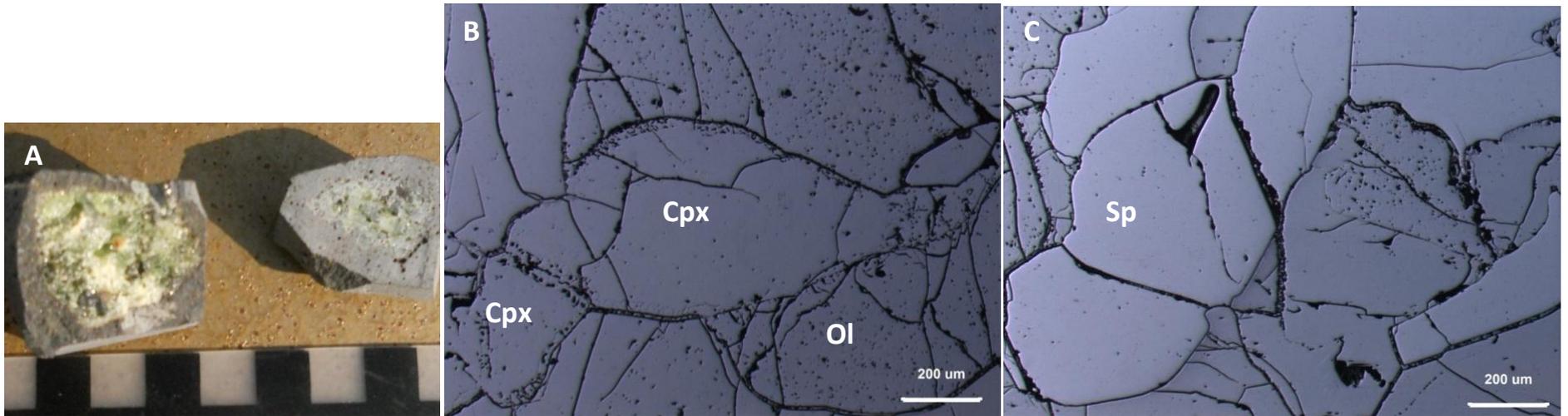


Figura Anexo 9: (A) Xenolito PM27A-9 en muestra de mano, barras de escala 1 cm. (B) Microfotografía obtenida a luz reflejada, *spongy rims* en Cpx. (C) Sp sin reacción.

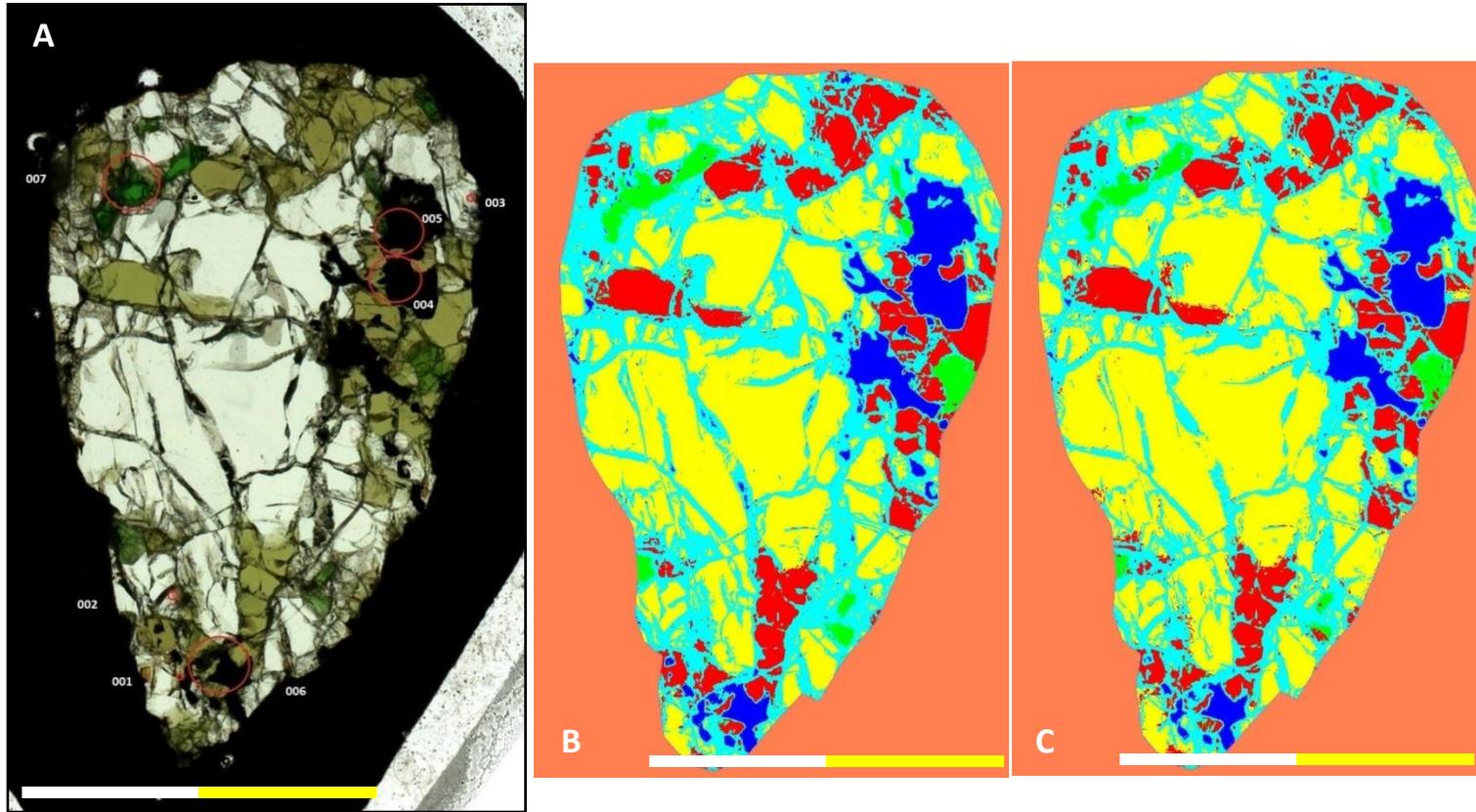


Figura Anexo 10: Barras de escala 0,5 cm (A) Imagen obtenida de Escáner Epson, muestra PM27A-9. (B) Resultado para SVM. (C) Resultado para NN.

PM27A-27	
Nombre de Roca	Wherlita
Texturas	Protogranular I
Descripción mineralógica	En esta sección se posee solamente presencia de Cpx y Ol. El primero con medidas entre 1 a 2.5mm, encontrándose a la mayor población en medidas cerca de 2mm. El Ol presenta medidas uniformes entre 1 y 1.5m, presentando en la mayoría de los casos contactos poligonales entre si (120°).
Otros	No se observa mayor interacción de la lava en el xenolito más que en el contacto con la lava, encontrándose esta además en dos sectores dentro del xenolito. Los cristales de Cpx presentan <i>spongy rims</i> con espesores de hasta 2mm(Figura Anexo 11B,C).
Mineralogía accesoria	La presencia de sulfuros es muy escasa, no superando estos los 10 µm. En sectores se encuentran pequeñas burbujas orientadas.

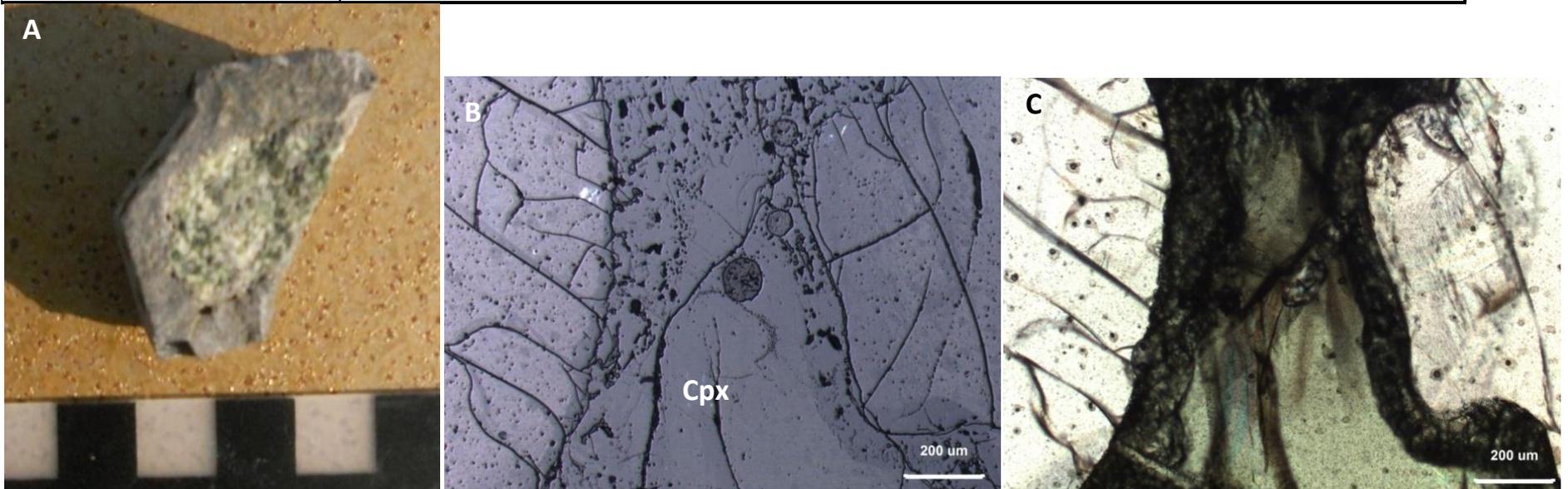


Figura Anexo 11: (A) Xenolito PM27A-27 en muestra de mano, barras de escala 1 cm. (B) Microfotografía obtenida a luz reflejada, *spongy rim* en Cpx. (C) Luz transmitida, nicoles paralelos.

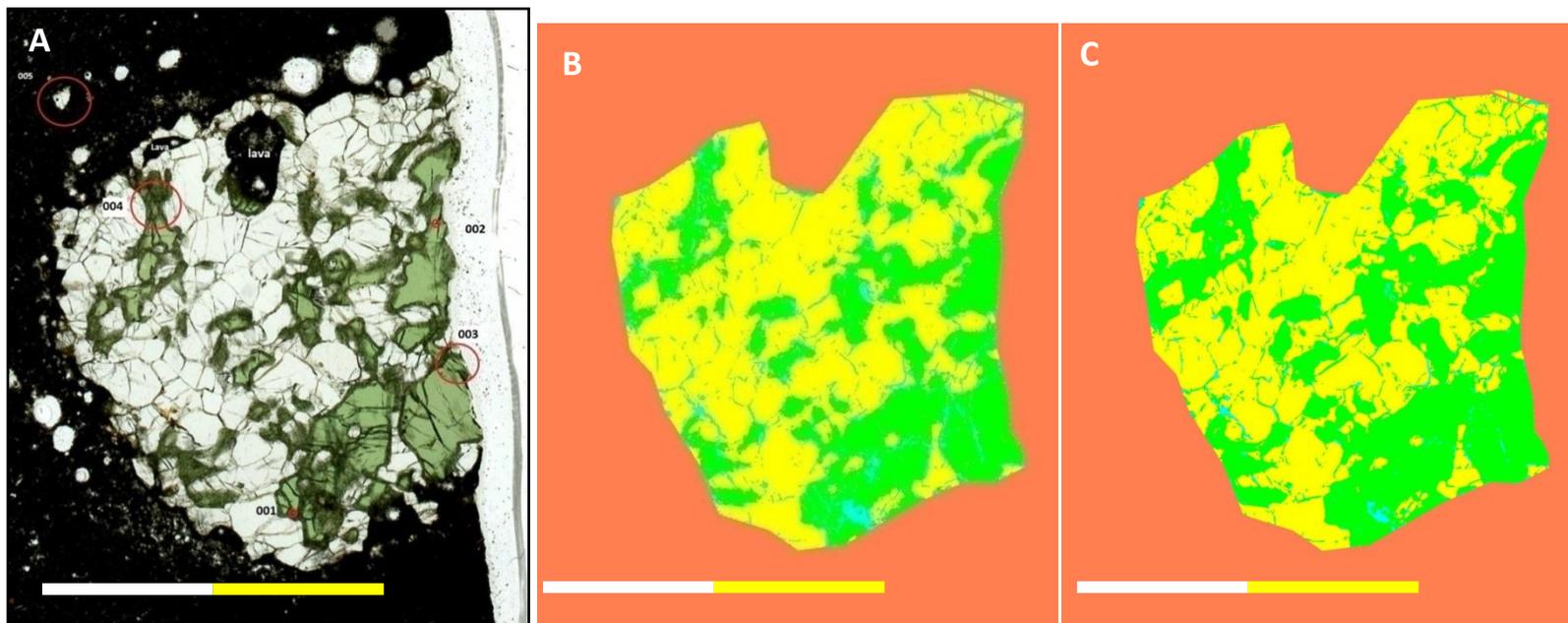


Figura Anexo 12: Barras de escala 0,5 cm (A) Imagen obtenida de Escáner Epson, muestra PM27A-27. (B) Resultado para SVM. (C) Resultado para NN.

PM27A-28	
Nombre de Roca	Lherzolita de Sp
Texturas	Protogranular I
Descripción mineralógica	El Opx, al igual que el Ol presenta tamaños que varían entre 1 y 3mm, presentando la mayoría de los cristales tamaños de 2mm para el caso del Ol. El Cpx y la Sp presentan tamaños similares y cercanos a los 2mm. El mayor tamaño alcanzado por la espinela es de 3mm
Otros	No se observa mayor interacción de la lava en el xenolito más que en el contacto con la lava, donde el Opx se ve reaccionando de mayor forma que el Ol(Figura Anexo 13C). Los Cpx presentan leve <i>spongy rims</i> .
Mineralogía accesoria	El xenolito posee sulfuros, el mayor de tamaño 20 $\mu\text{m}$ corresponde a pirita y sulfuros de Ni y Co en Cpx(Figura Anexo 13B). Se observan sulfuros orientados.



Figura Anexo 13: (A) Xenolito PM27A-28 en muestra de mano, barras de escala 1 cm. (B) Microfotografía obtenida a luz reflejada, pirita dentro de Ol. (C) Leve reacción de Ol en contacto con basalto.

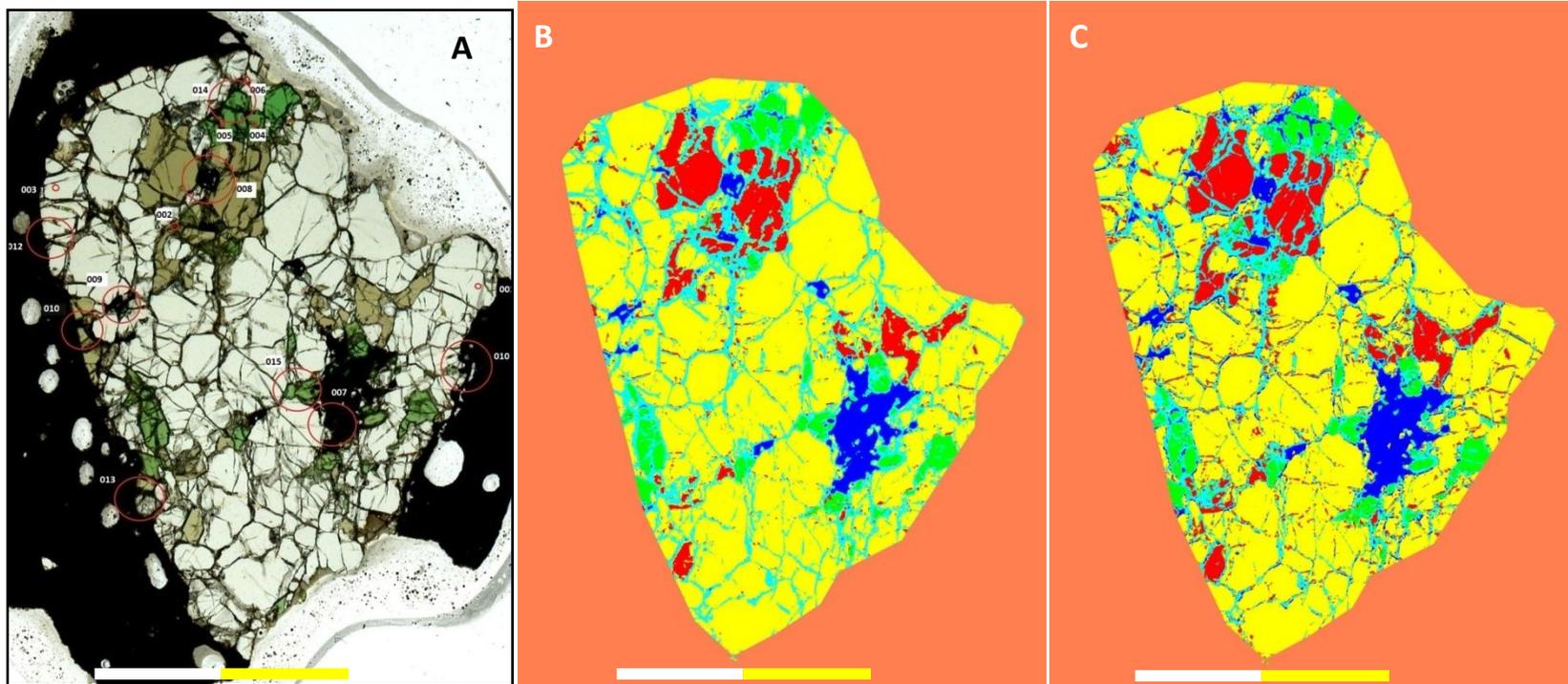


Figura Anexo 14 : Barras de escala 0,5 cm (A) Imagen obtenida de Escáner Epson, muestra PM27A-28. (B) Resultado para SVM. (C) Resultado para NN.

