



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA**  
**INSTITUTO DE GEOLOGÍA**

**MODELADO TERMODINÁMICO: PSEUDOSECCIONES DE LAS ROCAS DE ALTA  
PRESIÓN DEL ENSAMBLE PIAXTLA EN EL COMPLEJO ACATLÁN, SUR DE MÉXICO.**

## **TESIS**

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRA EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**PRESENTA :**

**ATHZIRI HERNANDEZ JIMENEZ**

**TUTOR DE TESIS:**

**DR. MARIO ALFREDO RAMOS ARIAS**

**CIUDAD DE MEXICO, 2023**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



A todos los seres que me quieren  
Por darme todo el amor para seguir en pie.



# Agradecimientos

*Como siempre el iniciar cualquier cosa y aún más algo escrito nos lleva un par de titubeos. Nunca me es fácil expresarme por escrito (ni hablando XD). Lo cierto es que una vez que comenzamos, la inspiración no siempre llega, borrar, escribir, reescribir y así unas cuantas veces. En fin, el punto de este apartado es agradecer las cosas buenas y las no tan buenas que sucedieron para que lograra iniciar y por supuesto terminar este trabajo.*

*Este capítulo de mi vida ha sido quizá por mucho de los más difíciles y no por haber elegido un posgrado en el que tuve que aprender muchas cosas nuevas, escasas fueron las que ya conocía, ese fue el primer reto, de ahí vendrían otros más, algunos que nada tendrían que ver con la academia, pero, que afectaron de manera significativa a mi trabajo académico. Quizá se pregunten y eso que tiene que ver con la tesis, pues mucho.*

*La primera versión de este trabajo estaba terminada cuando la vida decidió mandarme otro reto, y ese suceso lo llame "la ruptura continental de mi persona", y evidentemente eso aplicó a todos los aspectos de mi vida, uno cree saber todo y entender todo, y lo cierto es que no siempre es así, aprendes mucho en situaciones de días nublados.*

*A pesar de que mi trabajo no era malo tenía muchas cosas que mejorar, y aunado a eso tenía ahora otras cosas que mejorar en mí, físicamente y emocionalmente. Mi cuerpo dejó de funcionar correctamente y así ni las ganas de terminar las correcciones fueron lo suficientemente fuertes como para obligarlo a moverse y como todo tiene consecuencias, llegaron con todo y efectos secundarios.*

*El Tabú de siempre, ¿quién habla de la salud mental?, mi efecto secundario se llama así: "ganas nulas de...", las ganas nulas de hacer cosas, las ganas nulas de despertar, las ganas nulas de hablar y así infinitas cosas. Y bueno, las ganas nulas de hacer correcciones y concluir la tesis y la maestría estaban ahí. Y sí, ya sé que ya me extendí, pero el objetivo aquí es agradecer, y a eso voy, durante todo este proceso de concluir este trabajo estuvo involucrada mi salud física y mental, seguro a más de uno le ha pasado, de distintas maneras, pero no por eso es invisible. Es aún mayor mi agradecimiento a todos aquellos que no dejaron de confiar ni de apoyarme antes ni después de la ruptura.*

*En especial agradezco a mis padres, sin ellos es muy posible que ahorita estuviera en otra dimensión (quizá). Desde el inicio, a todo siempre me han alentado a seguir y jamás han coartado mis ideas ni mis sueños, por más descabellados y poco viables que*

#### IV

*sean. Y todas las veces que he llegado a errar siempre han extendido los brazos para ayudarme a retomar.*

*A mi hermano que nunca dejó de escucharme y, que a pesar de ser yo una pesada, jamás dejó de regalarme palabras llenas de comprensión y camaradería. ¡Eres el mejor bro!*

*A Javier (Javis) que nunca de los nunca dejó de confiar en que lo lograría (terminar la tesis), y mi mano nunca se quedó sin su mano, siempre estuvo ahí, incluso en los momentos más oscuros y complicados. La verdad sí le agradezco mucho, fui insoportable y nunca dejó de soportarme, cuándo dude de mí él jamás lo hizo. No sólo es mi amigo, es mi confidente, compañero de vida y un pilar para mí. Además, me ayudó muchas veces en leer, en sugerir y orientarme en muchas dudas que llegué a tener durante la realización de esta tesis.*

*Un agradecimiento muy especial para mi tutor, Mario, por la paciencia y el temple que tuvo conmigo todo este tiempo. Seguro no fue fácil ser mi tutor, sin ser geóloga me acogió y me enseñó mucho de lo que hoy sé. En la distancia, siguió estando pendiente de mí y jamás me dejó morir sola, siempre dispuesto a esclarecer cualquier duda y, durante la ruptura, comprendiendo la situación particular, siempre dándome palabras de aliento para no abandonar el proyecto, por eso y más le agradezco.*

*Seré sincera, antes de caminar lo caminado, no me tomé a bien las correcciones realizadas por los sinodales (Dra Vanessa Colas, Dr. Mariano Elías, Dr. Pedro Corona y Dr. Bodo Weber). Sin embargo, unos pasos más adelante me di cuenta de la riqueza de ellos, gracias a cada uno de ellos, por sus muy acertados comentarios que enriquecieron bastante mi trabajo de tesis. En retrospectiva, ahora me gusta la versión final del escrito, obvio, me hubiera gustado hacer más, pero siempre es bueno poner límites y es un buen final, al mismo tiempo puede ser un inicio para lo que sea.*

*Y sin olvidar agradezco a mis compañeros de cubículo (el mercado) y mis compañeros de maestría que hicieron los días gratos con muchas risas, por los cafés compartidos, por la retroalimentación, esas noches de estudio, la camaradería y las buenas amistades que aún hoy en día siguen en pie, fuertes como rocas. Mis más sinceras gracias a Isela, el Ing. Moon (Carlos), Urenia, Carlos (Jaramillo), el Ing. Cabrera (Miguel), Roger, Cesar, Mildred, Rodrigo, Brenda, Alexia, Chucho (Jesús), Dani (Daniel), etc.*

*Y no tengo más que agradecer que a la vida misma (ja pesar de todo!) y a mí misma, por dejar de ser tan dura conmigo (aún lo sigo siendo, pero ya menos), por dejarme ayudar y no darme por vencida, y aunque hubo muchos momentos en lo que sí quería, no dejé de enfrentar todos aquellos pensamientos autodestructivos y nocivos que me impedían seguir. Seguí, y por fin puedo decir que concluí con esta etapa tan bonita y tan dura que fue la maestría y el terminar la tesis.*

*Y como dicen, no hay que echar en saco roto lo que la vida "nos regala", o nos obliga a aceptar. Si la vida te da limones... Los dichos clichés, pero es verdad, como la ardilla*

*con mazo<sup>1</sup>: haré lo que pueda con lo que tenga. De eso va, tomar las oportunidades, incluso en la oscuridad habrá quien te alumbre, aunque muchas veces esa persona eres tú, ni el todo ni la nada es para siempre.*

*Hasta aquí termino, quizá con un poco de teatralidad, exageración o con cualquier otro adjetivo, lo cierto es que todo lo que aquí escribo de manera muy personal es mío y es compartido con todo aquel que lo ha querido leer.*

---

<sup>1</sup>Escanea el código:



# Resumen

El Ensamble Piaxtla es considerado el basamento del Complejo Acatlán, ubicado en el sur de México, sus edades de los protolitos y su metamorfismo se distribuyen en el Paleozoico. El Ensamble consiste en cinturones metamórficos polideformados en distintos grados metamórficos, pero que destaca por asociaciones minerales en facies de eclogita y esquistos azules.

En este trabajo con la modelación de pseudosecciones se estimaron los picos metamórficos para las eclogitas, además de explorar las condiciones  $P$ - $T$  de re-equilibrio obtenido durante la retrogresión hacia condiciones de facies de anfibolita y esquistos azules, condiciones que culminan hasta las facies de esquistos verdes.

Se construyeron 22 pseudosecciones basadas en las composiciones de roca total y roca efectiva, en los sistemas químicos  $MnNCFMAST$  para las eclogitas y  $MnNCFKMASHT$  para los esquistos azules y anfibolitas.

Con base en la observación petrográfica y en las pseudosecciones se dedujeron al menos tres eventos de evolución metamórfica:

Un primer evento en donde las rocas máficas experimentaron un evento metamórfico a alta presión y temperatura en facies de eclogita, infiriendo un pico metamórfico marcado por la paragénesis  $Grt + Omp \pm Qz + Rt \pm Ttn$ , situado en condiciones máximas de  $\sim 22$  kbar y  $\sim 710.4$  °C. Estos datos son consistentes con los resultados obtenidos con el termómetro de  $Zr$  en rutilo y con el geotermómetro de Nakamura (2009).