PM27B-1A	
Nombre de Roca	Lherzolita de Sp
Texturas	Protogranular I
Descripción mineralógica	El Ol presenta tamaños uniformes entre 1 a 1.5mm. Con la excepción del mayor, de medidas 5 x 4mm. El Opx presenta tamaños uniformes y cercanos a 2mm. Se aprecian dos cristales de Cpx de medidas cercanas a los 2mm, el resto, al igual que las Sp son cristales más pequeños cercanos al milímetro. Se observa en un sector espinelas esféricas de menor tamaño dentro de Ol (Figura Anexo 15C).
Otros	No se observa mayor interacción de la lava en el xenolito más que en el contacto con la lava, donde el Opx se observa reaccionando de mayor forma que el Ol. Se aprecia una Sp en contacto directo con el xenolito reaccionando casi completamente, las que se encuentran al interior del xenolito se ven sanas. Los cristales de Cpx presentan <i>spongy rims</i> .
Mineralogía accesoria	Se observa presencia de sulfuros, siendo el más importante de 20 $\mu\text{m}$ de tamaño que corresponde a pirita en zona de <i>spongy rim</i> (Figura Anexo 15B). En sectores se encuentran pequeñas burbujas orientadas.

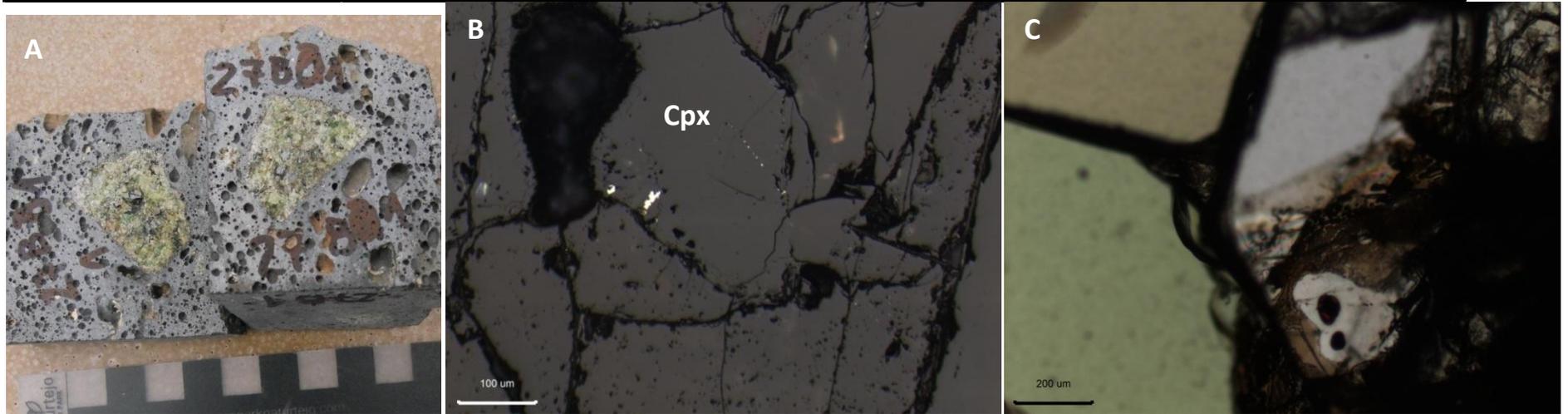


Figura Anexo 15: (A) Xenolito PM27B-1A en muestra de mano, barras de escala 1 cm. (B) Microfotografía obtenida a luz reflejada, pirita en borde de cpx. (C) Luz transmitida, nicoles paralelos, espinela esférica dentro de Ol.

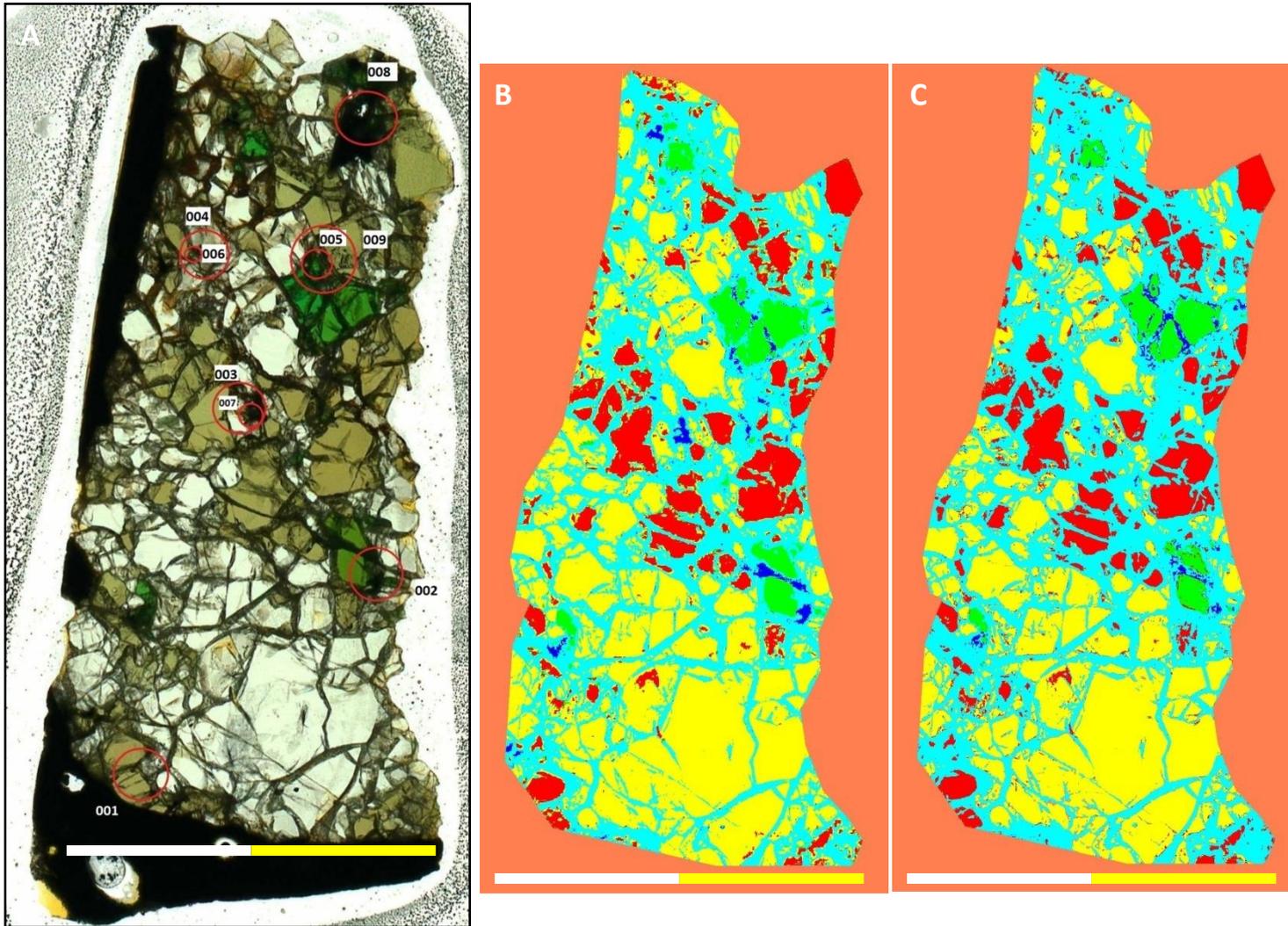


Figura Anexo 16: Barras de escala 0,5 cm (A) Imagen obtenida de Escáner Epson, muestra PM27B-1A. (B) Resultado para SVM. (C) Resultado para NN.

PM27B-1B	
Nombre de Roca	Hazburgita de Sp
Texturas	Protogranular I
Descripción mineralógica	El mayor cristal en la muestra corresponde a Opx, con medidas de 5x4mm, el resto de los opx presenta medidas cercanas a 2mm. El Ol presenta medidas de 1 a 4mm, concentrándose la mayoría de los cristales entre 1.5 a 2mm. El Cpx presenta medidas entre 3 y 1mm, siendo la medida menor la representativa. Las espinelas presentan medidas inferiores a 0.5 mm.
Otros	Se observa infiltración del basalto en la parte media, atravesando todo el xenolito y de grosor máximo 0.75mm. Se observan a las Sp en estas zonas reaccionando casi en su totalidad(Figura Anexo 17C). En los bordes los Opx, los Ol y las Sp se ven reaccionando en gran medida. Los Cpx presentan <i>spongy rims</i> .
Mineralogía accesoria	Existe presencia de sulfuros, siendo el más importante de 50 µm de tamaño que corresponde a pirita y sulfuros de Co y Ni en Opx(Figura Anexo 17B). Se ven pequeños sulfuros alineados.



Figura Anexo 17: (A) Xenolito PM27B-1B en muestra de mano, barra de escala 1 cm. (B) Microfotografía obtenida a luz reflejada, sulfuro dentro de Opx. (C) Fuerte reacción de espinela en contacto con zona de infiltración de basalto

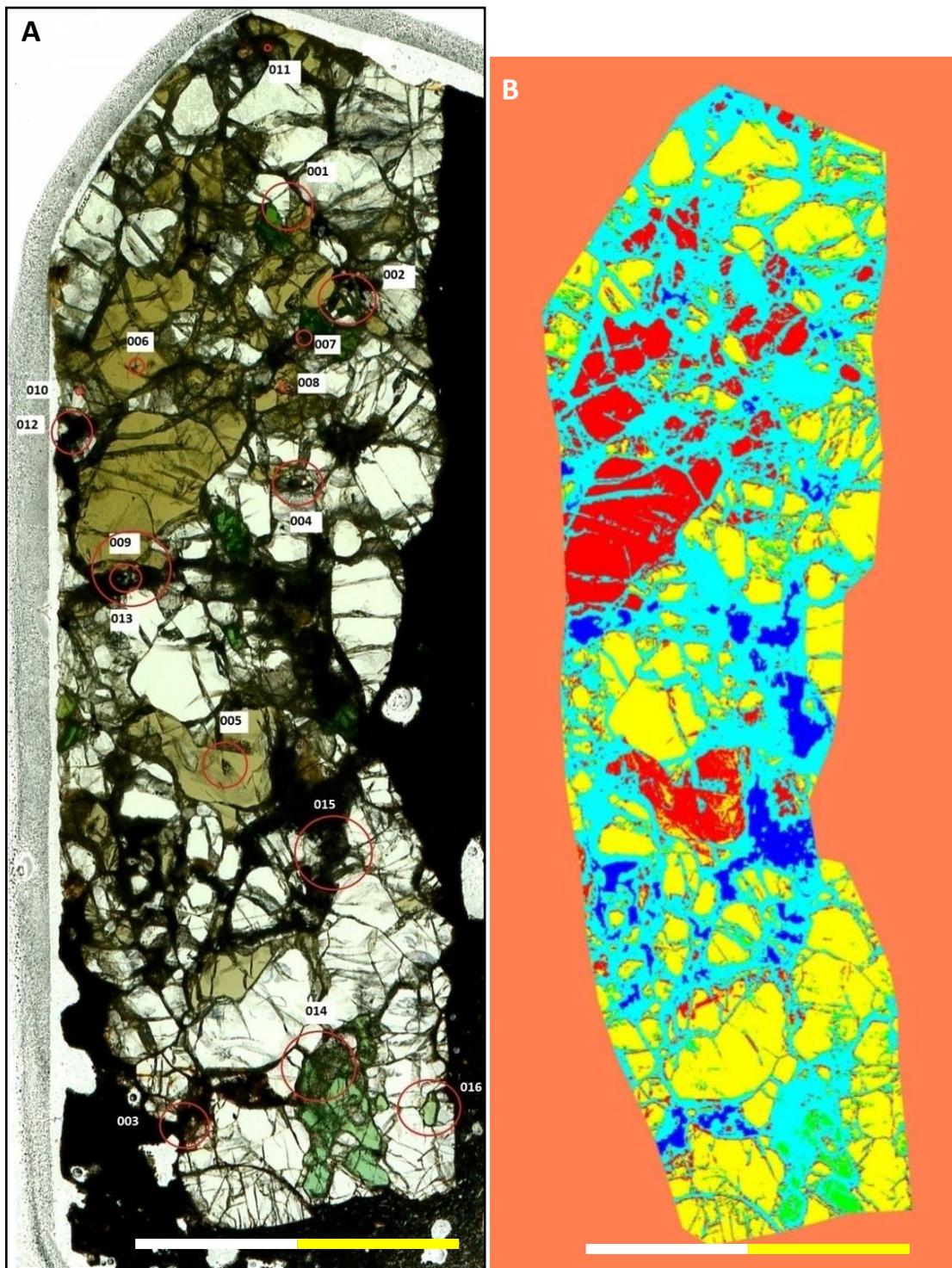


Figura Anexo 18: Barras de escala 0,5 cm (A) Imagen obtenida de Escáner Epson, muestra PM27B-1B. (B)Resultado para NN.

PM27B-2	
Nombre de Roca	Hazburgita de Sp
Texturas	Protogranular I-levés indicios de porfiroclástica
Descripción mineralógica	Se presentan cristales de Ol y Opx orientados localmente de medidas cercanas a 2x1mm, pudiendo identificarse más claramente en las secciones PM27B-2b,PM27B-2c. Los tamaños mayores alcanzados por ambos minerales son de 3mm. El tamaño de Cpx es en promedio 2mm. La espinela es escasa y de tamaños inferiores a 0.5mm y se encuentra restringida principalmente a la muestra PM27B-2b.
Otros	Se tienen dos trozos de xenolito en dos secciones transparentes distintas, PM27B-2a, PM27B-2b y PM27B-2c. Se observan los tres cortes con bastante infiltración de lava, especialmente en los cortes PM27B-2b, PM27B-2c. La infiltración es en forma de venillas, alcanzando grosores de 0,75 mm. Las espinelas no presentan reacción(Figura Anexo 19B). El Cpx presenta <i>spongy rims</i> (Figura Anexos.19C)
Mineralogía accesoria	Existe presencia de sulfuros, los que en su mayoría son de tamaño inferior a 10 µm, el mayor se presenta en la sección PM27B-2c y corresponde a pirita en Cpx.

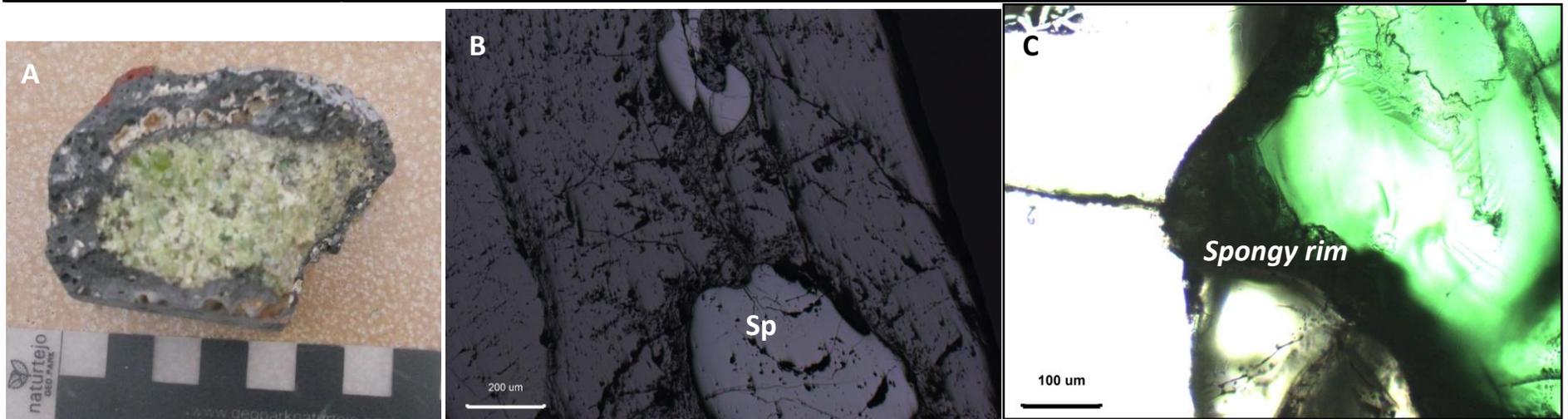


Figura Anexo 19: (A) Xenolito PM27B-2 en muestra de mano, barra de escala 1 cm. (B) Microfotografía obtenida a luz reflejada espinela sin reacción. (C) Luz transmitida, nícoles paralelos. *spongy rim* en clinopiroxeno captada con sobresaturación de luz.

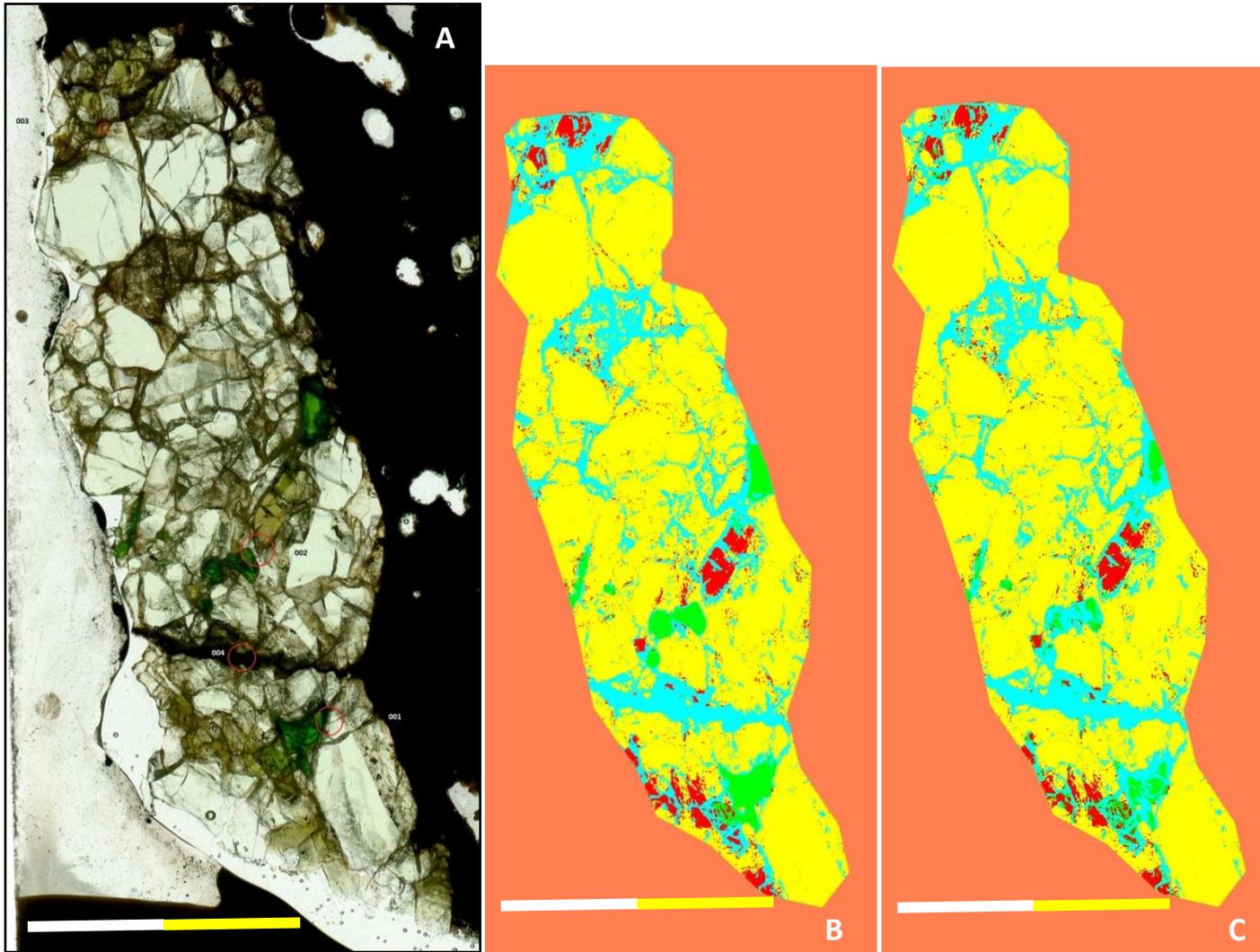


Figura Anexo 20: Barras de escala 0,5 cm (A) Imagen obtenida de Escáner Epson, muestra PM27B-2a. (B) Resultado para SVM. (C) Resultado para NN.

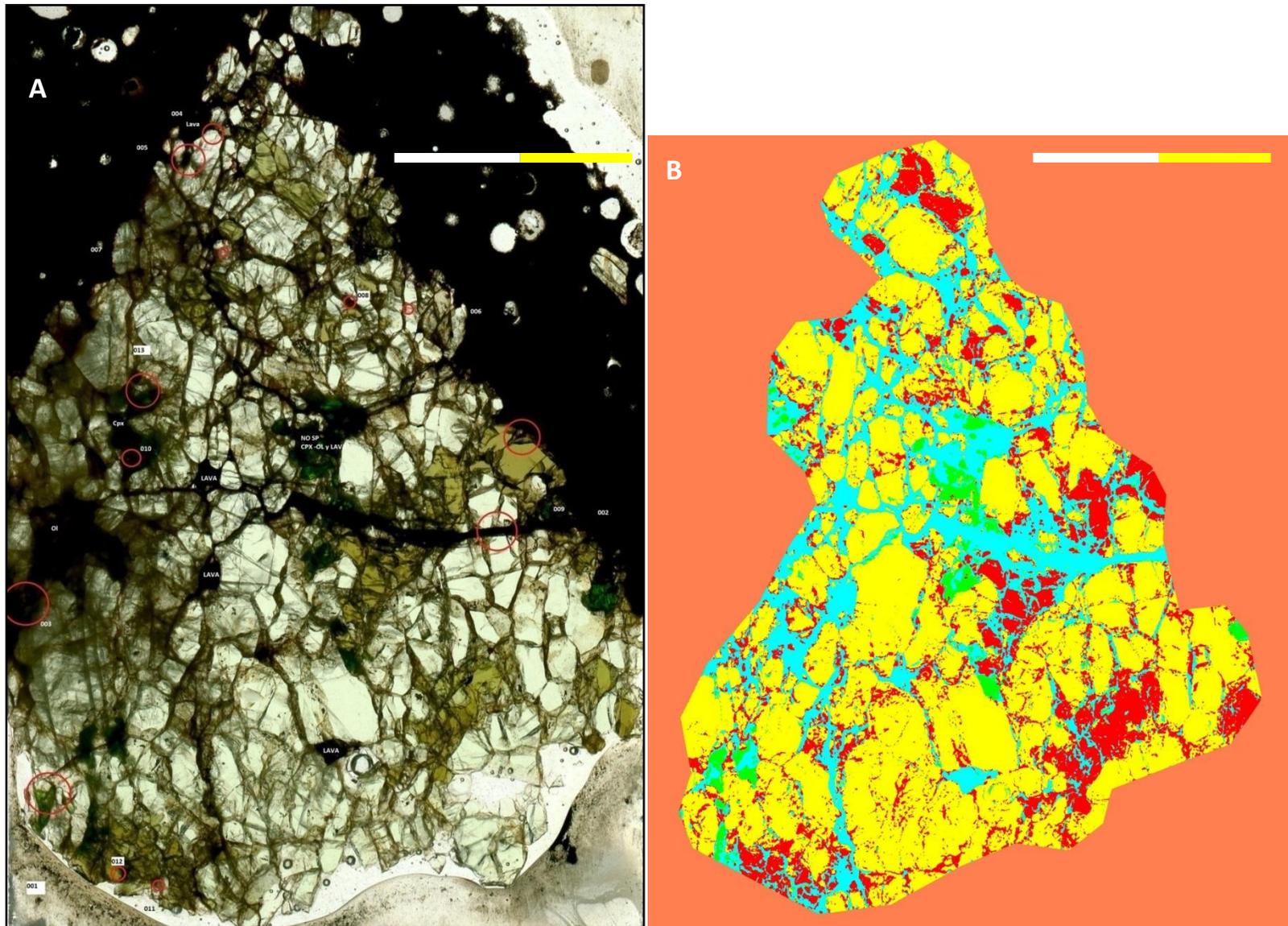


Figura Anexo 21 : Barras de escala 0,5 cm (A) Imagen obtenida de Escáner Epson, muestra PM27B-2b. (B) Resultado para NN.

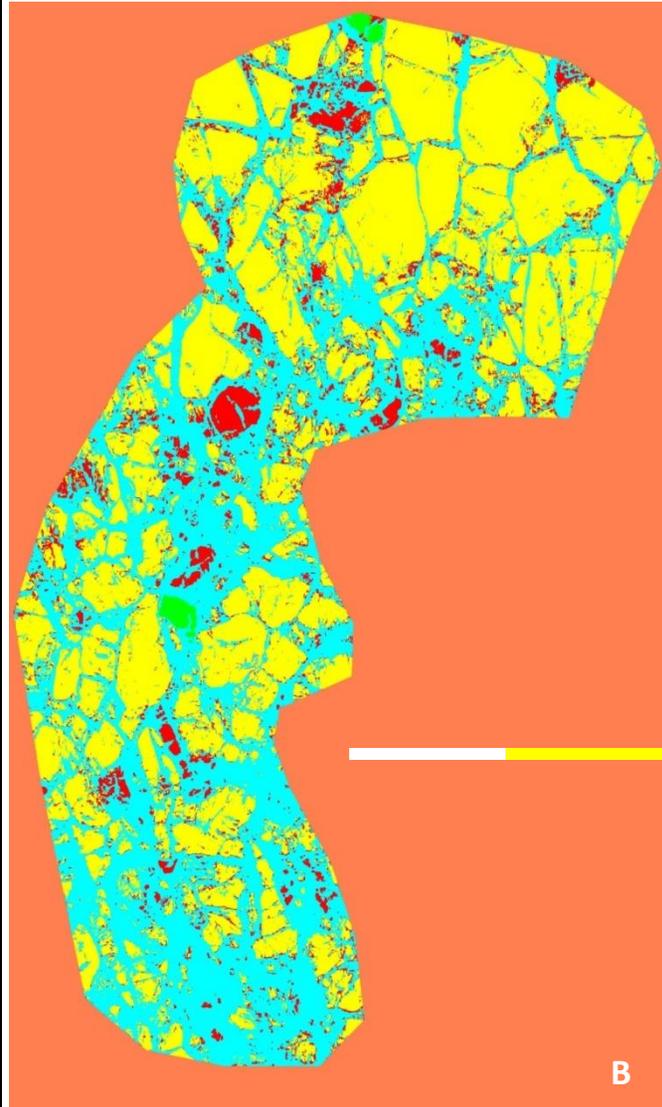
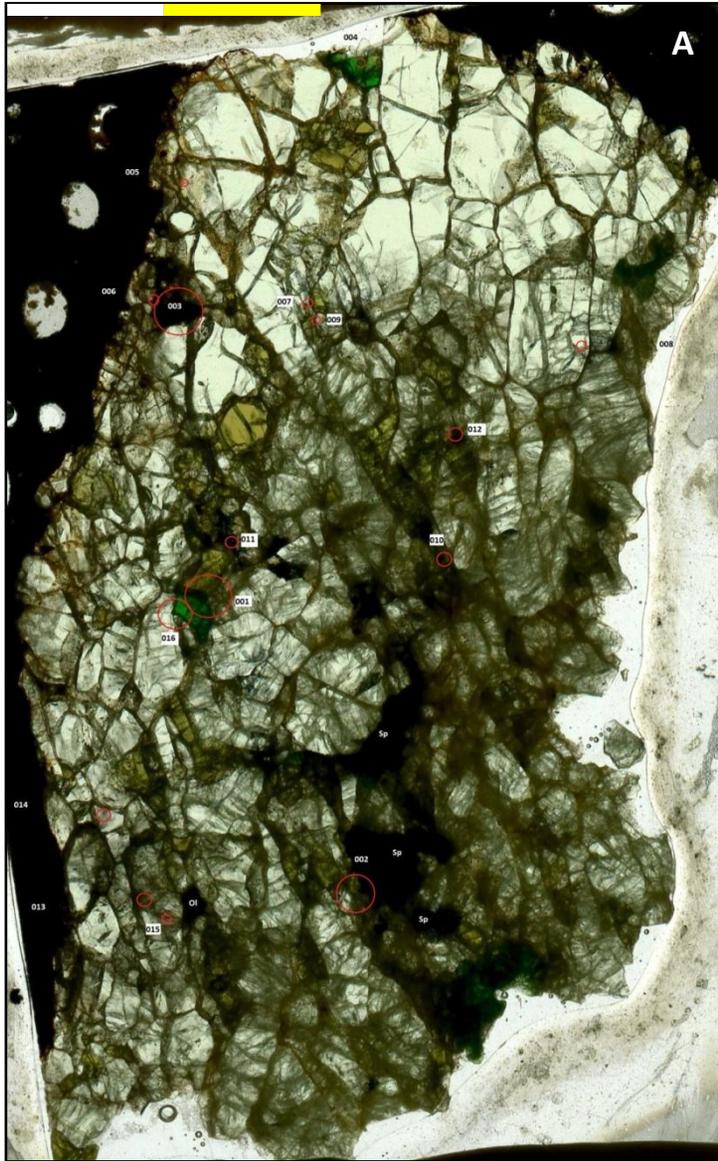


Figura Anexo 22: Barras de escala 0,5 cm (A) Imagen obtenida de Escáner Epson, muestra PM27B-2c. (B) Resultado para NN.

PM27B-3	
Nombre de Roca	Lherzolita de Sp
Texturas	Protogranular I
Descripción mineralógica	El Ol y el Opx presentan tamaños que van de 1 a 4mm. El mayor Ol mide 4x3mm, mientras que el mayor Opx 4x4. La mayoría de los cristales para ambos minerales poseen medidas cercanas a los 2 mm. El tamaño de los Cpx es uniforme con medidas cercanas a 1mm. La Sp presenta un cristal, que alcanza los 1.5mm.
Otros	Se observa poca reacción en el xenolito, afectando principalmente a los bordes en contacto con la lava, donde se ve reaccionando a la Sp al Opx(Figura Anexo 23B) y de menor forma al Ol. El Cpx presenta <i>spongy rims</i> .
Mineralogía accesoria	En el xenolito existe escasa presencia de sulfuros, siendo el de tamaño mayor 10 µm correspondiente a pirita y sulfuros de Ni y Co en Opx(Figura Anexo 23C). En sectores se encuentran pequeñas burbujas orientadas.