Un segundo evento está marcado por el inicio de la exhumación/extrusión con dos posibles trayectorias de extrusión con distintos grados de retrogresión:

i) Trayectoria de facies de eclogita a anfibolita. Anfibolitas caracterizadas por una paragénesis constituida por  $Amp + Grt + \pm Ep \pm Pl \pm Ph \pm Chl \pm Qz$ , con condiciones  $P - T$  de  $\sim 10$ - $14$  kbar y  $\sim 450$ - $550$  °C obtenidos de las pseudosecciones. Se considera una etapa descompresiva e hidratada.

ii) Transición de facies de eclogita a esquistos azules, inferida por la observación de las texturas relictas de pseudomorfo de granate en equilibrio con  $Gln + Amp + Ep$ . Además, la paragénesis representativa de los esquistos azules es  $Gln + Ep + Chl + Ph \pm Amp$  ( $Ca, Ca - Na$ )  $\pm Pl \pm Qz$  cuyas estimaciones están dentro de los rangos de  $\sim 13.8$ - $16.5$  kbar y  $\sim 450$ - $580$  °C.

En tercer evento está caracterizado por un metamorfismo retrógrado, presente en la anfibolitas y esquistos azules, representado por la aparición de minerales de *Act+Chl+Ms* típicos de facies de esquistos verde.

En conjunto, estos datos sugieren que las eclogitas tuvieron dos caminos de retrogresión con distintos estadios metamórficos, asociados con la variación de parámetros como la temperatura y la presión durante su trayecto dentro del canal de subducción. En este contexto, una parte de las rocas en facies de eclogitas primero sufrieron una disminución de presión y posteriormente de temperatura originando anfibolitas. Mientras que otra parte de las rocas en facies de eclogitas experimentaron disminución de temperatura y después descompresión resultando en esquistos azules.

Estas condiciones *P-T* son coherentes con la estructura descrita en el Ensamble Piaxtla que exhibe una disposición que corresponde a un canal de subducción, con el que se explica la petrogénesis y exhumación de las rocas máficas de alta presión del Ensamble Piaxtla.

# Abstract

The Piaxtla Suite is considered the basement of the Acatlán Complex, located in southern Mexico, its ages of the protoliths and its metamorphism are distributed in the Paleozoic. The Suite consists of polydeformed metamorphic belts in different metamorphic grades, but which stands out for mineral associations in eclogite and blue schist facies.

In this work, with the modeling of pseudosections, the metamorphic peaks for the eclogites were estimated, in addition to exploring the equilibrium  $P - T$  conditions obtained during the retrogression towards amphibolite and blueschist facies conditions, conditions that culminate in the greenschist facies.

Twenty-two pseudosections were built based on the bulk rock composition and effective rock composition, in the chemical systems  $MnNCFMAST$  for eclogites, and  $MnNCFKMASHT$  for blueschists and amphibolites.

Based on the petrographic observation and the pseudosections, at least three events of metamorphic evolution were deduced:

A first event where the mafic rocks underwent a metamorphic event at high pressure and temperature in eclogite facies, inferring a metamorphic peak, marked by the assemblage  $Grt + Omp \pm Qz + Rt \pm Ttn$ , located in maximum conditions of  $\sim 22$  kbar and  $\sim 710.4$  °C. These data are consistent with the results obtained with the Zr-in-rutile thermometer and the Nakamura (2009) geothermometer.

A second event is marked by the start of exhumation/extrusion, with two possible extrusion trajectories with different degrees of retrogression:

i) Trajectory from eclogite facies to amphibolite facies. Amphibolites characterized by a mineral assemblage of  $Amp + Grt + \pm Ep \pm Pl \pm Ph \pm Chl \pm Qz$ , with  $P - T$  conditions of  $\sim 10-14$  kbar and  $\sim 450-550$  °C obtained from the pseudosections. It is considered a decompressive and hydrated stage.

ii) Transition from eclogite facies to blueschist facies, inferred by observing the relict textures of garnet pseudomorphs in equilibrium with  $Gln + Amp + Ep$ . Furthermore, the representative blueschist mineral assemblage is  $Gln + Ep + Chl + Ph \pm Amp$  ( $Ca, Ca - Na$ )  $\pm Pl \pm Qz$  whose estimates are within the range of  $\sim 13.8-16.5$  kbar and  $\sim 450-580$  °C.

The third event is characterized by retrograde metamorphism, present in amphibolite facies.

lites and blueschists, represented by the appearance of  $Act + Chl + Ms$  minerals typical of greenschist facies.

Taken together, the data suggest that the eclogites had two retrogression paths with different metamorphic stages, associated with the variation of parameters such as temperature and pressure during the trajectory of eclogites within the subduction channel. In this context, a part of the eclogite facies rocks first suffered a decrease in pressure and later a decrease in temperature, originating amphibolites. While another part of the rocks in eclogite facies experienced a decrease in temperature and then decompression, resulting in blue schists.

These  $P - T$  conditions are consistent with the structure described in the Piaxtla Suite, which exhibits a layout that corresponds to a subduction channel, which explains the petrogenesis and exhumation of the high-pressure rocks of the Piaxtla Suite.

# Índice general

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
1.1	Marco geológico para el Ensamble Piaxtla . . . . .	2
1.2	Problemática, justificación, hipótesis y objetivos . . . . .	8
1.2.1	Justificación . . . . .	9
1.2.2	Hipótesis . . . . .	10
1.2.3	Objetivos . . . . .	10
1.3	Metodología . . . . .	11
1.3.1	Revisión bibliográfica . . . . .	11
1.3.2	Trabajo de Campo . . . . .	11
1.3.3	Técnicas Analíticas . . . . .	13
1.3.3.1	Análisis petrográfico . . . . .	13
1.3.3.2	Análisis por microsonda electrónica de barrido (EPMA)	13
1.3.3.3	Análisis por Fluorescencia de Rayos-X . . . . .	14
1.3.3.4	Calculo de diagramas de fase (Pseudosecciones con Perple_X)	14
1.3.3.5	Cálculos termobarométricos . . . . .	16
<b>2</b>	<b>Marco teórico</b>	<b>18</b>
2.1	Reacciones metamórficas de rocas de alta presión y baja temperatura en ambientes de subducción . . . . .	18
2.2	Conceptos termodinámicos . . . . .	22
2.3	Reacciones metamórficas en condiciones de alta presión y baja temperatura	23
2.3.1	Facies de Eclogita . . . . .	24
2.3.2	Facies de Anfibolita . . . . .	25
2.3.3	Facies de Esquisto azul . . . . .	27
2.4	Retrogresión: Reacciones metamórficas de Eclogitas a Esquisto Azul y Eclogita a Anfibolita . . . . .	27
<b>3</b>	<b>Petrografía</b>	<b>31</b>
3.1	Ixcamilpa . . . . .	31
3.2	Piaxtla-Tecomatlán . . . . .	34
3.3	San Francisco de Asís (Asís) . . . . .	35



<i>ÍNDICE GENERAL</i>	XI
3.4 Mimilulco . . . . .	37
<b>4 Geoquímica de roca total y mineral</b>	<b>40</b>
4.1 Elementos mayores roca total . . . . .	40
4.2 Química mineral . . . . .	43
4.2.1 Granates . . . . .	43
4.2.2 Piroxenos . . . . .	47
4.2.3 Anfíboles . . . . .	48
4.2.4 Plagioclasa . . . . .	50
4.2.5 Epidotas . . . . .	50
4.2.6 Micas . . . . .	50
4.2.6.1 Cloritas . . . . .	51
4.2.7 Rutilo, titanita e ilmenita . . . . .	51
<b>5 Modelado petrológico: Pseudosecciones para el Ensamble Piaxtla</b>	<b>54</b>
5.1 Construcción de Pseudosecciones . . . . .	55
5.1.1 Pseudosecciones de Eclogitas . . . . .	58
5.1.2 Pseudosecciones de Anfibolitas . . . . .	67
5.1.3 Pseudosecciones de Esquistos azules . . . . .	74
<b>6 Discusión y Conclusiones</b>	<b>80</b>
6.1 Retrogresión en el cinturón de alta presión en el Ensamble Piaxtla . . . .	80
6.1.1 Trayectoria Eclogita-Esquisto azul-Esquisto verde . . . . .	81
6.1.2 Trayectoria Eclogita-Afibolita-Esquisto verde . . . . .	83
6.1.3 Trayectorias de retrogresión metamórficas para las rocas de alta presión el Ensamble Piaxtla . . . . .	84
6.2 Tasas de exhumación para las rocas de alta presión del Ensamble Piaxtla	87
6.3 Modelo tectónico para el Ensamble Piaxtla . . . . .	89
<b>Referencias</b>	<b>95</b>
<b>Anexos</b>	<b>106</b>
<b>A Análisis químico de elementos mayores, Fluorescencia de rayos X</b>	<b>108</b>
<b>B Análisis de microsonda electrónica de barrido</b>	<b>110</b>
<b>C Cálculo de tasas de exhumación</b>	<b>149</b>
<b>D Composición de roca efectiva</b>	<b>152</b>



# Índice de figuras

1.1	Mapa geológico del Complejo Acatlán . . . . .	4
1.2	Estructura general, Ensamble Piaxtla . . . . .	5
1.3	Diagrama Metodología . . . . .	17
2.1	Modelo de subducción . . . . .	19
2.2	Diagrama P-T con campos de facies metamórficas y líneas de estabilidad mineral . . . . .	24
2.3	Diagramas ternarios ACF . . . . .	26
3.1	Micrografías de secciones delgadas del área de Ixcamilpa . . . . .	33
3.2	Micrografías de secciones delgadas del área de Tecomatlán-Piaxtla . . . . .	34
3.3	Micrografías de secciones delgadas del área de San Francisco de Asís . . . . .	36
3.4	Micrografías de esquistos azules en secciones delgadas del área de Mimilulco . . . . .	38
4.1	Química de roca total . . . . .	41
4.2	Diagramas de composición para el granate . . . . .	45
4.3	Diagramas de composición para el granate . . . . .	46
4.4	Diagramas de clasificación de piroxenos . . . . .	47
4.5	Diagramas de clasificación para los anfíboles . . . . .	49
4.6	Diagramas de clasificación para minerales: plagioclasas, epidotas, micas y cloritas . . . . .	52
5.1	Pseudosecciones P-T calculadas para Eclogitas con la composición de roca total BC (%wt) para el área de Asís . . . . .	61
5.2	Pseudosecciones P-T calculadas para Eclogitas con la composición de roca total BC (%wt) para el área de Piaxtla-Tecomatlán . . . . .	62
5.3	Pseudosecciones P-T calculadas para Eclogitas con la composición de roca total BC (%wt) para el área de Piaxtla-Tecomatlán . . . . .	63
5.4	Pseudosecciones P-T calculadas para Eclogitas con la composición de roca efectiva EBC para el área de Asís y Piaxtla-Tecomatlán . . . . .	64
5.5	Pseudosecciones P-T calculadas para Eclogitas con la composición de roca efectiva EBC para el área de Asís y Piaxtla-Tecomatlán . . . . .	65

5.6	Pseudosección para la muestra <i>Piax</i> – 13 <i>B</i> (Eclogita) del área de Asís, composición de roca total efectiva EBC . . . . .	66
5.7	Pseudosecciones P-T calculadas para Anfibolitas con la composición de roca total BC (%wt) para el área de Asís e Ixcamilpa . . . . .	71
5.8	Pseudosecciones P-T calculadas para Anfibolitas con la composición de roca total BC (%wt) para el área de Piaxtla-Tecomatlán . . . . .	72
5.9	Pseudosecciones P-T calculadas para Anfibolitas con la composición de roca total BC (%wt) para el área de Ixcamilpa y Piaxtla-Tecomatlán . . . . .	73
5.10	Pseudosecciones P-T calculadas para Esquistos azules con la composición de roca total BC (%wt) para el área de Ixcamilpa . . . . .	77
5.11	Pseudosecciones P-T calculadas para Esquistos azules con la composición de roca total BC (%wt) para el área de Ixcamilpa y Mimilulco . . . . .	78
5.12	Pseudosecciones P-T calculadas para Esquistos azules con la composición de roca efectiva EBC para el área de Ixcamilpa y Mimilulco . . . . .	79
6.1	Pseudomorfos de Granate . . . . .	82
6.2	Estadios metamórficos y trayectorias P-T . . . . .	85
6.4	Trayectorias P-T-t . . . . .	86
6.3	Estadios metamórficos y trayectorias P-T . . . . .	91
6.5	Modelo conceptual de la estructura y trayectoria metamórfica dentro del canal de subducción para las rocas alta presión del Ensamble Piaxtla. . . . .	94
D.1	ImageJ ejemplo . . . . .	154



# Capítulo 1

## Introducción

Durante el último siglo se han desarrollado modelos termodinámicos que muestran las trayectorias metamórficas P-T, prógradas y/o retrógradas que las rocas siguen durante los procesos metamórficos de subducción y exhumación. Con la abundancia de los datos termodinámicos, datos experimentales, empíricos y la imposibilidad de realizar cálculos a mano se ha posibilitado el modelado termodinámico. De manera general, una pseudosección es un diagrama de fases isoquímico cuyas coordenadas son parámetros intensivos que caracterizan las condiciones de formación de una roca, delimitando los campos de estabilidad de minerales específicos y asociaciones minerales en coexistencia (Bucher and Grapes, 2011), utilizando para ello datos experimentales y composiciones simplificadas de todas las posibles asociaciones minerales potencialmente estables (Winter, 2001). Por tanto, la información más relevante que aportan este tipo de diagramas proviene de las asociaciones minerales potencialmente estables y las posibles reacciones que puedan surgir en condiciones de presión, temperatura y composición (P-T-x) cambiantes.

El Complejo Acatlán, está localizado en el mosaico de terrenos metamórficos al sur de México, comprende un ensamble deformado del Paleozoico de rocas meta-sedimentarias, cuerpos graníticos y rocas máficas y ultramáficas metamorfoseadas (Yáñez et al., 1991; Ramírez-Espinoza, 2001). En general se subdivide en: una secuencia sedimentaria depositada durante el Neoproterozoico- Ordovícico, que se encuentra intrusionada por una suite ígnea bimodal que consiste principalmente de granitoides y metabasitas, muchas de ellas con metamorfismo en facies de eclogita (Ortega-Gutiérrez, 1974, 1978; Ortega-Obregón et al., 2003; Keppie et al., 2008a,b; Miller et al., 2007), además de otros cuerpos máficos-ultramáficos que son atribuidos a distintos ambientes tectónicos (Proenza et al., 2004; Murphy et al., 2006; Keppie et al., 2012).

El Ensamble Piaxtla (Piaxtla *Suite*) muestra asociaciones mineralógicas que han registrado metamorfismo en facies de esquistos azul, eclogita con retrogresión a facies de

anfibolita y esquistos verdes (Talavera-Mendoza et al., 2005; Vega-Granillo et al., 2007; Ramos-Arias et al., 2012a; Galaz et al., 2013).

La presencia de rocas de alto grado en el Ensamble Piaxtla sigue causando controversia sobre su formación, así como los posibles eventos de subducción y exhumación que le dieron origen. En general, la comunidad geológica ha logrado complementar la petrología metamórfica con otros estudios del tipo: estructurales, geoquímicos, isotópicos y más recientemente modelados termodinámicos, con la finalidad de asociar los distintos procesos metamórficos con distintos ambientes tectónicos específicos. Se han considerado a las rocas metamórficas de alta presión como producto de márgenes convergentes, interpretadas como suturas oceánicas producto de una convergencia continental-continental y zonas de subducción, siendo estos ambientes tectónicos más significativos y complejos, debido a que exponen una gran variedad de rocas exhumadas desde diferentes niveles corticales (e.g., Liou et al., 2004; Ernst and Liou, 2008).

La extrusión de rocas metamórficas de alta presión requiere la remoción de las rocas sobreyacentes, y/o mecanismos de transporte de las rocas de alta presión, a través de estructuras de plegamiento (napas) o fallas laterales con transpresión para así regresar a la superficie. Otros posibles procesos involucrados son el acortamiento horizontal y engrosamiento vertical cortical (Chemenda et al., 1996; Hynes, 2002; Godin et al., 2006; Keppie et al., 2010). Estos mecanismos han sido definidos como una respuesta a los procesos geodinámicos que generan los cinturones de alto grado metamórfico. En este contexto, las rocas metamórficas de alta presión pertenecientes al Complejo Acatlán (i.e., el Ensamble Piaxtla) constituyen un laboratorio natural para estudiar las rocas de alto grado que lo conforman.

## 1.1. Marco geológico para el Ensamble Piaxtla

El sur de México es geológicamente un importante vestigio de procesos tectónicos que dieron origen a rocas plutónicas y metamórficas de difícil comprensión petrogenética. A finales del siglo XIX, en 1896 Aguilera realizó las primeras descripciones litoestratigráficas en la zona de Acatlán. Posteriormente en 1905 Ordoñez denominó a la “Formación Acatlán” a un conjunto de dos unidades: los augen gneises y pizarras verdes plegadas y dislocadas. En 1949, Salas adopta el término “Esquisto Acatlán”. Posteriormente, en 1974 se realizaron estudios petrológicos por Ortega-Gutiérrez en la zona cercana de Tehuitzingo, descubriendo por primera vez en México rocas en facies de eclogita, relacionándolas con antiguas zonas de subducción.