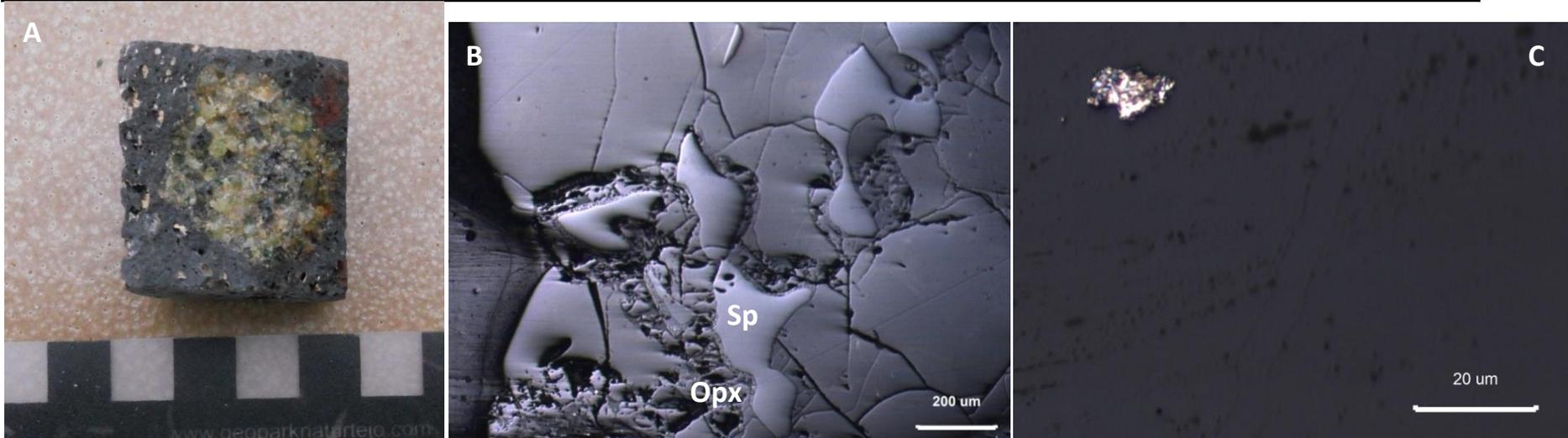


Figura Anexo 23 : (A) Xenolito PM27B-3 en muestra de mano, barra de escala 1 cm. (B) Microfotografía obtenida a luz reflejada, Sp y Opx reaccionando. (C) sulfuro mayor en el corte.

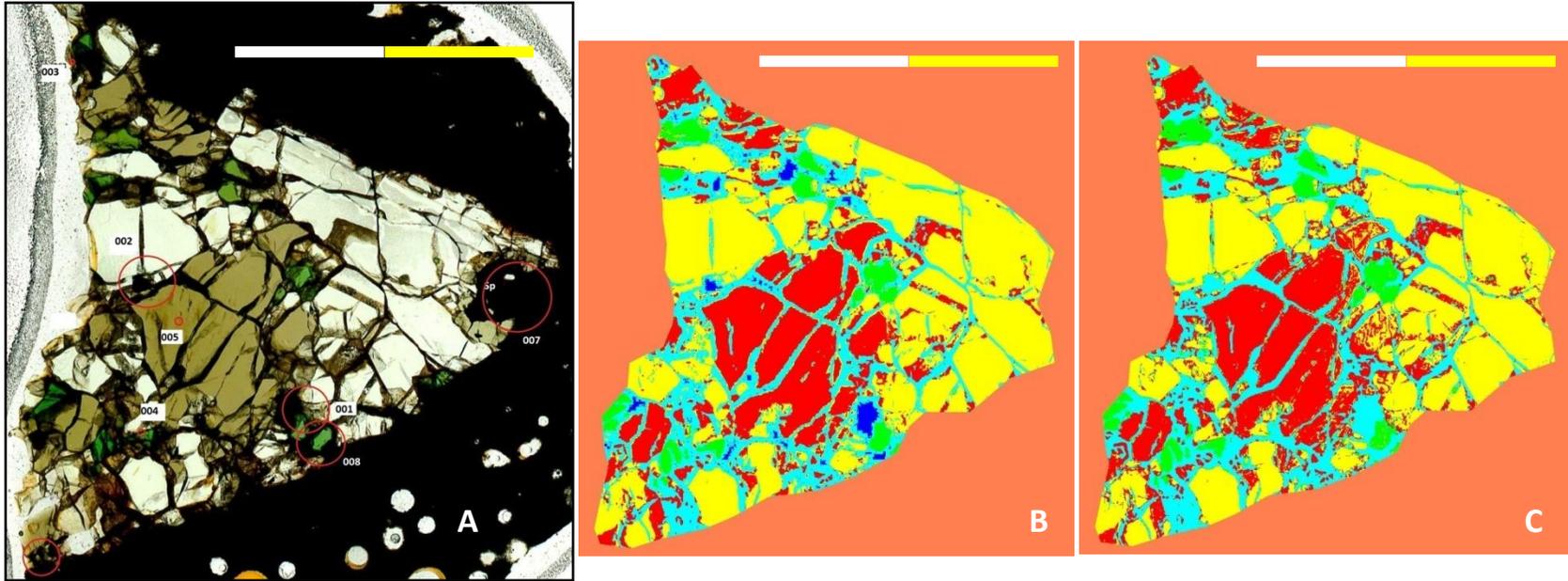


Figura Anexo 24: Barras de escala 0,5 cm (A) Imagen obtenida de Escáner Epson, muestra PM27B-3. (B) Resultado para SVM. (C) Resultado para NN.

PM27B-4	
Nombre de Roca	Hazburgita de Sp
Texturas	Protogranular I
Descripción mineralógica	EL Opx presenta el cristal de mayor tamaño, con dimensiones de 4x2mm. Los tamaños de la mayoría de los cristales para el Ol, Cpx y Opx son de 2mm. La Sp presenta tamaños cercanos a 1.5mm, pudiendo apreciarse más esférica en un sector(Figura Anexo 25B)
Otros	Se observa poca reacción en el xenolito, afectando principalmente a los bordes en contacto con la lava, donde se ve reaccionando a la Sp, al Opx y de menor forma al Ol. El Cpx presenta leve <i>spongy rims</i> (Figura Anexo 25C).
Mineralogía accesoria	Existe presencia de sulfuros, el mayor de 15 $\mu\text{m}$ correspondiente a pirita en Cpx. En sectores se encuentran pequeñas burbujas orientadas.

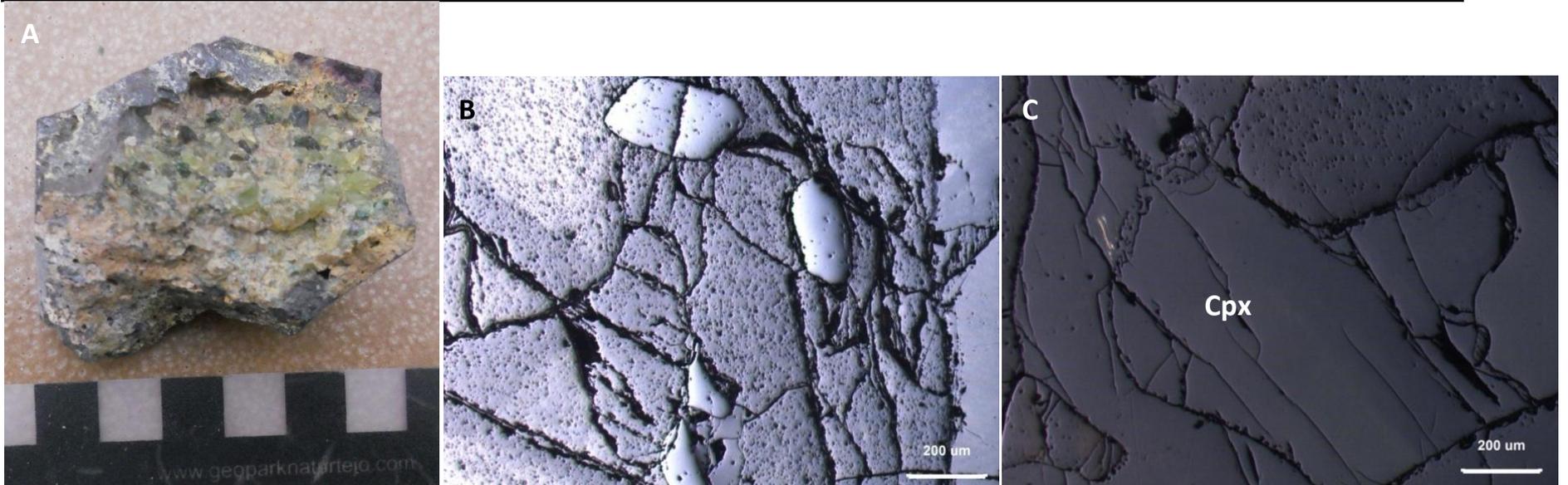


Figura Anexo 25: (A) Xenolito PM27B-4 en muestra de mano, barra de escala 1 cm. (B) Microfotografía obtenida a luz reflejada, espinelas de forma más esférica. (C) *Spony rim* en clinopiroxeno

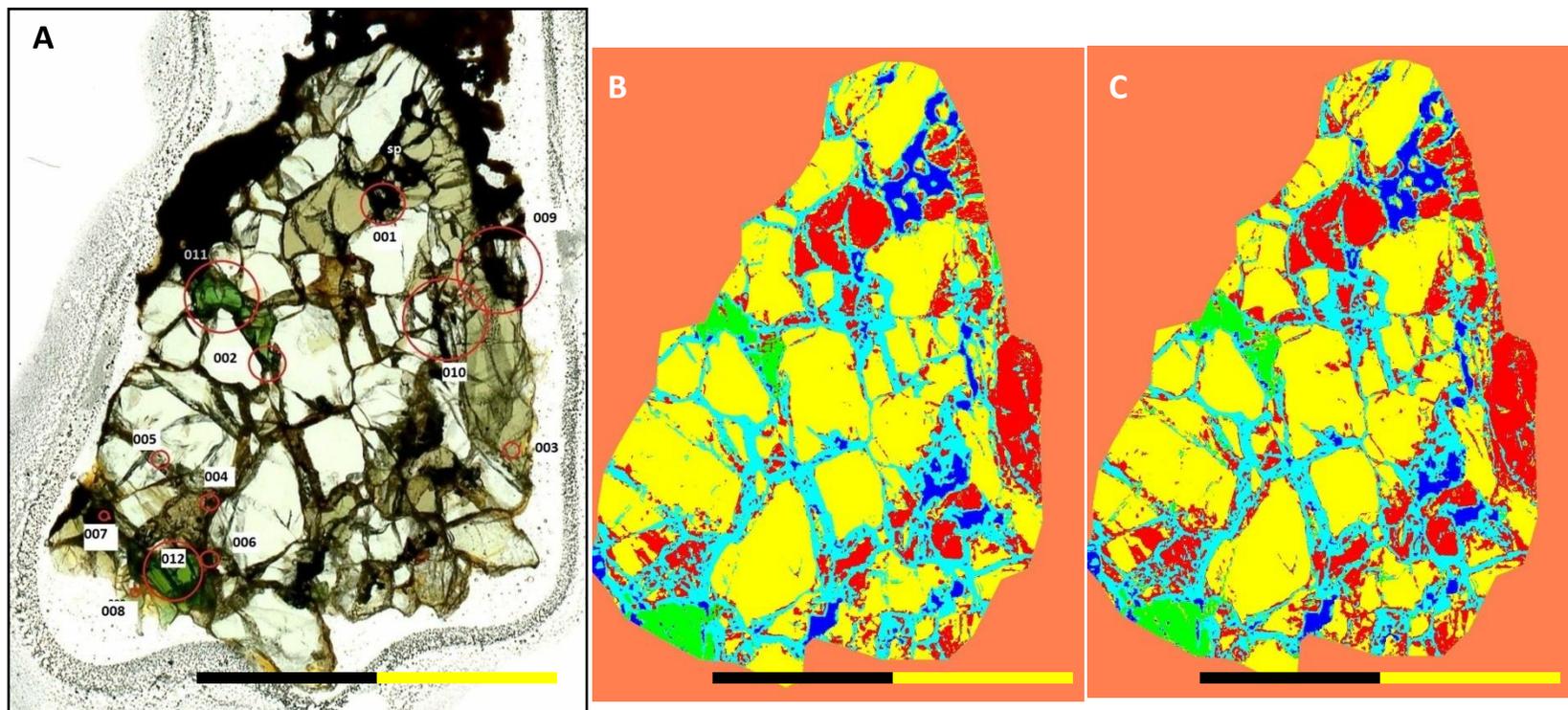


Figura Anexo 26: Barras de escala 0,5 cm (A) Imagen obtenida de Escáner Epson, muestra PM27B-4. (B) Resultado para SVM. (C) Resultado para NN.

PM27B-9	
Nombre de Roca	Hazburgita de Sp
Texturas	Protogranular I
Descripción mineralógica	El Ol y Cpx presentan tamaños que van entre 1 y 2mm, presentando las mayores poblaciones en esta última medida, existiendo un mineral de Opx que alcanza los 3mm de tamaño. El Cpx y la Sp presentan tamaños cercanos uniformes y cercanos a 1mm.
Otros	Se observa infiltración de basalto en la zona superior e inferior, que alcanzan 0.4 y 1 mm de grosor respectivamente. En éstas partes y en los bordes del xenolito se aprecia reaccionando en gran medida a la Sp(Figura Anexo 27B) y el Opx, no notándose tan alterado al Ol ni al Cpx. Los Cpx presentan <i>spongy rims</i> .(Figura Anexo 27C)
Mineralogía accesoria	Existe escasa presencia de sulfuros y sus tamaños son inferiores a 10 $\mu$ m.

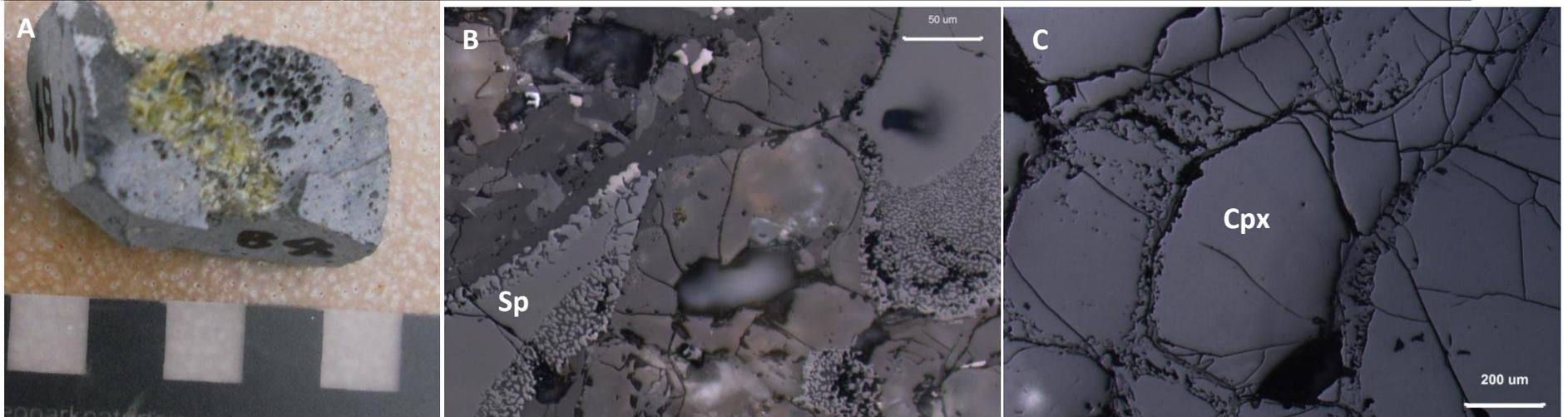


Figura Anexo 27: (A) Xenolito PM27B-9 en muestra de mano, barra de escala 1 cm. (B) Microfotografía obtenida a luz reflejada, reacción de espinela en contacto con basalto. (C) *Spongy rim* en clinopiroxeno

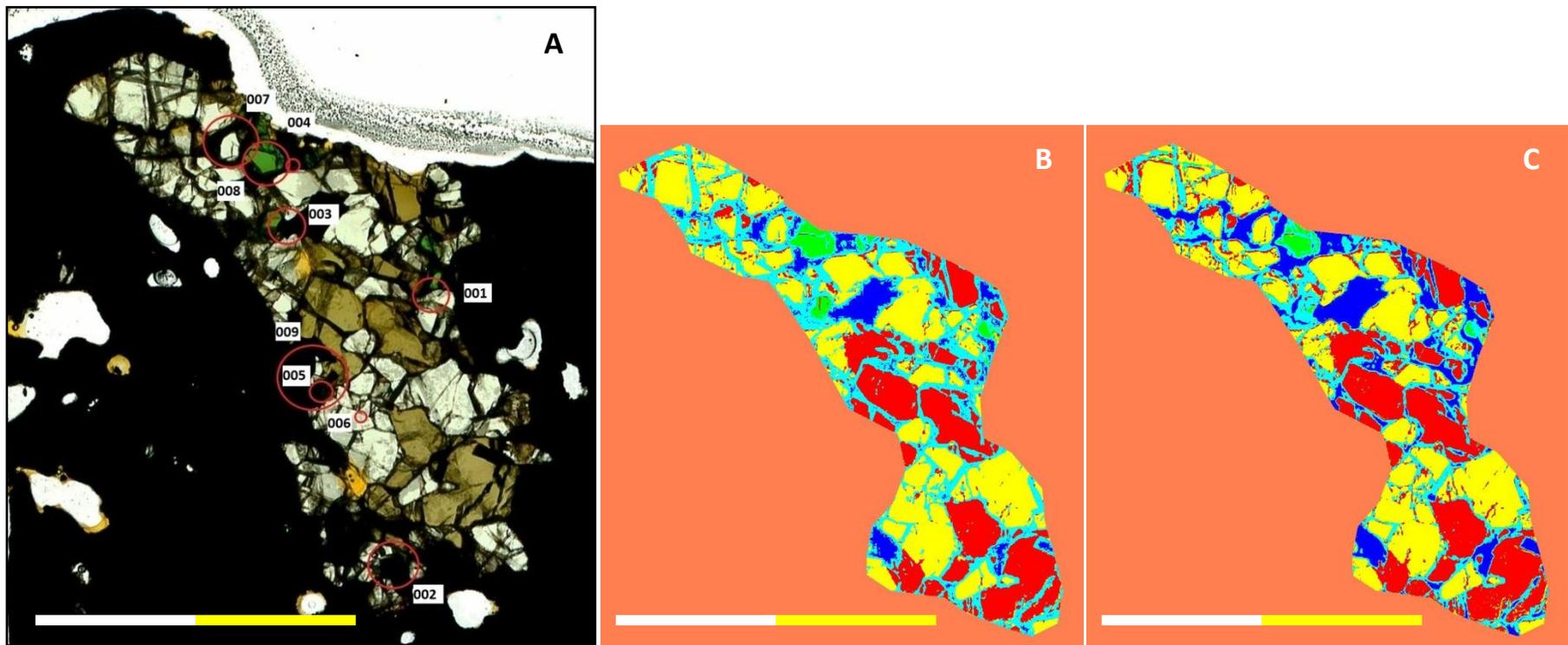


Figura Anexo 28 : Barras de escala 0,5 cm (A) Imagen obtenida de Escáner Epson, muestra PM27B-9. (B) Resultado para SVM. (C) Resultado para NN.