En 1978 Ortega-Gutiérrez redefinió la “Formación Acatlán” de Fries y Rincón-Orta (1965) elevándola en jerarquía a Complejo Acatlán debido a las problemáticas metamórfica y tectónica existentes, subdividiéndolo en dos subgrupos: Petlancingo y Aca-

teco; con cuatro unidades metasedimentarias y una de origen magmático dentro de la cual se encuentra la Formación Xayacatlán (conjunto metamórfico), así como tres unidades graníticas que intrusionan a las unidades anteriores. Además, describe a la Formación Xayacatlán como rocas básicas metamorfoseadas y parcialmente milonitizadas en pequeños lentes de rocas ultramáficas y delgados cuerpos tabulares de composición básica, en el extremo suroccidental de la formación, ésta se encuentra eclogitizada.

En 1999 Ortega-Gutiérrez interpreta dos ensambles tectónicos: una placa inferior (Petlancingo), la cual es para-autóctona y una placa superior alóctona (Acateco). Las eclogitas máficas son parte de un grupo alóctono formado por ofiolitas eclogitizadas de la Formación Xayacatlán. Los lentes eclogíticos bien preservados se encuentran dentro de los paquetes de anfibolitas, rocas ígneas en el área de Piaxtla-Tecomatlán.

El Ensamble Piaxtla es un cinturón de alta presión (HP) perteneciente al complejo Acatlán (Ortega-Gutiérrez, 1993), está localizado al sur de México (Fig. 1.1). En general, el Ensamble Piaxtla comprende un conjunto de rocas meta-sedimentarias, cuerpos graníticos, rocas máficas y ultramáficas metamorfoseadas y deformadas durante el Paleozoico (Yáñez et al., 1991). Se subdivide en:

i) Una secuencia sedimentaria cuyos zircones detríticos sugieren una edad de depósito entre el Neoproterozoico al Cámbrico-Ordovícico, cuyo intervalo es de los 980-654 a los 480 Ma, se encuentra intrusionada por una suite ígnea bimodal, constituida principalmente de granitos y diques basálticos, muchos de ellos con metamorfismo en facies de eclogita, esquisto azul y anfibolita.

ii) También se encuentran cuerpos máficos-ultramáficos que son atribuidos a distintos ambientes tectónicos, tales como, rift continental, peri-arco, arco de isla, islas oceánicas y ofiolíticos (Meza-Figueroa, 1998; Proenza et al., 2004; Murphy et al., 2006; Morales-Gómez et al., 2009b; Keppie et al., 2012). Sin embargo, existen equivalencias temporales y geoquímicas en un rango de 480 a 440 Ma, emplazadas durante el Ordovícico, identificada en los granitos y los diques basálticos (Talavera-Mendoza et al., 2005; Morales-Gómez et al., 2009a; Ramos-Arias and Keppie, 2011; Keppie et al., 2012).

El conjunto de asociaciones litológicas, zircones detríticos y la firma de magmatismo bimodal Ordovícico, permiten interpretar un margen rift pasivo como posible escenario para el origen de las rocas del Ensamble Piaxtla (Murphy et al., 2006). A su vez es compatible con el nacimiento del Océano Réico, ya que su piso oceánico permanece adyacente al norte de Gondwana hasta el evento de la subducción diacrónica que comenzó en el Devónico-Carbonífero (Poole et al., 2005; Murphy et al., 2006; Nance and Linnemann, 2008; Keppie et al., 2008a, 2010; Estrada-Carmona et al., 2016).



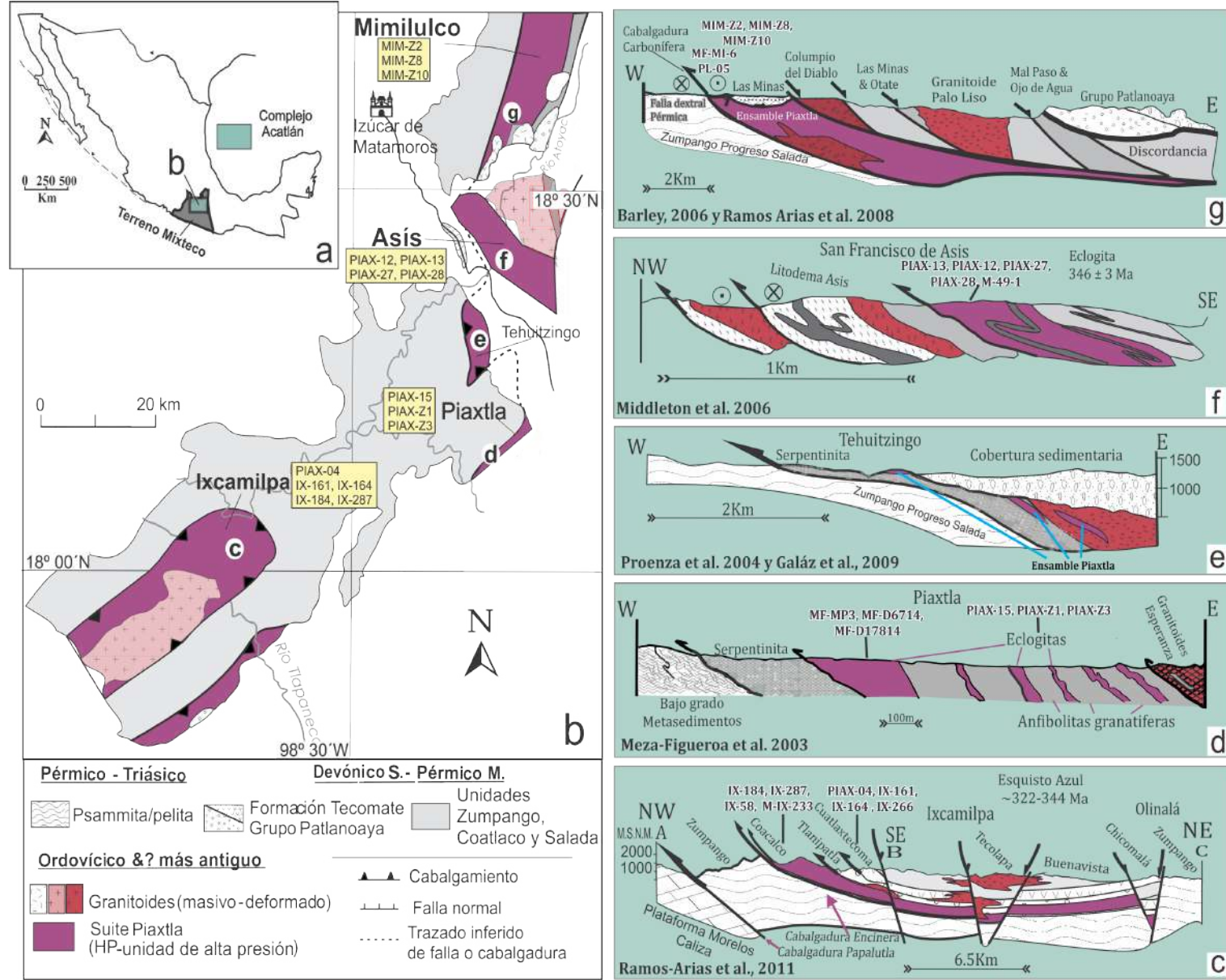


Figura 1.1: Mapa geológico del complejo Acatlán. Modificado de Ortega-Gutiérrez et al. (1999) y Keppie et al., (2004a). Se muestra el Ensamble Piaxtla y la localización de las muestras estudiadas en este trabajo. A la derecha las secciones realizadas para el Ensamble Piaxtla por varios autores.

Cartográficamente existen dos cinturones metamórficos conformados por rocas de alta presión, están emplazadas tectónicamente sobre la unidad de bajo grado (Fig. 1.1). El primero es denominado Piaxtla-Mimilulco, y el segundo, más occidental Ixcamilpa-Olinalá.

En el cinturón de alta presión se observan diferentes grados metamórficos. Por ejemplo, facies de esquistos azules, eclogitas, eclogita-anfibolita, anfibolitas y su retrogresión hasta facies de esquistos verdes. La complejidad de la deformación hace que sea poco posible la restauración de una secuencia ofiolítica ya desmembrada, sin embargo, existe un consenso por parte de todos los autores de que las rocas de la Suite Piaxtla son evidencia de un piso oceánico sometido a un sistema de zonas de subducción. La disposición estructural simplificada para rocas de alta presión en el Ensamble Piaxtla consiste en varias piezas de distintos grados metamórficos de medio a alto (facies de esquistos azules, eclogitas y anfibolitas), ubicados dentro de esta secuencia de oeste a este, imbricándose y sobreponiéndose a los litodemas de Zumpango y Cosoltepec en donde sólo alcanzan el metamorfismo en facies de esquistos verdes (bajo grado)(Fig.1.2).

El límite oriental del cinturón central es interpretado como una zona de cizallas lístricas norte-sur, con vergencia hacia el este y componente normal (Ramos-Arias et al., 2008; Galaz et al., 2013). Cada segmento a lo largo del cinturón tiene un conjunto particular de estructuras, sin embargo, la deformación dúctil general dentro del cinturón de alta presión es evidente, la cinemática de la cizalla se deduce de las figuras  $\sigma$  y  $\delta$  en los porfidoblastos/porfidoclastos de granate en eclogitas y en peces de mica en las anfibolitas y en las litologías meta-sedimentarias (Ramos-Arias et al., 2008).

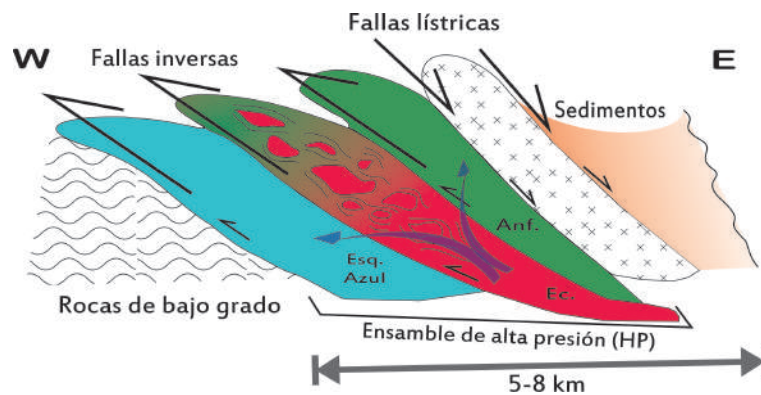


Figura 1.2: Diagrama de la estructura general, distribución metamórfica del Ensamble Piaxtla. Modificado de Ramos-Arias et al., en revisión.

A partir de la descripción de rocas de alta presión en facies de eclogita y el establecimiento de condiciones termobarométricas para el metamorfismo entre 500-550 °C y de 11-12 *kbar*, realizado por Ortega-Gutiérrez (1974), se han elaborado diversas investigaciones que han puesto en discusión los procesos reales de exhumación y metamorfismo

de las litologías presentes en el Ensamble Piaxtla. No obstante, siguen siendo un tema de estudio y controversia.

Meza-Figueroa et al. (2003); Meza-Figueroa (1998), definen que el protolito basáltico para la formación Xayacatlán es del tipo MORB y OIB. Caracterizan las condiciones termobarométricas para las “metaeclogitas” del área cerca de Mimilulco y las clasifican como eclogitas Tipo C Alpino, proponen que el metamorfismo en facies de eclogita alcanzó temperaturas alrededor de los  $560 \pm 60$  °C con presiones entre 11 y 15 *kbar*. En relación con la retrogresión, tiene temperaturas entre  $510 \pm 20$  °C y  $300 \pm 25$  °C y a 6-3.5 *kbar*.

Vega-Granillo et al. (2007) encontró que las rocas de alto grado metamórfico (eclogitas) de la formación Xayacatlán exhiben un pico metamórfico hacia los 609-491 °C y entre los 13-12 *kbar* durante el Ordovícico temprano, seguido de una sobreimpresión parcial por facies de anfibolita con epidota y de esquisto verde a 500-525 °C y  $\sim 9.5$  *kbar* para los 416-386 *Ma* y 336 *Ma*, respectivamente. Mientras que en el área de Ixcamilpa las facies de esquisto azul alcanzaron temperaturas entre los 200 y 390 °C y presiones de 6.5-9.0 *kbar* y luego facies de epidota-anfíbol en 390-580 °C y a 9-6 *kbar*, posiblemente durante el Ordovícico tardío.

Middleton et al. (2007) estiman condiciones metamórficas máximas para el litodema Asís; 896-1684 °C y 627-1135 °C y  $\sim 14$ -30 *kbar*. Metamorfismo retrógrado en  $\sim 300$ -474 °C y 3.5-10 *kbar*. Utilizando zircones y análisis isotópico U-Pb obtienen un fechamiento en  $346 \pm 3$  *Ma* para las facies de eclogitas; y 330 – 347 *Ma* para el evento de migmatización en facies de anfibolita.

Ramos Arias (2010) estudió rocas de alta presión localizadas en un *Klippe* con vergencia hacia el oeste-noroeste en el área de Ixcamilpa, está conformado por: i) Ensamble Piaxtla, consiste en meta-psamitas, meta-pelitas y cuerpos de metabasitas, deformados y que fueron afectados por retrogresión, posicionándolas en facies de anfibolita–esquisto verde. ii) Una unidad de meta-sedimentos y meta-basitas intrusionados por granitoides megacrystalinos y junto con los meta-sedimentos afectados por la deformación. iii) El ensamble de alto grado que sobreyace en forma de cabalgadura con vergencia hacia el oeste sobre la unidad Zumpango, está conformada por rocas cuarcíticas, meta-psamitas y cenizas volcánicas. Además, realiza fechamientos por el método Ar-Ar en los minerales pertenecientes a la fábrica de deformación de las rocas de alto grado, resultando en 344 – 339 *Ma* para anfíbol,  $318 \pm 4$  *Ma* para glaucófano y  $329 \pm 2$  *Ma* para muscovita; el intervalo de 20 *Ma*, se interpretó en términos de extrusión dúctil progresiva. Siendo Ixcamilpa la raíz de una napa, lo cual es consistente con una zona de extrusión dúctil cuya cima presenta fallamiento normal, mientras que en la base hay fallas inversas, por lo tanto, el mecanismo de emplazamiento de las rocas de alto grado y su naturaleza se determina como un canal de subducción (Ramos-Arias and Keppie, 2011).

La unidad Coacalco se genera en el campo de facies de esquistos azules, con posterior ingreso en el campo de facies de epidota-anfibolita por debajo de los 566 a 350 °C. Además, realiza fechamientos por el método Ar-Ar, resultando en 318±4 Ma para el glaucófano. La unidad Cuatlaxtecoma, presenta litologías en facies de anfibolita-eclogita, con retrogresión a facies de epidota-anfibolita. La edad obtenida por Ar-Ar de 340 Ma, indica un enfriamiento del anfíbol de 609 a 550 °C

Keppie et al. (2012) realizaron estudios en rocas metamórficas de alta presión, las cuales se encuentran dentro de cinturones extruidos en el Complejo Acatlán. Además, calcularon tasas de subducción para el Ensamble Piaxtla en 2.7 km/Ma y de exhumación de 2.4 km/Ma.

Galaz et al. (2013) trabajaron en el área de Tehuiztzingo, calcularon condiciones de temperatura para un meta-granito con granate y rutilo de 741 ±50 °C y condiciones de 758 ±28 °C y presiones de 16 kbar en un micaesquisto. Sugieren un pico metamórfico en facies de eclogita con condiciones de ~16 kbar y 750 °C, una segunda fase de deformación penetrativa en facies de epidota-anfibolita en ~5 kbar y 470 °C, y una tercera fase de deformación en facies de esquistos verdes a ~2.5 kbar y 350 °C. A su vez, interpretan la presencia de un *Klippe* con vergencia al oeste el cual representa una zona de extrusión de tipo serpentinitica durante el Misisípico. También, estiman tasas de exhumación entre 0.3-0.1 mm/año en un período de 13-20 Ma.

Estrada-Carmona et al. (2016) por el método de Lu-Hf en granate y roca total obtuvieron edades del evento metamórfico en facies de eclogita para muestras pertenecientes a Piaxtla y Asís, obteniendo una edad de 352 ±4 Ma evento de alta presión ocurrido durante el cierre del océano Réico y no del océano Iapetus. Además de proponer una tasa de exhumación de ~2 km/Ma.

Hernández-Urbe et al. (2019), combinando el modelado de equilibrio de fase y la termometría Zr en rutilo proponen un camino P-T prógrado para las eclogitas y los esquistos azules de granate-epidota presentes en el Ensamble Piaxtla. Condiciones pico a ~22 kbar y ~690 °C y un reequilibrio a ~14.5 kbar y 660 °C para las eclogitas; y dos posibles condiciones pico: ~19.5 kbar y ~510 °C o ~13.5 kbar y ~490 °C y un reequilibrio a ~8.5 kbar y ~487 °C para los esquistos azules. Alcanzando profundidades de ~70 y 50 km respectivamente, sugiriendo una tasa de subducción de ~5.4 km/Ma y una tasa de exhumación de ~3.4 km/Ma.