PM27B-10	
Nombre de Roca	Hazburgita de Sp
Texturas	Protogranular I
Descripción mineralógica	El Opx presenta tamaños entre 1 y 2.5 mm, el mayor de dimensiones 2.5 x 1.5mm. El Olivino presenta tamaños entre 1 y 2 mm. Se presenta solamente un cristal de Cpx en el corte, de medidas 0.8 x 0.1mm. La Sp presenta tamaños cercanos a 1mm.
Otros	Se observa poca reacción en el xenolito, afectando principalmente a los bordes en contacto con la lava, donde se ve reaccionando a la Sp, Ol y el Opx, siendo este último el mayor afectado(Figura Anexo 29B, 29C). En la parte inferior del xenolito se puede notar con luz reflejada lo que pareciera ser exsolución en Opx, sin embargo no se observa con luz transmitida. El Cpx presente no presenta <i>spongy rims</i> , sin embargo hay que tener en cuenta que al ser un solo cristal no es representativo.
Mineralogía accesoria	Existe una muy escasa presencia de sulfuros siendo estos de tamaños menores a 10 $\mu$ m.

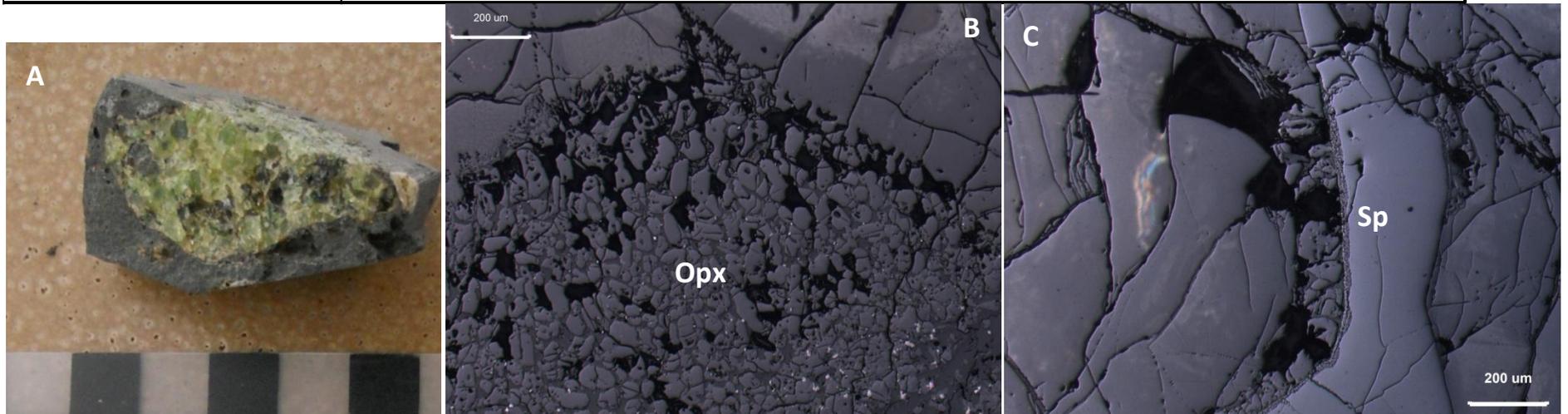


Figura Anexo 29: (A) Xenolito PM27B-10 en muestra de mano, barra de escala 1 cm. (B) Microfotografía obtenida a luz reflejada, reacción de Opx en contacto con basalto. (C) Reacción de Opx y Sp..

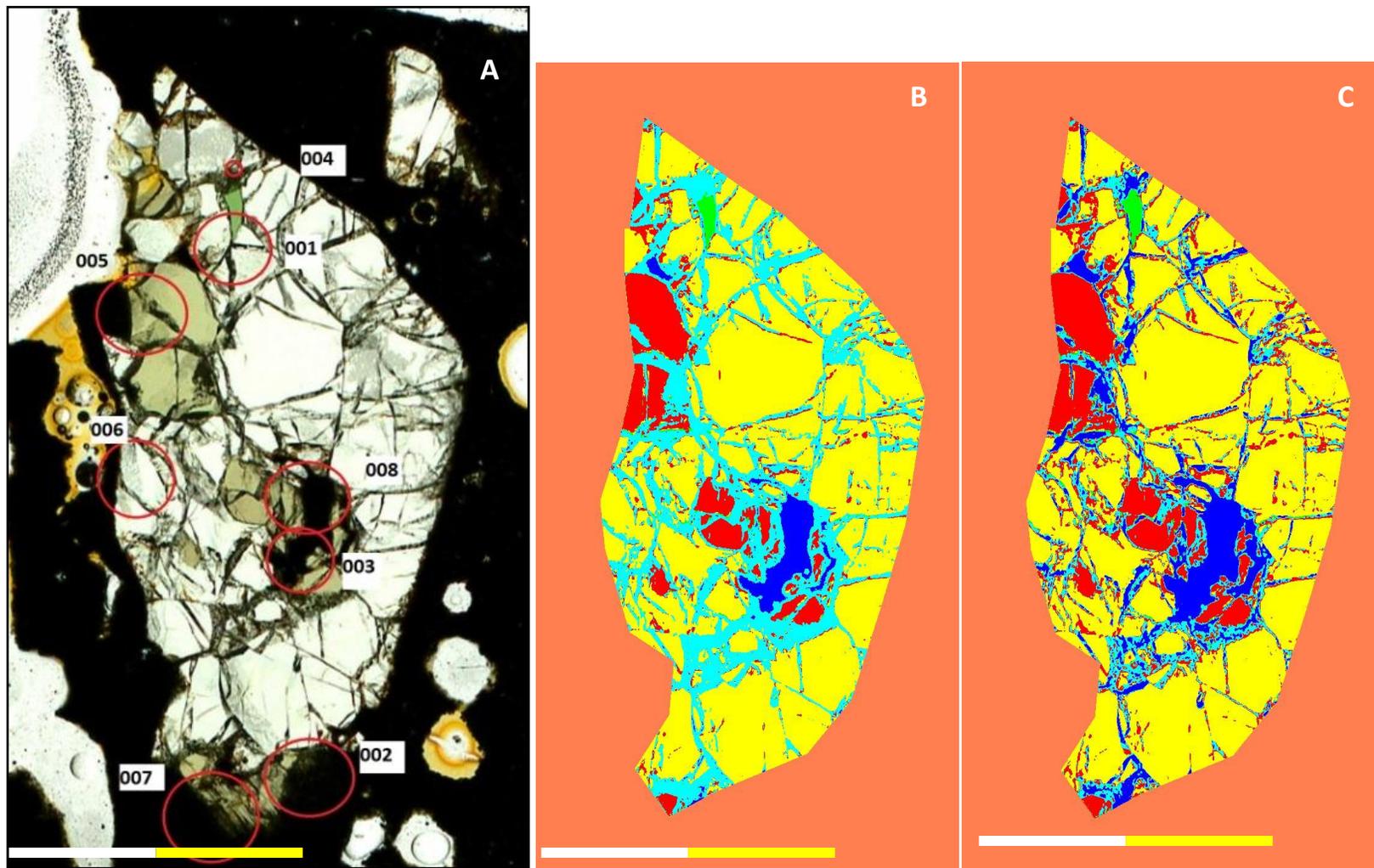


Figura Anexo 30: Barras de escala 0,25 cm (A) Imagen obtenida de Escáner Epson, muestra PM27B-10. (B) Resultado para SVM. (C) Resultado para NN.

PM27B-12A	
Nombre de Roca	Hazburgita de Sp
Texturas	Protogranular I
Descripción mineralógica	El Ol y Opx presentan tamaños uniformes y cercanos a 2mm, con excepción de un cristal de Ol de dimensiones 7 x 4 mm. Los Cpx presenta medidas cercanas a 0.5mm. La Sp se presentan con dimensiones cercanas a 1.5mm
Otros	Se aprecia infiltración del basalto en parte superior de trozo derecho de xenolito, con venillas de grosor hasta 0.2 mm. Se observa poca reacción en el xenolito, afectando principalmente a los bordes en contacto con la lava, donde se ve reaccionando a la Sp, Ol y el Opx, siendo este último el mayor afectado. Las Sp en la parte central se ven con poca reacción, los Cpx presentan <i>spongy rims</i> (Figura Anexo 31B,C).
Mineralogía accesoria	Existe una escasa presencia de sulfuros en la muestra, el mayor de 15 um corresponde a pirita en Ol.

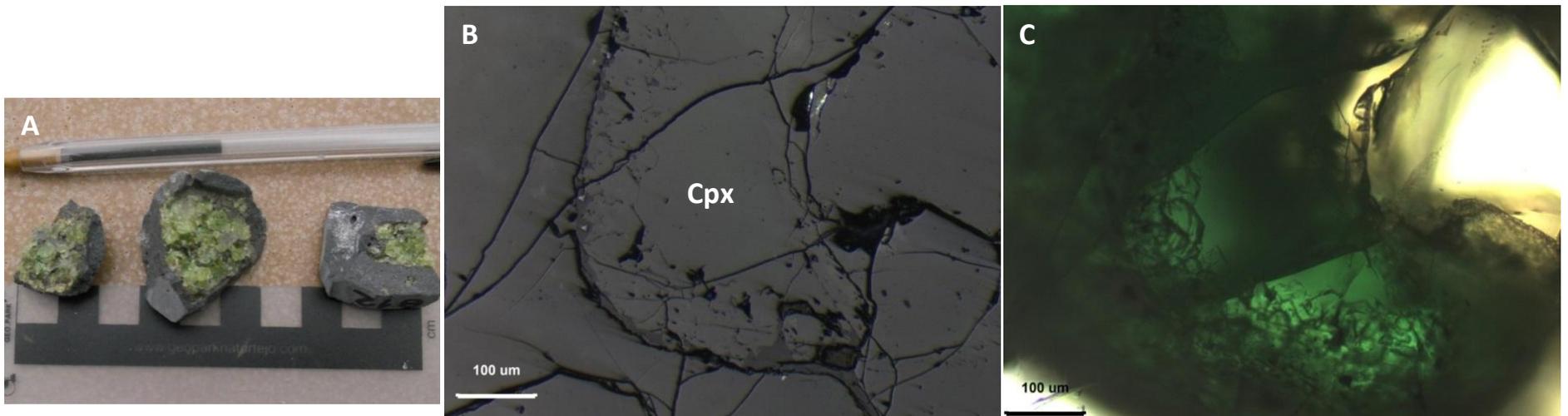


Figura Anexo 31: (A) Xenolito PM27B-12A en muestra de mano, barra de escala 1 cm. (B) Microfotografía obtenida a luz reflejada, *spongy rim* en Cpx. (C) luz transmitida, nicoles paralelos.

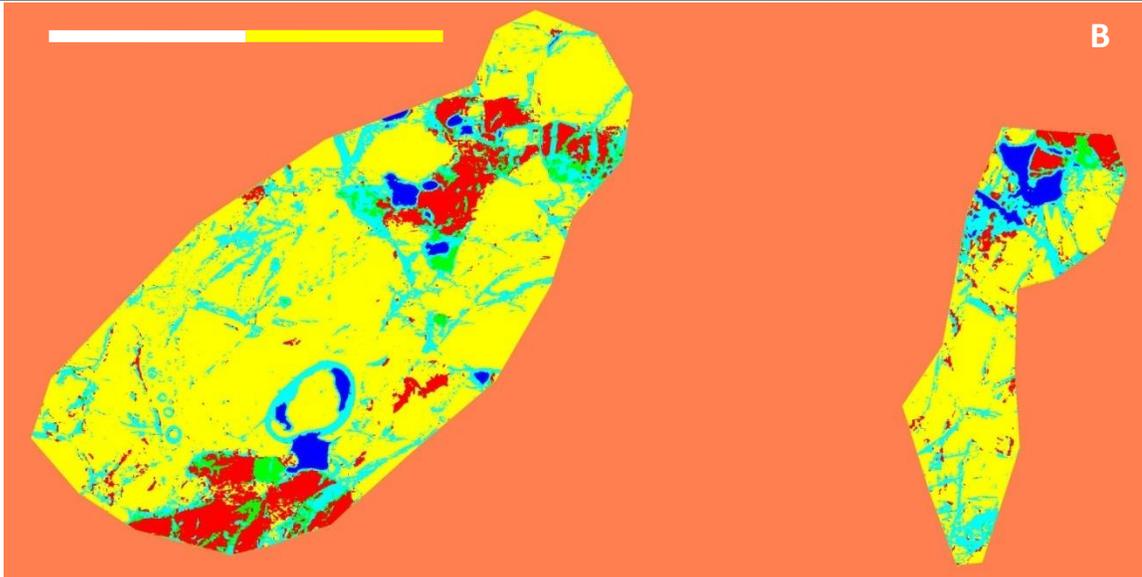
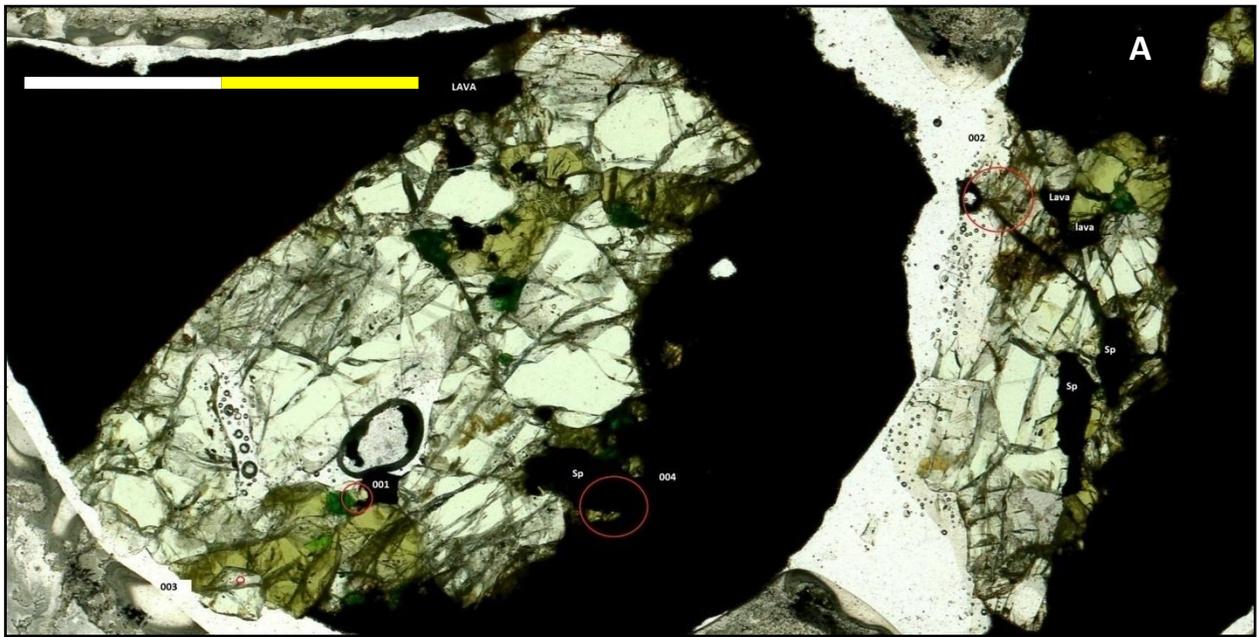


Figura Anexo 32: Barras de escala 0,5 cm (A) Imagen obtenida de Escáner Epson, muestra PM27B-12A. (B) Resultado para NN.

PM27B-12B	
Nombre de Roca	Lherzolita de Sp
Texturas	Protogranular I
Descripción mineralógica	El Olivino presenta medidas entre 1 y 3 mm, presentado la mayoría de los cristales medidas cercanas a 2mm. El Cpx presenta tamaños que varían entre 1 a 1.5 mm. El Opx, al igual que la Sp es escaso y de medidas cercanas a 1mm.
Otros	Se tienen dos trozos de xenolito en dos secciones transparentes distintas, PM27B-12B y PM27B-12B (a). Se observa en el corte PM27B-12B (a) infiltración de lava en la parte central y superior dentro del xenolito. El xenolito presenta poca reacción, afectando principalmente a los bordes en contacto con la lava, donde se ve reaccionando a la Sp, Ol y el Opx , siendo este último el mayor afectado. Las Sp en la parte central se ven con poca reacción. Los Cpx presentan <i>spongy rims</i> .(Figura Anexo 33B)
Mineralogía accesoria	Existe presencia de sulfuros, los que son de tamaños menores a 10 $\mu\text{m}$ . En sectores se encuentran pequeñas burbujas orientadas(Figura Anexo 33C).

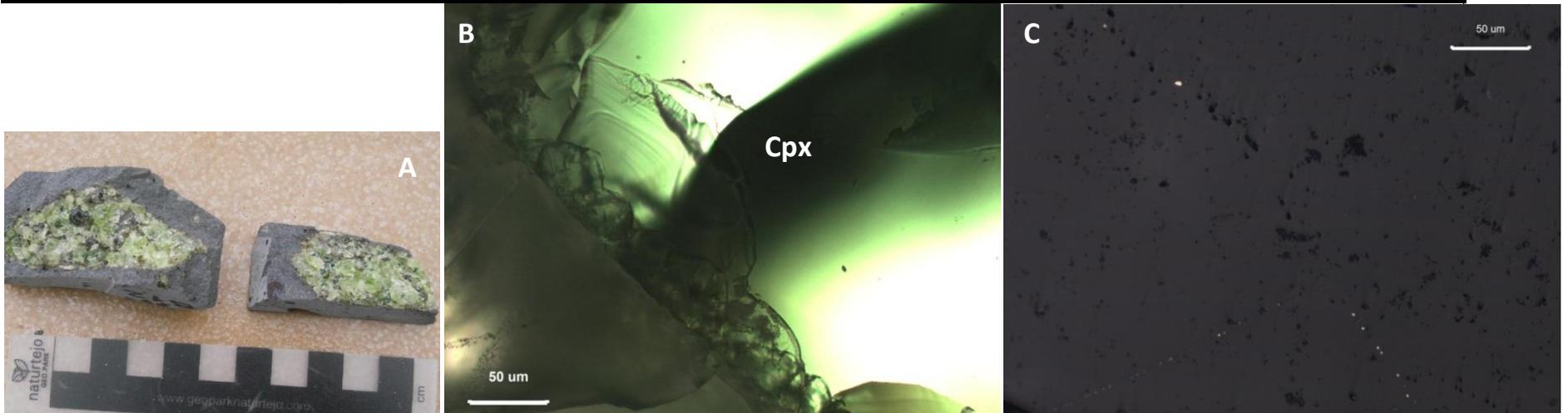


Figura Anexo 33: (A) Xenolito PM27B-12B en muestra de mano, barra de escala 1 cm. (B) Microfotografía obtenida a luz transmitida, nicoles paralelos. *Spongy rim* en Cpx. (C) Luz transmitida. Sulfuros orientados con forma de pequeñas burbujas

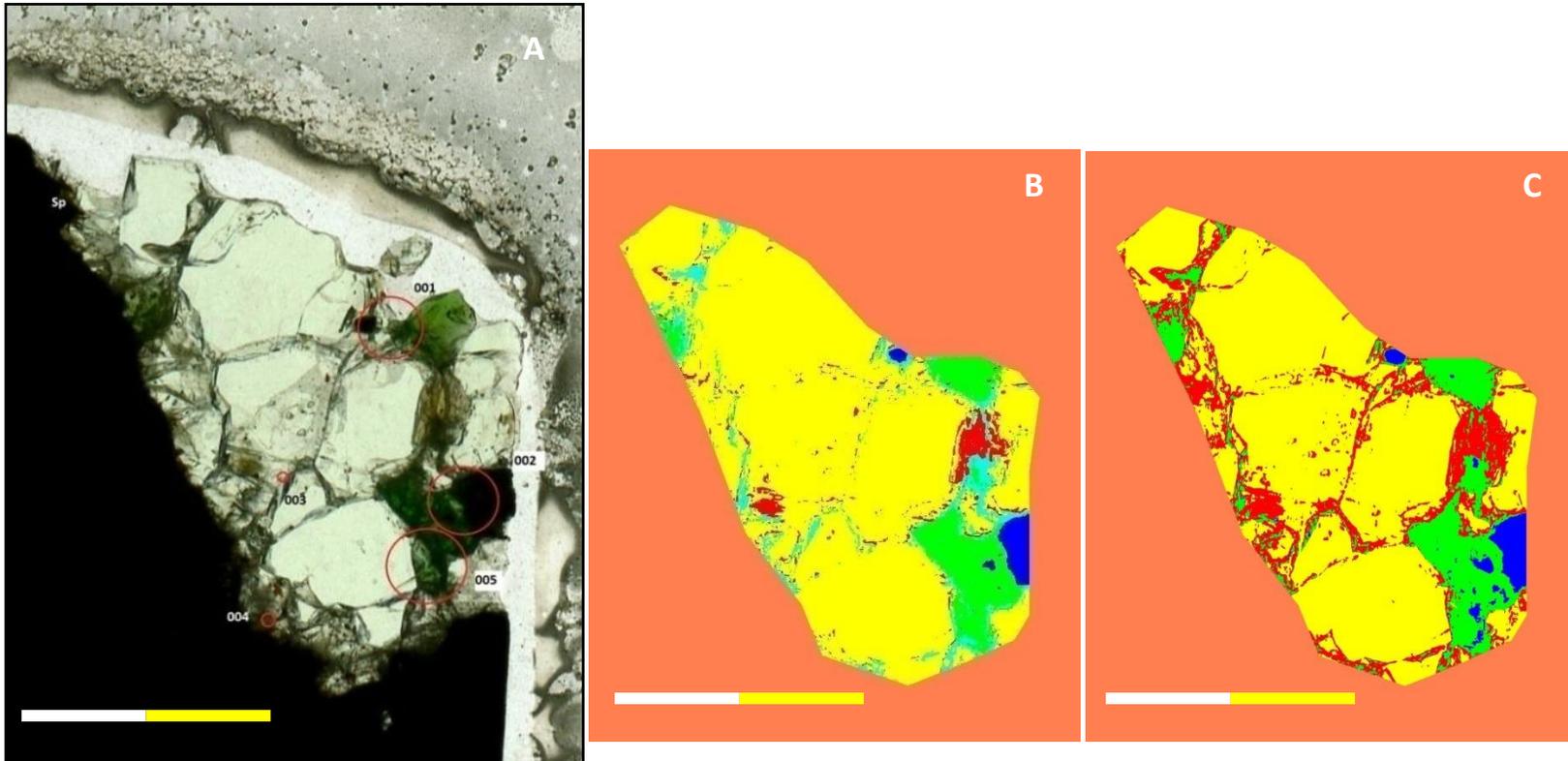


Figura Anexo 34: Barras de escala 0,25 cm (A) Imagen obtenida de Escáner Epson, muestra PM27B-12B. (B) Resultado para SVM. (C) Resultado para NN.

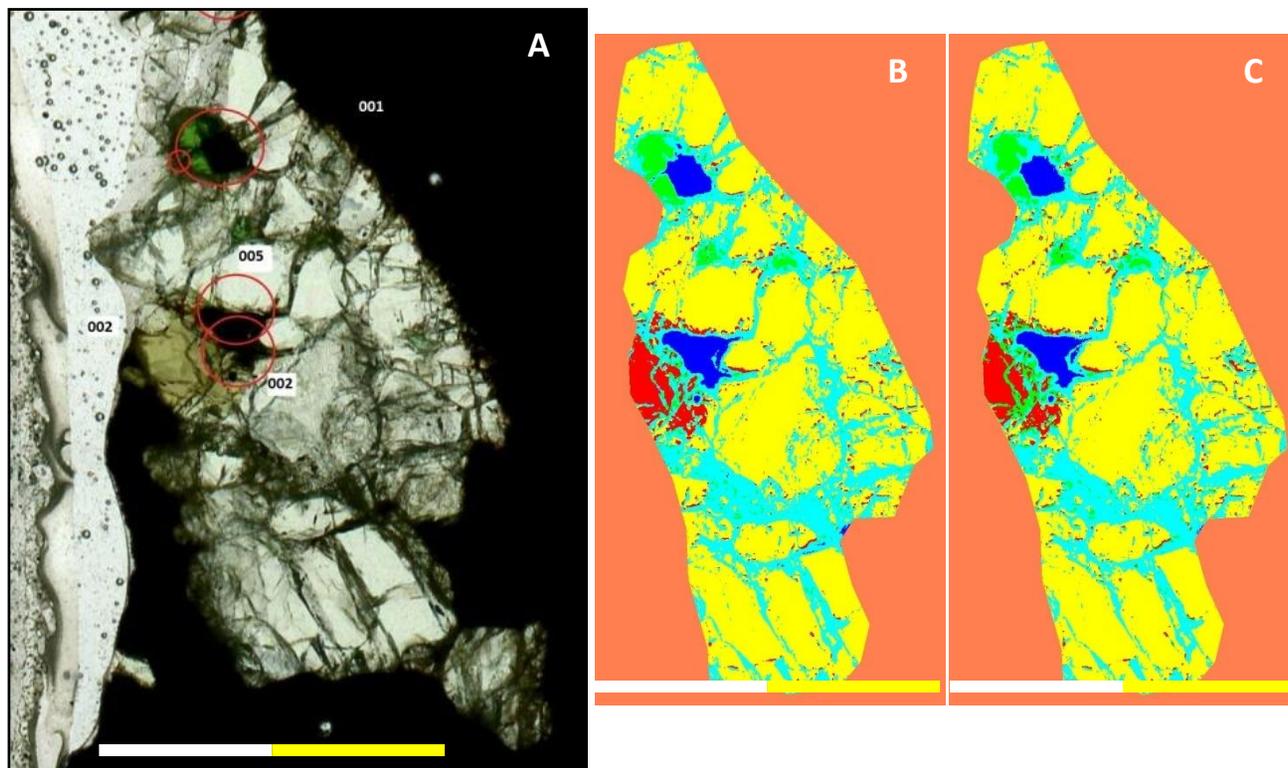


Figura Anexo 35: Barras de escala 0,25 cm (A) Imagen obtenida de Escáner Epson, muestra PM27B-12B(a). (B) Resultado para SVM. (C) Resultado para NN.

PM27B-16	
Nombre de Roca	Hazburgita de Sp
Texturas	Protogranular I
Descripción mineralógica	El Ol presenta dimensiones entre 1 a 5mm, midiendo el mayor cristal 5x5mm. La población más grande de cristales presenta medidas cercanas a los 2mm. Los Opx presentan medidas entre 1 a 4mm, con poblaciones centradas en valores cercanos a 2mm. El Cpx se distribuye uniformemente con medidas de 1mm, teniendo una excepción de medidas de 2x1.5mm. La Sp presenta tamaños distribuidos entre 1.5 y 2 mm.
Otros	Se presenta poca reacción en el xenolito, afectando principalmente a los bordes en contacto con la lava y en la zona inferior donde existe una venilla asociado a infiltración 1 mm de espesor. En éstas zonas se ve reaccionando a la Sp, Ol y el Opx, siendo el último el mayor afectado. Las Sp centrales se observan levemente reaccionando y los Cpx presentan <i>spongy rims</i> (Figura Anexo 36B,C).
Mineralogía accesoria	Existe presencia de sulfuros, siendo la mayoría de tamaños inferiores a 10 $\mu\text{m}$ . El mayor de 15 $\mu\text{m}$ corresponde a pirita en Ol. Se observan pequeñas burbujas de sulfuros orientadasmo.

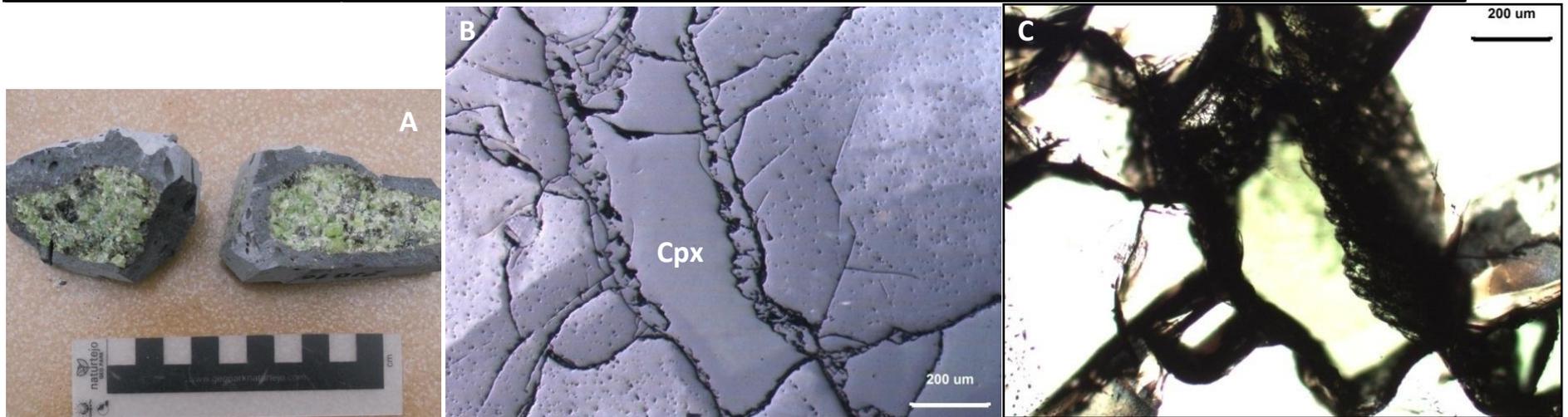


Figura Anexo 36: (A) Xenolito PM27B-16 en muestra de mano, barra de escala 1 cm. (B) Microfotografía obtenida a luz reflejada, *spongy rim* en Cpx. (C) Nícoles paralelos.