Las eclogitas mejor preservadas están expuestas en los alrededores de las comunidades de Piaxtla, Tecmatlán y San Francisco de Asís (Puebla). Los esquistos azules afloran cerca de los poblados de Tlanipatla, Coacalco e Ixcamilpa y los afloramientos mejor preservados se localizan en el área aledaña al municipio de San Isidro Mimilulco y en el área de Izúcar de Matamoros (Fig. 1.1). En los afloramientos, las eclogitas se encuentran inmersas dentro de las anfibolitas, como lentes abudados u horizontes muy delgados.

En el área de Ixcamilpa, las rocas de alto grado han sido interpretadas como un *Klippe* (cabalgadura plegada) con vergencia hacia el Noroeste. La estructura de Ixcamilpa es la raíz de una napa que yuxtapone la unidad metamórfica de alta presión sobre la unidad de bajo grado mediante una falla inversa, este hecho es consistente con una zona de extrusión dúctil (Ramos-Arias et al., 2008). Dentro de las rocas que constituyen este conjunto se incluyen: metapsamitas, metapelitas y cuerpos de metabasitas, que han sido deformados en condiciones metamórficas en facies de esquisto azul, eclogita y anfibolita, afectadas por retrogresión posicionándolas en facies de anfibolita y esquisto verde. Las rocas de esta área equivalen litológica, geoquímica y geocronológicamente con aquellas otras del cinturón intermedio Piaxtla-Mimilulco (Keppie et al., 2010; Galaz et al., 2013).

En el área de Piaxtla, el ensamble de alta presión se encuentra yuxtapuesta tectónicamente contra la unidad metamórfica de bajo grado mediante fallas sub-verticales, orientadas N-S, cabalgando a la unidad de bajo grado a lo largo de una falla inversa plegada, dónde el “bloque de techo” del Ensamble Piaxtla cabalga hacia el oeste. En esta área se observa un paquete de anfibolita, esquisto de mica y anfibolita granatífera interdigitada con diques leucograníticos y en la parte superior, un granito ordovícico. Los esquistos pelíticos fechados con el sistema Ar-Ar en  $345\pm 2$  Ma y  $348\pm 4$  Ma en fengita por Vega-Granillo et al. (2007); con  $342\pm 2$  Ma y  $344\pm 2$  Ma en anfíbol (hornblenda) por Keppie et al. (2010) acotando/construyendo el tiempo de cuando las rocas del Ensamble Piaxtla alcanza la mayor profundidad con una posterior exhumación a la superficie.

## 1.2. Problemática, justificación, hipótesis y objetivos

De las múltiples discusiones sobre la interpretación del metamorfismo de alta presión en el Ensamble Piaxtla, se especula que es el resultado del cierre de una o múltiples cuencas oceánicas existentes entre los océanos Iapetus y Reico (Ortega-Gutiérrez, 1981; Ortega-Gutiérrez et al., 1999; Proenza et al., 2004; Talavera-Mendoza et al., 2005). Por otro lado, este ensamble ha sido interpretada como un cinturón metamórfico generado y exhumado mediante un proceso de subducción continua en la margen del Océano Réico durante el Carbonífero (Keppie et al., 2008b; Ramos-Arias and Keppie, 2010; Keppie et al., 2012), por lo que no representa una sutura oceánica sensu stricto.

Existen estudios para el Ensamble Piaxtla, que obtienen las condiciones termobarométricas y hacen énfasis en la construcción de diagramas P-T, pero la construcción de pseudosecciones es escasa. Sin embargo, combinando nuevos datos geoquímicos, termodinámicos y termobarométricos se pueden construir pseudosecciones que ayuden a

un mejor entendimiento de los procesos, y las trayectorias del metamorfismo que sufrieron las rocas del Ensamble Piaxtla. En específico, la reconstrucción de la historia metamórfica de la eclogitas, eclogitas con retrogresión, anfibolitas y finalmente de los esquistos azules presentes en el Ensamble Piaxtla.

Por tanto, es pertinente cuestionarse: ¿Todo el fragmento considerado el Ensamble Piaxtla evolucionó a partir de una trayectoria metamórfica común? La determinación de una sola trayectoria P-T-x<sup>1</sup> puede ser aplicable para volúmenes limitados de roca y extrapolar los cálculos P-T-x a todo el volumen del ensamble puede resultar erróneo.

Además, por la complejidad petrológica y estructural del Ensamble Piaxtla, se plantea la pregunta: ¿Es posible reconstruir una trayectoria P-T-x y por ende pseudosecciones representativas para el Ensamble Piaxtla? En principio, existen evidencias petrológicas que permiten determinar un pico térmico en común. Sin embargo, es necesario entender el contexto estructural en el cual están involucradas las rocas del Ensamble Piaxtla. Y, por último, ¿Es posible reconstruir varias trayectorias comparables y correlacionables entre sí, permitiendo deducir o generalizar a una sola trayectoria que represente la evolución metamórfica del Ensamble Piaxtla?

Para resolver estos cuestionamientos, se hizo una selección minuciosa de las rocas en términos de su relación estructural, su textura y asociación mineral, para poder realizar las pseudosecciones y así, compararlas y correlacionarlas dentro del Ensamble Piaxtla.

Los principales retos para las rocas de alta presión del Ensamble Piaxtla consisten en definir las trayectorias P-T-x en diferentes porciones a lo largo del cinturón. Además, su relación espaciotemporal con distintos episodios tectonotermales, lo cual representa una contribución fundamental para tener un mejor entendimiento de la evolución tectónica del Ensamble Piaxtla.

### 1.2.1. Justificación

La construcción de pseudosecciones en los estudios realizados en el Complejo Acatlán es limitada, dicho lo anterior, son necesarios estudios donde se utilice la información previa combinada con los datos nuevos para de esta manera establecer una termobarometría coherente, a su vez, construir pseudosecciones para esclarecer y establecer los picos metamórficos, las asociaciones minerales posibles y en equilibrio presentes en las rocas estudiadas, y con ello, determinar las posibles trayectorias metamórficas de retrogresión durante la exhumación que siguieron los bloques que conformar el Ensamble Piaxtla. Con estos resultados se aporta información que permite un mejor entendimiento de los procesos y trayectorias del metamorfismo de alto grado del Complejo Acatlán.

---

<sup>1</sup>x-composición.

### 1.2.2. Hipótesis

La exhumación y retrogresión del Ensamble Piaxtla sucedió en dos trayectorias distintas. Un trayecto hacia facies de anfibolita y el otro a facies de esquistos azul, partiendo de un pico metamórfico en facies de eclogita.

### 1.2.3. Objetivos

**Objetivo General:** Obtener, mediante la modelización termodinámica las condiciones P-T para sistemas químicos simplificados ( $MnNCFMASHT^2$ ), y determinar las posibles trayectorias de retrogresión que siguieron las rocas en facies de eclogita, esquistos azul y anfibolita presentes en el Ensamble Piaxtla.

Propuesta de un modelo conceptual de la trayectoria metamórfica dentro del canal de subducción de las rocas de alta presión del Ensamble Piaxtla.

Objetivos particulares:

1. Observar texturas metamórficas en láminas delgadas.
2. Determinar las paragénesis minerales y su orden de cristalización en distintos dominios.
3. Cuantificar, con el uso de la microsonda electrónica la composición química de las asociaciones minerales relacionadas con cada paragénesis observada dentro de secuencia de cristalización metamórfica.
4. Construcción de diagramas de equilibrio de fase (i.e., pseudosecciones) para confirmar las asociaciones minerales en equilibrio observadas en lámina delgada y establecer las condiciones metamórficas de las rocas de alto grado del Ensamble Piaxtla.
5. Establecer las trayectorias P-T de las rocas de alto grado metamórfico del Ensamble Piaxtla, para reconstruir los eventos físicos a los que fueron sometidas, indicando el tiempo-espacio de la roca desde el ingreso en la subducción hasta la exhumación. Con ello es posible distinguir qué rocas pudieron haber tenido una historia (subducción-exhumación) similar o diferente (espacio-temporal), y sus condiciones P-T en términos de su geoquímica.
6. Cálculo de tasas de exhumación para cada litología apartir de las profundidades obtenidas con las pseudosecciones construidas y las dataciones tomadas de la literatura.

---

<sup>2</sup>Na<sub>2</sub>O-CaO-FeO-MgO-MnO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> ± H<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>

## 1.3. Metodología

### 1.3.1. Revisión bibliográfica

Se realizó una revisión bibliografía relacionada con las rocas de alto grado (eclogitas, anfibolitas y esquistos azules) pertenecientes al Ensamble Piaxtla. Se prestó especial atención a la información asociada a las localizaciones de afloramientos, similitudes estructurales, relaciones texturales y datos geoquímicos. El objetivo fue coleccionar referencias para comparar y correlacionar las litologías ubicadas en distintas localidades del Ensamble Piaxtla. Cabe resaltar que la bibliografía existente es reducida en particular para el Ensamble Piaxtla, ya que mayormente hay trabajos dedicados al Complejo Acatlán de manera general.