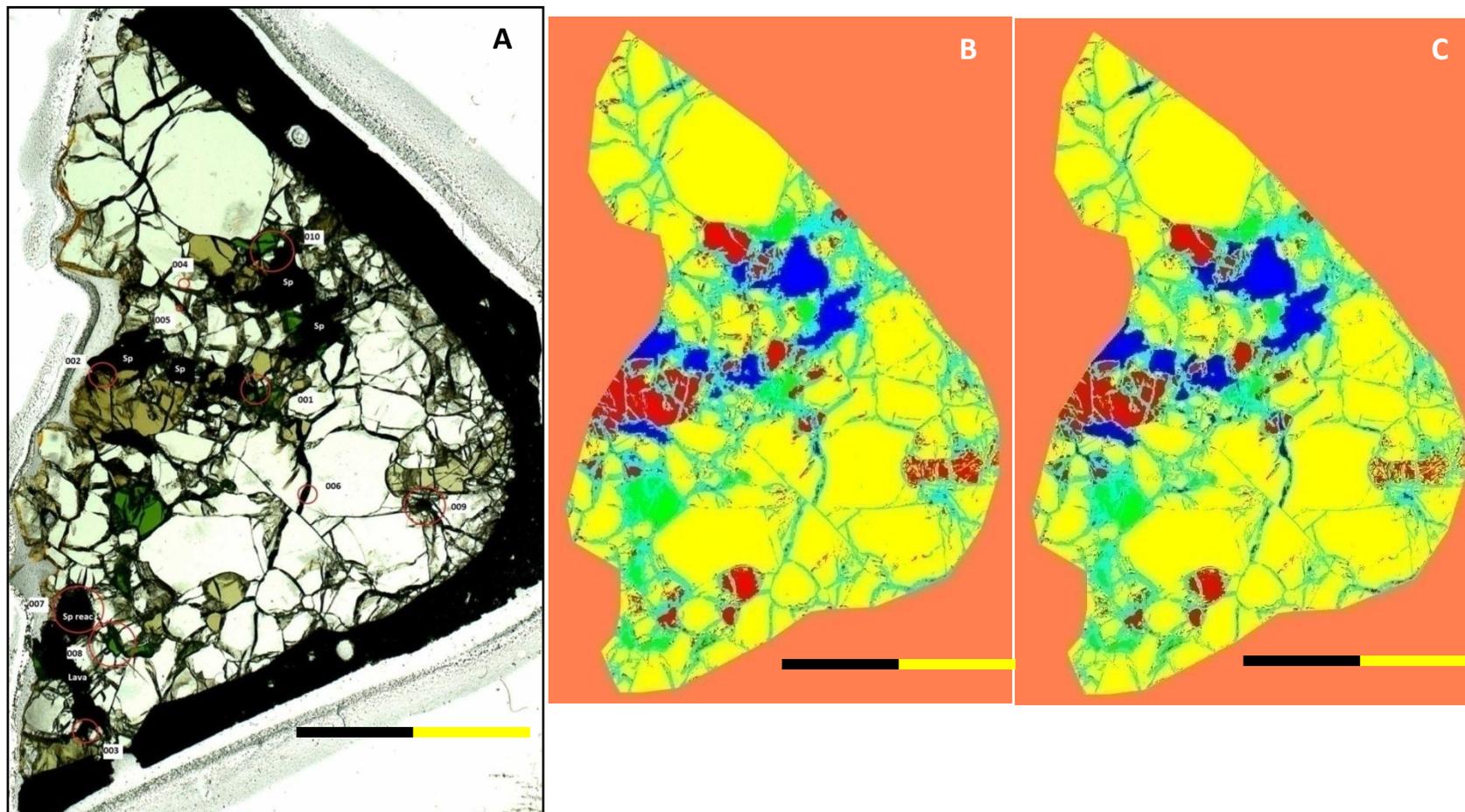


Figura Anexo 37: Barras de escala 0,5 cm (A) Imagen obtenida de Escáner Epson, muestra PM27B-16. (B) Resultado para SVM. (C) Resultado para NN.

PM27B-18	
Nombre de Roca	Lherzolita de Sp
Texturas	Protogranular l-leves indicios de porfiroclástica
Descripción mineralógica	El xenolito es bastante uniforme, los tamaños de todos los minerales son en promedio de 2mm.
Otros	Se presenta poca reacción en el xenolito, afectando principalmente a los bordes en contacto con la lava, donde se ve reaccionando a la Sp, Ol y el Opx, siendo este último el mayor afectado. Los Cpx presentan <i>spongy rims</i> .
Mineralogía accesoria	Existe abundante presencia de sulfuros, se observan dos mayores, los cuales alcanzan los 50 $\mu\text{m}$ y están compuestos por Pirrotina-Calcopirita en Ol y por Sulfuros de Ni-Co en Cpx(Figura Anexo 38 B,C). Se observan sulfuros alineados.

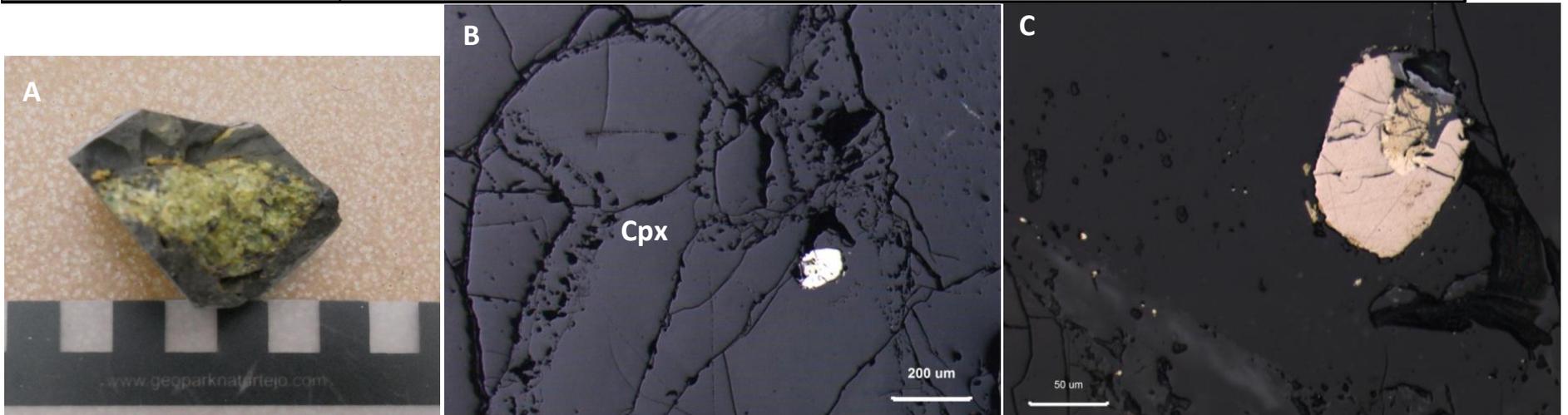


Figura Anexo 38: (A) Xenolito PM27B-18 en muestra de mano, barra de escala 1 cm. (B) Microfotografía obtenida a luz reflejada, sulfuro dentro de Cpx. (C) Mismo sulfuro con mayor aumento de imagen.

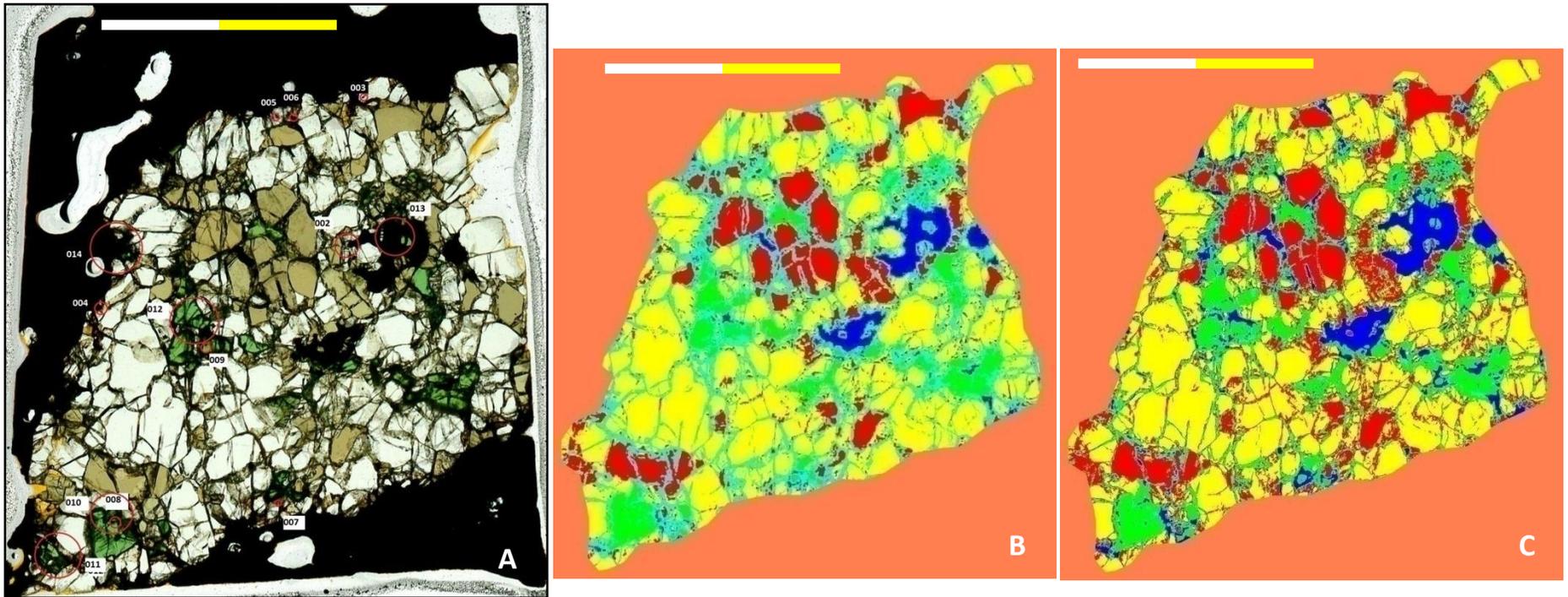


Figura Anexo 39: Barras de escala 0,5 cm (A) Imagen obtenida de Escáner Epson, muestra PM27B-18. (B) Resultado para SVM. (C) Resultado para NN.

PM27B-23	
Nombre de Roca	Lherzolita de Sp
Texturas	Protogranular I
Descripción mineralógica	El Opx presenta tamaños cercanos a los 3mm en la mayoría de sus cristales, midiendo el mayor 5x4mm. Los Ol miden entre 1 a 3mm, estando la mayor población concentrada en medidas cercanas al máximo. Los Cpx se encuentran concentrados en medidas cercanas a 1mm.
Otros	la parte inferior se encuentra al xenolito muy reducido. Se presenta reacción en el xenolito, afectando principalmente a los bordes en contacto con la lava, donde se ve reaccionando a la Sp, Ol y el Opx(Figura Anexo 40B), siendo este último el mayor afectado. Los Cpx presentan <i>spongy rims</i> . Un Opx presenta vetillas de exsolución dispuestas en el clivaje que probablemente correspondan a Cpx.
Mineralogía accesoria	Existe presencia de sulfuros, restringida principalmente al Opx de mayor tamaño en la parte superior del xenolito, los cuales no superan los 10 $\mu\text{m}$ . Se observan sulfuros alineados(Figura Anexo 40C).

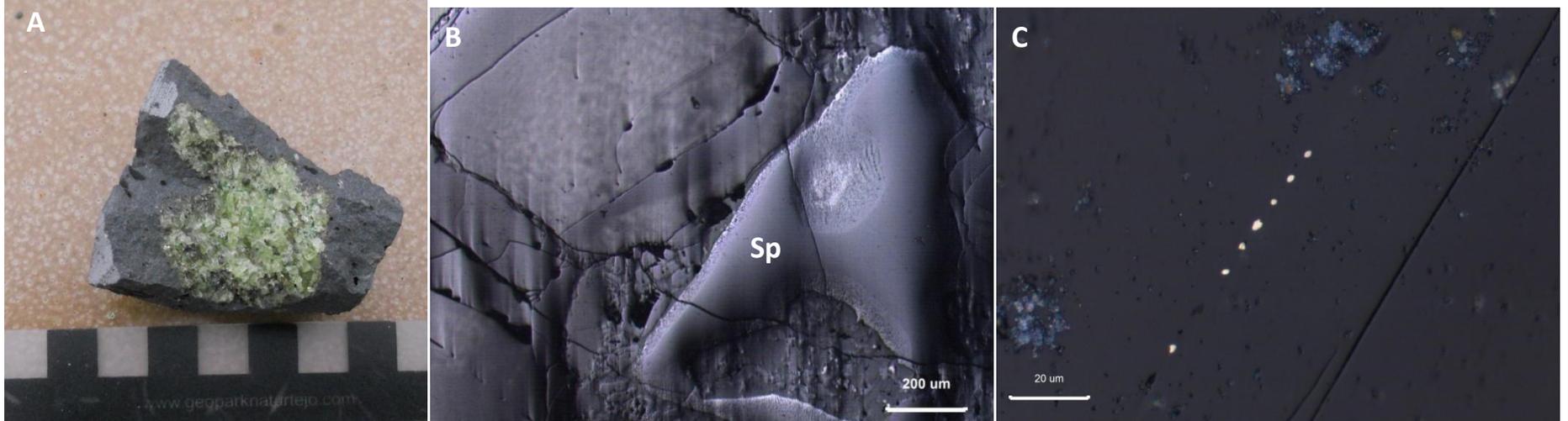


Figura Anexo 40: (A) Xenolito PM27B-23 en muestra de mano, barra de escala 1 cm. (B) Microfotografía obtenida a luz reflejada, Sp y Opx reaccionando. (C) Sulfuros alineados en forma de pequeñas burbujas.

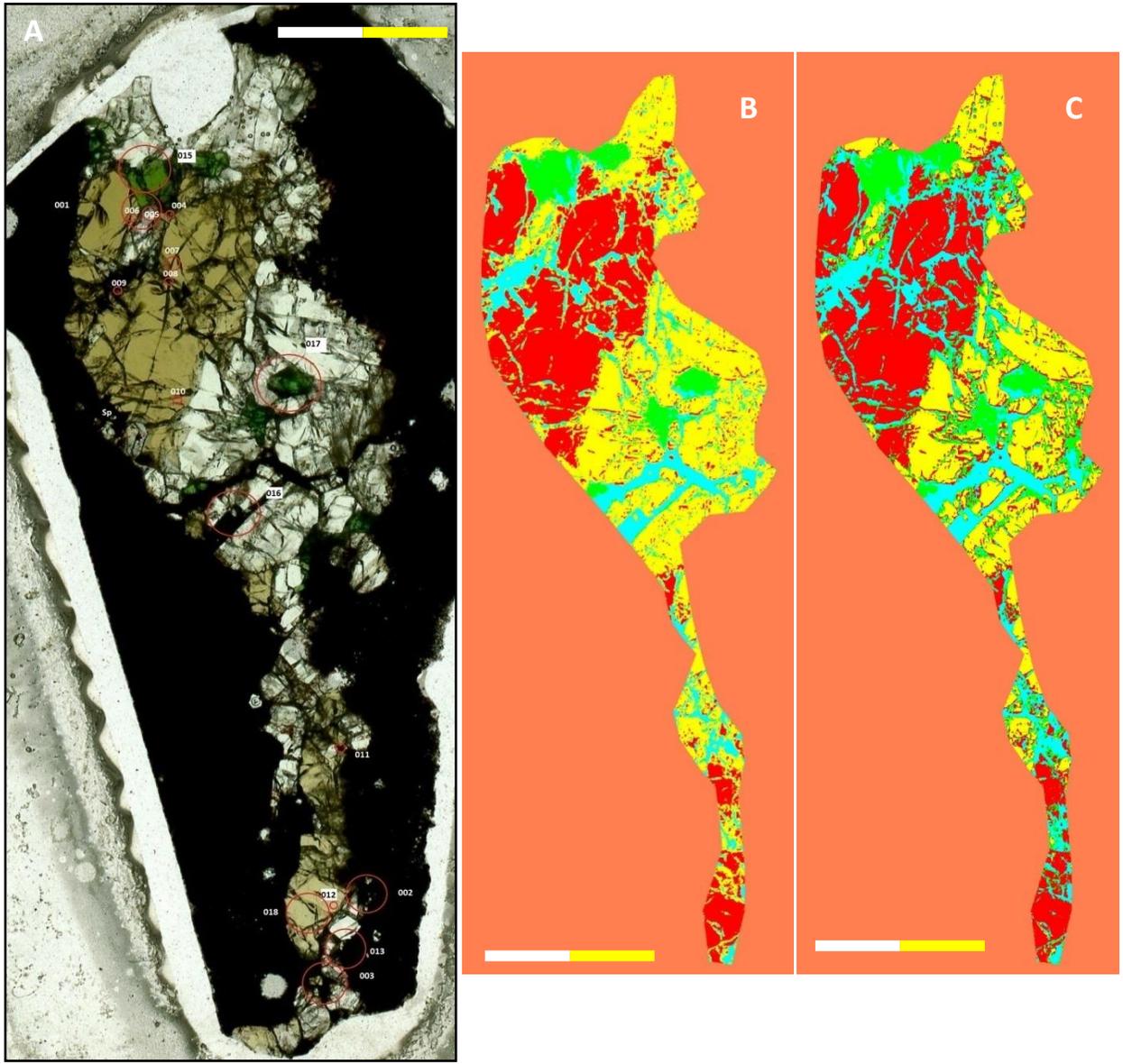


Figura Anexo 41: Barras de escala 0,25 cm (A) Imagen obtenida de Escáner Epson, muestra PM27B-23. (B) Resultado para SVM. (C) Resultado para NN.

PM27B-25	
Nombre de Roca	Hazburgita de Sp
Texturas	Protogranular I
Descripción mineralógica	El Opx presenta solamente 4 cristales, los cuales miden entre 1 a 4mm. Los Ol tiene medidas cercanas a los 2mm. El Cpx y la Sp presentan medidas cercanas al milímetro
Otros	Se tienen dos trozos de xenolito en dos secciones transparentes distintas, PM27B-25 y PM27B-25(A). El xenolito presenta poca reacción, afectando principalmente a los bordes en contacto con la lava, donde se ve reaccionando a la Sp, Ol y el Opx, siendo este último el mayor afectado. Las Sp en la parte central se ven con poca reacción, los Cpx presentan <i>spongy rims</i> (Figura Anexo 42 B).
Mineralogía accesoria	Existe presencia de sulfuros, encontrándose el mayor en el corte PM27B-25, de 40 $\mu\text{m}$ y corresponde a pirita en Opx (Figura Anexo 42C). Se observan sulfuros orientados.

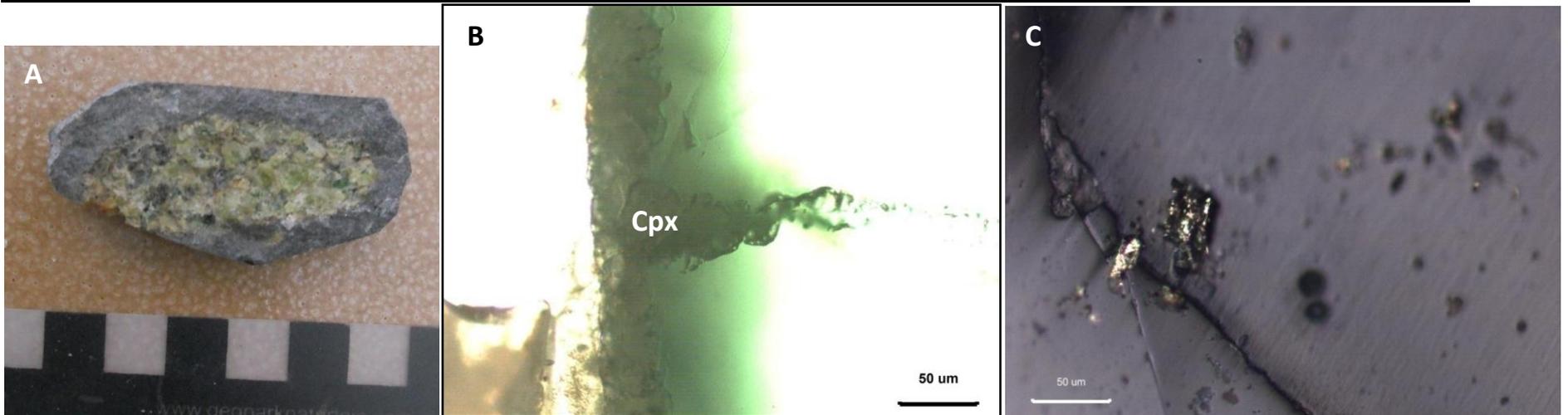


Figura Anexo 42: (A) Xenolito PM27B-25 en muestra de mano, barra de escala 1 cm. (B) Microfotografía obtenida a luz transmitida, nículos paralelos. *Spongy rim* en Cpx. (C) Luz reflejada. Pirita en Opx, la sección está mal pulida por lo que la pirita presenta mucho mayor relieve.

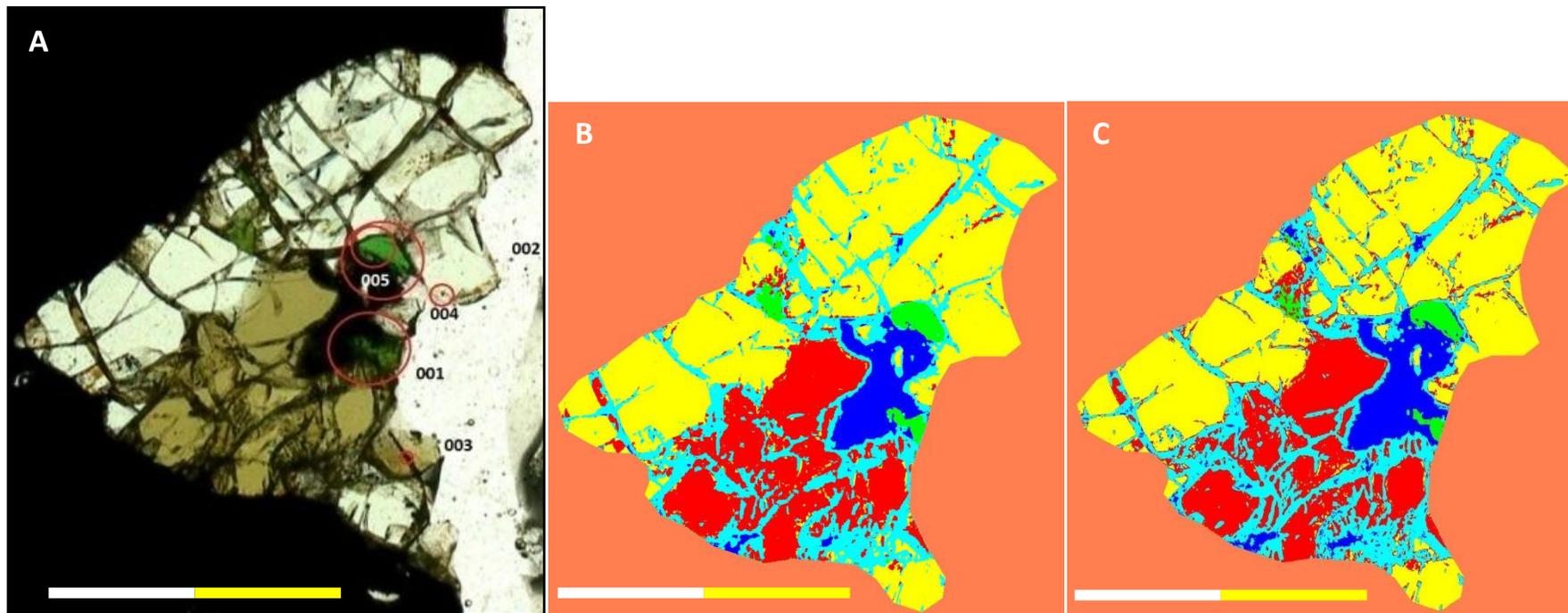


Figura Anexo 43: Barras de escala 0,25 cm (A) Imagen obtenida de Escáner Epson, muestra PM27B-25. (B) Resultado para SVM. (C) Resultado para NN.

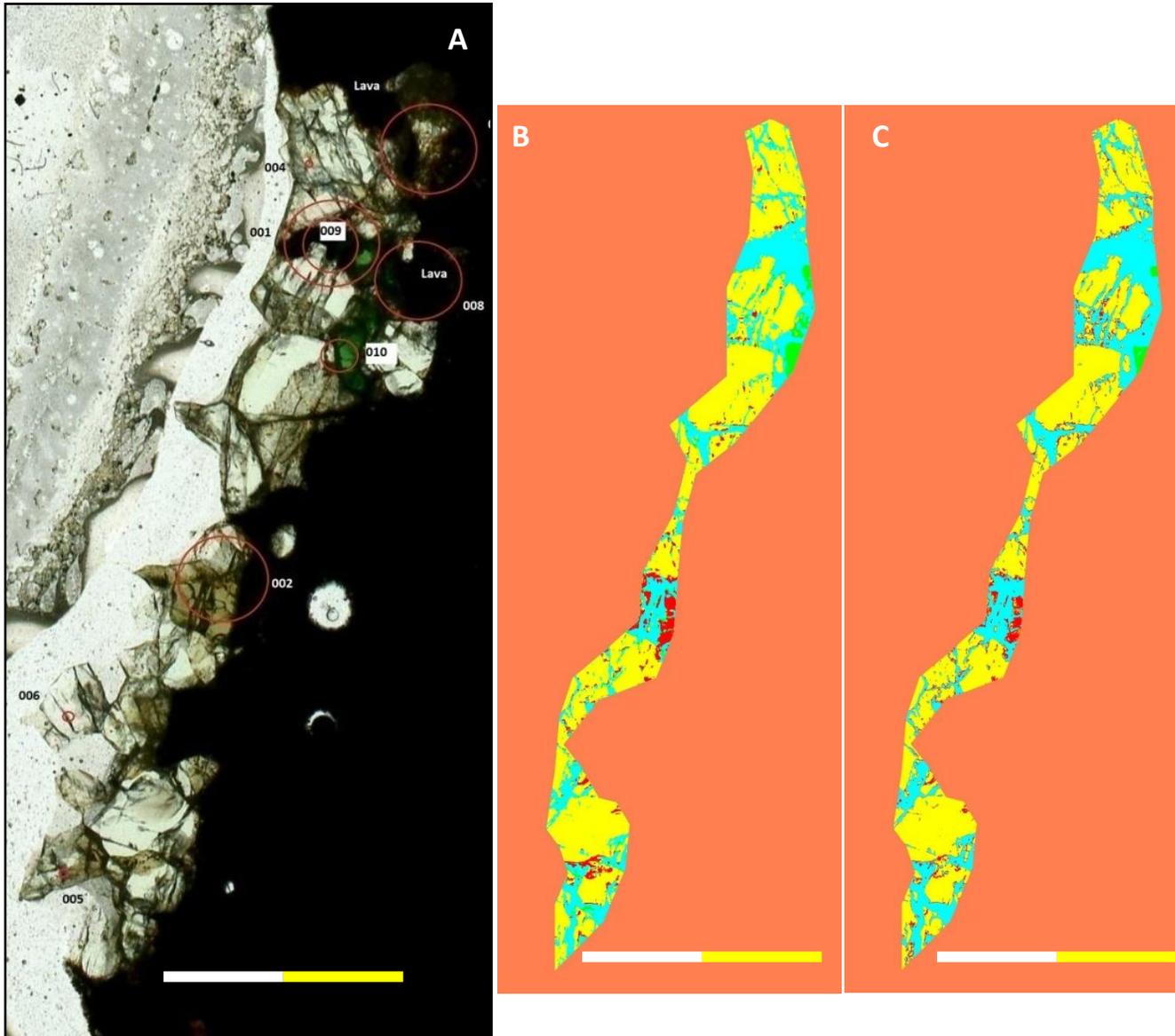


Figura Anexo 44: Barras de escala 0,25 cm (A) Imagen obtenida de Escáner Epson, muestra PM27B-25(A). (B) Resultado para SVM. (C) Resultado para NN.

PM27B-26	
Nombre de Roca	Lherzolita de Sp
Texturas	Protogranular I
Descripción mineralógica	El Opx y Ol presentan tamaños similares, con máximos de 4mm y con las mayores poblaciones concentradas cerca de 2mm. El Cpx y la Sp presentan tamaños similares, con tamaños máximos de 1.5 a 2mm y con las mayores poblaciones concentradas cerca del milímetro.
Otros	Se observa poca reacción en el xenolito, afectando principalmente a los bordes en contacto con la lava, donde se ve reaccionando fuertemente la Sp y Opx, el Ol se ve afectado de menor forma. En el centro del xenolito se observan espinelas y Cpx sin desequilibrios aparentes. En los Opx y Cpx se encuentran vetillas de exsolución que probablemente correspondan a Cpx y Opx respectivamente.
Mineralogía accesoria	El xenolito presenta sulfuros de tamaños inferiores a 10 $\mu\text{m}$ . Se observa uno de 20 $\mu\text{m}$ correspondiente a sulfuros de Ni y Co en Ol. En ocasiones se observan pequeños sulfuros alineados.

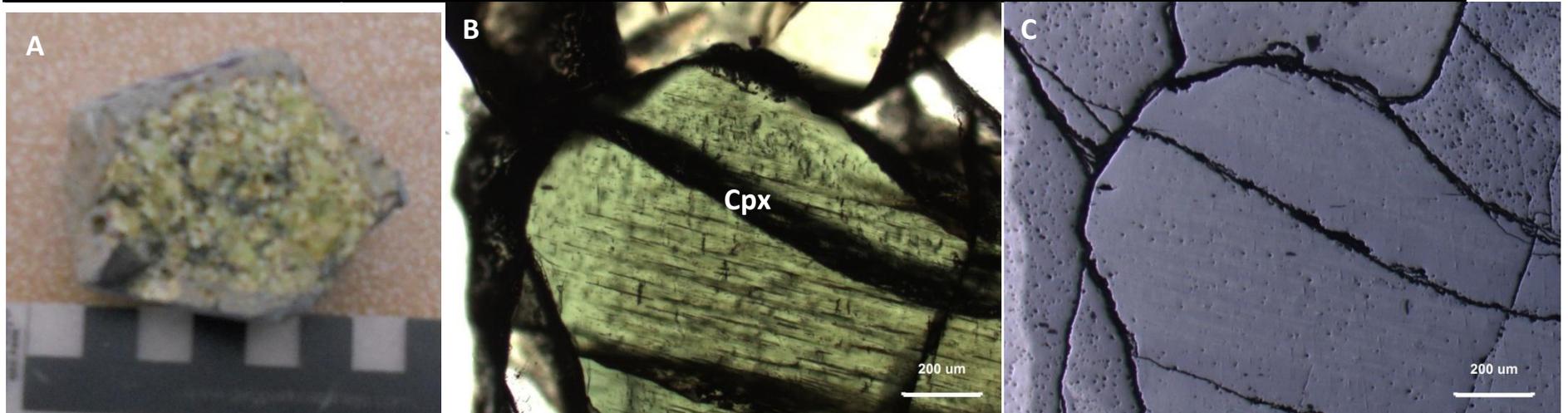


Figura Anexo 45: (A) Xenolito PM27B-26 en muestra de mano, barra de escala 1 cm. (B) Microfotografía obtenida a luz transmitida, nícoles paralelos. Cpx mostrando exsolución. (C) Luz reflejada. Mismo sector que el anterior, Cpx no presenta *spongy rims*.

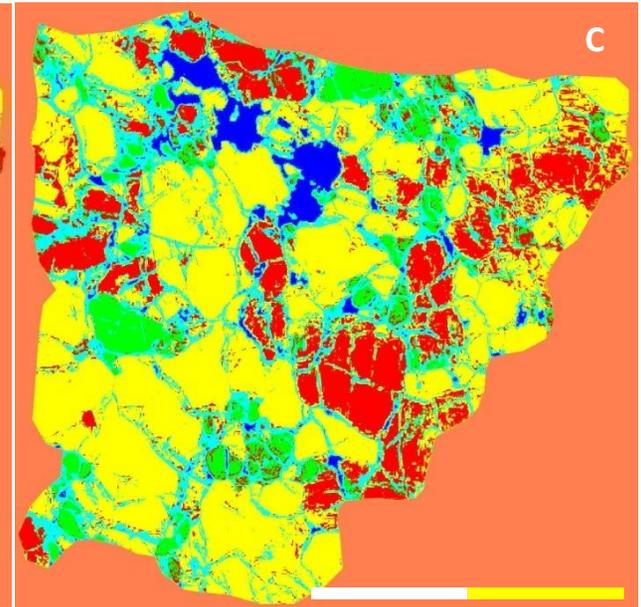
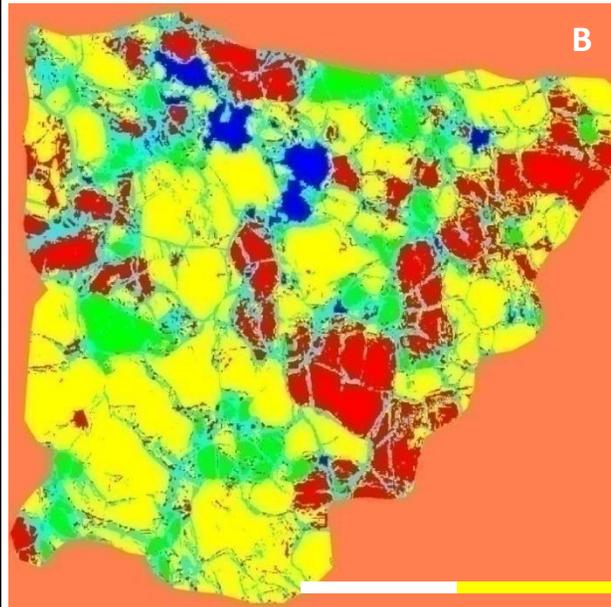


Figura Anexo 46: Barras de escala 0,5 cm (A) Imagen obtenida de Escáner Epson, muestra PM27B-26. (B) Resultado para SVM. (C) Resultado para NN.