### 1.3.2. Trabajo de Campo

Se realizaron 4 salidas a campo, las dos primeras se enfocaron en las áreas de Ixcamilpa y Mimilulco. La tercera en las áreas de San Francisco de Asís y Piaxtla-Tecomatlán, y la última salida de campo se realizó en las áreas de San Francisco de Asís y Mimilulco.

El trabajo de campo consistió en la descripción y muestreo de los afloramientos con rocas de alta presión (anfibolitas, eclogitas retrogradadas y esquistos azules) mejor preservadas. Tomando como base mapas geológicos y la información disponible en la literatura (Meza-Figueroa et al. (2003); Murphy et al. (2006); Ramos-Arias et al. (2012a); Pérez-López (2014); Vega-Granillo et al. (2007), etc) así como mapas cartográficos de trabajos previos (e.g. Ortega-Gutierrez, 1999). Previamente a las salidas, con la ayuda de Google Earth se realizó la selección de los posibles transectos a muestrear.

Se prestó especial atención a los afloramientos en los que se observaban mejor preservadas las litologías de interés. Se realizó una descripción de afloramiento para determinar las relaciones litológico-estructural y definir esquemas locales y así coleccionar las rocas adecuadas para este estudio. El muestreo se realizó de manera sistemática seleccionando las rocas con aspecto más fresco, sin evidencia notable de alteración debida al intemperismo. Se coleccionaron fragmentos de roca que presentaban una textura homogénea.

Se obtuvieron 81 muestras en total de las cuales 10 no *in situ* y 71 en 50 puntos muestreados. En varios casos se recolectaron más de una muestra en un mismo punto. Posteriormente, se seleccionaron 32 muestras para análisis petrográfico, de las cuales 12 se usaron para análisis químico. En la tabla 1.1 se describe de manera resumida las características generales para cada localidad y para las muestras más representativas, las cuales se utilizan posteriormente para realizar la modelación.



Tabla 1.1: Contexto geológico general y descripción de muestra de mano de las litologías colectadas en las localidades del área de estudio. Las coordenadas están en formato UTM con DATUM:WGS84. Las abreviaciones de las zonas de muestreo son: IX=Ixcamilpa; PT=Piactla-Tecomatlán; A=Asís; MIM=Mimilulco.

Muestra	Tipo de Roca	Localidad	Coordenadas		Descripción
			x	y	
IX-287	Esquisto azul	IX	534325	1998193	Los esquistos azules se posicionan estructuralmente en la base de zonas de cabalgadura dúctil descrita por Ramos Arias et al. (2011), pertenecen a la porción occidental del Ensemble Piaxtla (Fig. 1.1). El volumen de rocas en facies de esquistos azules se encuentran intercalados con esquistos pelíticos-psamíticos en facies de esquistos verdes, evidenciando una completa retrogresión.
IX-184a	Esquisto azul	IX	533830	1997998	Estas rocas presentan un bandeamiento penetrativo de color verde pistache y gris, con un plegamiento predominantemente abierto e inclinado, se observa una textura nematoblástica con un marcado bandeamiento de anfíbol (Gln), con intercalaciones de dominios granoblásticos de epidota y lepidoblásticos de mica blanca.
IX-164a	Anfibolita	IX	529905	1995777	En las inmediaciones de poblados de Tlanipatla e Ixcamilpa, en las cañadas y caminos de terracería, se exponen relictos de rocas eclogíticas parcialmente anfibolitizadas preservados en estructuras lenticulares, inmersos en intercalaciones de anfibolitas con granitoides deformados. Las eclogitas retrógradas se observan de color verde, de textura mayormente granoblásticas bandeadas de granate y plagioclasa, intercalada con dominios lepidoblásticos de mica blanca y clorita, además de dominios nematoblásticos con anfíboles, epidota y clorita.
IX-161	Anfibolita	IX	529223	1994876	Muchas de las anfibolitas se encuentran interdigitadas con rocas metasedimentarias, ostentan una textura nematoblástica conteniendo anfíbol, porfidoblastos/porfidoclastos de granate y dominios granoblásticos bandeados de cuarzo, plagioclasa y epidota.
PIAX-04	Anfibolita	IX	527777	1994385	
PIAX-15	Eclogita	PT	579228	2011592	En la cercanía de los poblados de Tecuautitlán y Chinantla afloran bandas y lentes relictos de rocas eclogíticas, preservadas dentro de las anfibolitas, estas últimas se encuentran intercaladas con rocas metasedimentarias pelíticas y silíceas acorde con lo reportado por Ramírez-Espinosa (2001); Meza-Figueroa et al., (2003); Vega Granillo et al. (2009).
PIAX-Z1	Eclogita	PT	579224	2011619	Las eclogitas son primordialmente lentes de color verde, con porfidoblastos/porfidoclastos de granate inmersos en bandas piroxeníticas de onfacita. Mientras que las anfibolitas son de color gris a verde oscuro, presentan dominios nematoblásticos de anfíbol, con porfidoblastos/porfidoclastos de granate, además de dominios incipientes de grano grueso en bandas de plagioclasa y epidota.
PIAX-Z3	Eclogita	PT	579224	2011619	
PIAX-12	Anfibolita	A	574235	2040282	La localidad de Asís (Fig. 1.1) exhibe afloramientos de anfibolitas con pequeños lentes decimétricos de eclogita (Middleton et al., 2007; Vega-granillo et al., 2007), además se observan bandas que evidencian eclogitas con distintos grados de retrogresión (facies de anfibolita). Los litotipos en facies de eclogita son de color verde oscuro y tienen una textura predominantemente granoblástica inequigranular, con porfidoblastos de granate.
PIAX-13	Eclogita	A	574699	2039645	Las anfibolitas son de color gris oscuro a verde oscuro, con cristales de tamaño medio a grueso, presentan dominios nematoblásticos de anfíbol, porfidoblastos/porfidoclastos de granate y zonas granoblásticas bandeadas de plagioclasa y cuarzo.
PIAX-27	Eclogita	A	574668	2039843	
PIAX-28	Eclogita	A	574920	2039907	
MIM-Z2	Esquisto azul	MIM	573954	2057144	Los afloramientos se encuentran entre el poblado de San Isidro Mimilulco y la carretera Izúcar de Matamoros-Tepexi de Rodríguez (Fig. 1.1).
MIM-Z8-A	Esquisto azul	MIM	573954	2057144	Los esquistos azules estructuralmente corresponden a la base de una serie de cabalgaduras, conformando el Ensemble Piaxtla en su porción occidental, a su vez cabalga a los metasedimentos de la unidad Zumpango. Localmente las rocas en facies de esquisto azul se encuentran intercaladas con esquistos verdes. Presentan bandas de color verde pistache y gris, exhiben una foliación intensa, predominantemente isoclinal y una segunda fase con plegamiento abierto y recostado. La textura predominante es nematoblástica conformada por anfíbol (Gln), con intercalaciones de dominios granoblásticos bandeados de cuarzo, plagioclasa y epidota, además de otros dominios lepidoblásticos constituidos principalmente por mica blanca.
MIM-Z10-A	Esquisto azul	MIM	573954	2057144	En el área también se encuentran, anfibolitas intercaladas con rocas cuarzofeldespáticas y esquistos pelíticos de cuarzo y mica blanca (Meza-Figueroa et al., 2003). Las rocas en facies de anfibolita son de color verde oscuro foliadas, exhiben dominios nematoblástico de anfíbol con dominios porfidoblásticos de granate con texturas coroníticas y zonas granoblásticas de epidota, cuarzo y plagioclasa.

### 1.3.3. Técnicas Analíticas

#### 1.3.3.1. Análisis petrográfico

El análisis petrográfico fue realizado con un microscopio Olympus BX51, para definir las fases minerales presentes, las texturas principales y las paragénesis metamórficas principales. De manera sistemática se realizaron la descripción petrográfica y el análisis textural. En la Tabla 3.2 se sintetizan las fases identificadas.

De acuerdo con las características mineralógicas y texturales observadas, se seleccionó un conjunto de muestras representativas de las zonas estudiadas, para definir las relaciones de fase y la paragénesis mineral principal, asumiendo texturalmente equilibrio químico entre las fases minerales, para posteriormente llevar a cabo la cuantificación analítica mediante microsonda electrónica de barrido.

Se incorporaron 22 láminas previas (Ramos-Arias et al., 2012b) resultando en un total de 60 láminas delgadas analizadas. De las cuales 30 son de área de Ixcamilpa, 23 para el área de Mimilulco, 4 para el área de Asís y 3 para el área de Piaxtla-Tecomatlán.

Las abreviaciones usadas para los minerales se tomaron de Whitney y Evans (2010).

#### 1.3.3.2. Análisis por microsonda electrónica de barrido (EPMA)

Los criterios de selección para los análisis de microsonda se basaron en las relaciones texturales de las asociaciones minerales de interés para este trabajo descritas en el capítulo de Petrografía (Cap. 3). Se eligieron 10 muestras para ser analizadas por microscopía electrónica.

Los análisis se realizaron en el Laboratorio de Microsonda Electrónica de la Universidad de Minnesota, usando JEOL JXA-8900R (V=15 kV; I=20 nA). Los resultados obtenidos consistieron en imágenes de electrones retrodispersados, mediciones de composición química puntuales y mapeo químico elemental. Se obtuvieron alrededor de 11 análisis cuantitativos de elementos mayores (SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO, MnO, MgO, CaO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O) y concentraciones de elementos traza de zircón en rutilo. Posteriormente, fueron seleccionados, procesados y normalizados.

Las fórmulas estructurales fueron calculadas a partir de las fases minerales de interés como el granate, piroxenos, anfíboles, epidota, feldespatos y micas, se realizaron diagramas de clasificación química para observar variaciones químicas.

La normalización y proyección de los cationes y componentes ideales de los minerales se realizaron por software Microsoft Excel. Particularmente, para los piroxenos se utilizó el programa PX-NOM (Sturm, 2002) que se basa en la clasificación hecha por Morimoto (1983); los anfíboles se clasifican en los diagramas propuestos por Leake y colaboradores

(1997); las epidotas se clasifican según Franz y Liebscher (2004); la clasificación de las micas se realizó basándose en el diagrama ternario de Schliestedt (1980); la variación composicional de las cloritas se hizo de acuerdo a Melka (1965); y para las plagioclasas se ha utilizado un diagrama ternario en términos de su composición química.

Posteriormente, se construyó la composición de roca efectiva (*EBC-Effective bulk composition*) (Anexo D) usando los datos normalizados y un análisis modal del cual se obtuvieron proporciones modales, es decir, un volumen aproximado de cada fase mineral presente en la muestra de forma modal (se considera el área = a volumen).

### 1.3.3.3. Análisis por Fluorescencia de Rayos-X

Se realizaron 5 análisis de roca total, los cuales se llevaron a cabo en el Laboratorio de Fluorescencia de Rayos-X del Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía del Instituto de Geología, en un Espectrómetro Rigaku ZSX Primus II. Las muestras se prepararon con base seca y fundida para el análisis de elementos mayores. La determinación de la pérdida de calcinación (PxC) se hizo calcinando 1a de muestra a 900°C.

Además, de 29 análisis geoquímicos complementarios:

13 análisis de roca total de esquistos azules: 7 análisis no publicados por Murphy et al. (2006), 6 análisis de esquistos azules publicados por Pérez-López (2014; Tesis de licenciatura).

12 análisis para eclogitas y metaeclogitas: 6 se tomaron de Meza-Figueroa et al. (2003), 2 análisis no publicados de Murphy et al. (2006) y 4 análisis realizados en específico para este trabajo.

9 análisis de anfibolitas: 4 publicados por Meza-Figueroa et al. (2003), 4 no publicados de por Murphy et al. (2006) y 1 realizado para este trabajo. Los análisis se muestran en el Anexo A, A.1 para este trabajo y A.2 otros autores

### 1.3.3.4. Calculo de diagramas de fase (Pseudosecciones con Perple\_X)

La construcción de modelos termodinámicos sirve como una herramienta petrológica valiosa en la estimación de condiciones P-T, combinando los datos observacionales de la roca, las paragénesis, las proporciones y composiciones minerales resultando en diagramas multi-equilibrio denominados pseudosecciones, con los cuales es posible inferir la evolución de las rocas metamórficas.

Los datos obtenidos de los análisis mencionados previamente son utilizados para calcular los equilibrios de fase para las composiciones químicas específicas del sistema.

Las pseudosecciones se calcularon a partir de análisis individuales (XRF) de roca total y análisis de microsonda (EMPA) para roca efectiva.

Se generaron pseudosecciones para 13 análisis de roca total, 6 para eclogitas, 4 para anfibolitas y 3 para esquistos azules; es importante señalar, que para las eclogitas relictas se seleccionaron los análisis que representan a las eclogitas con menor grado de retrogresión. Así como 5 análisis de roca efectiva para eclogitas, 2 para anfibolitas y 2 para los esquistos azules.

Las pseudosecciones para las eclogitas se realizaron en condiciones anhidras, mientras que, para las anfibolitas y los esquistos azules) se realizaron en condiciones hidratadas ( $\sim 5\%$ ), bajo el sistema cerrado  $MnNCFMASHT^3$ .

Para la elaboración de diagramas de fase isoquímicos (o pseudosecciones) se utilizó el software *Perple\_X* 6.8.3 (Connolly, 1990, 2009), el cual usa un conjunto de datos termodinámicos de Holland and Powell (1998); Powell and Holland (2008), que incluyen la energía libre de Gibbs y la entalpía. Estas componentes termodinámicas se extrapolan y junto con el algoritmo que minimiza la energía libre de Gibbs permiten obtener de forma simultánea, las propiedades físicas (capacidad calorífica, calor específico, densidad, entre otras) y diagramas de fase isoquímicos (pseudosecciones).

En sí, *Perple\_X* está basado en la generalización termodinámica para construir diagramas, independientemente de las variables elegidas, y dentro de los rangos de sistemas físico-químicos convenientes. Así, *Perple\_X* utiliza un algoritmo en términos de la energía libre de Gibbs que se expresa en términos de  $\Pi$  fases posibles en el sistema:

$$G^{Sis} = \sum_{i=1}^{\Pi} \alpha_i G^i \quad (1.1)$$

Donde  $G^{Sis}$  es la energía libre de Gibbs del sistema,  $G^i$  es una cantidad arbitraria de la energía libre de Gibbs, en este caso elegida como un mol de la fase  $i$ , y  $\alpha_i$  es la cantidad de la fase restringida a  $\alpha_i \geq 0$ . El balance de masas requiere que la composición de las fases satisfaga:

$$N_j^{Sis} = \sum_{j=1}^{\Pi} \alpha_i N_j^i, j = 1 \dots c \quad (1.2)$$

Donde  $c$  es el número de componentes independientes y  $N_j^i$  es la cantidad del componente  $j$  en las fases  $j$ .

La energía de Gibbs de una fase disuelta es una función no lineal de su composición, y

---

<sup>3</sup>Na<sub>2</sub>O-CaO-FeO-MgO-MnO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> ± H<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>

esta representada por una serie de compuestos designados pseudocompuestos, definidos de tal manera que cada compuesto tiene las propiedades termodinámicas de disolución para cada composición específica. Desde una perspectiva computacional, cada pseudocompuesto tiene una posible fase de formulación representada por las ecuaciones (1.1 y 1.2) (Connolly, 2005, 2017).

Por lo tanto, *Perple\_X* es el programa que mejor se ajusta a la resolución de la problemática abordada en la presente tesis y, en general, para el modelado geodinámico (Connolly, 2005), generando modelos que expliquen de mejor manera la petrogénesis de las rocas metamórficas. De forma complementaria, también se empleó *Perple\_X* para generar las isopletras en términos de los miembros extremos para las soluciones sólidas, componentes y un análisis modal de fases para generar isopletras composicionales de fase.

### 1.3.3.5. Cálculos termobarométricos

Se utilizó un análisis termobarométrico de Nakamura (2009) para el par Grt-Cpx (*Omp*), y se calcularon las condiciones de equilibrio. También fue utilizado el termómetro de *Zr* en rutilo de Tomkins et al. (2007) para el contenido de *Zr* en ppm:

$$T(^{\circ}C) = \frac{83,9 + 0,410P}{0,1428 - R \ln \varphi} - 273 \quad (1.3)$$

Donde  $\varphi$  es *Zr* en ppm,  $P$  la presión en *kbar* y  $R = 0,0083144 kJK^{-1}$ .

De manera sintetizada se enlistan las etapas de la metodología.

- a. Revisión bibliográfica
- b. Selección minuciosa de muestras que representen las facies metamórficas de interés.
- c. Análisis petrográfico detallado, de acuerdo con sus relaciones texturales asumiendo equilibrio químico entre fases minerales.
- d. Identificación y caracterización cuantitativa de la composición química de fases minerales mediante el uso de microsonda electrónica de barrido (EPMA). Implementación de bases teóricas de datos termodinámicos con base en cálculos termobarométricos y diagramas termodinámicos de fase. Indicar eventos de progresión o retrogresión dentro de trayectorias metamórficas mediante el cálculo de las condiciones P-T de metamorfismo y posicionamiento en contexto con los datos P-T-t presentes en la literatura.

- e. Uso de *Perple\_X*, (Connolly, 1990). Programa de cómputo para generar diagramas de composición, pseudosecciones, el cual se basa en métodos estadísticos y termodinámicos.

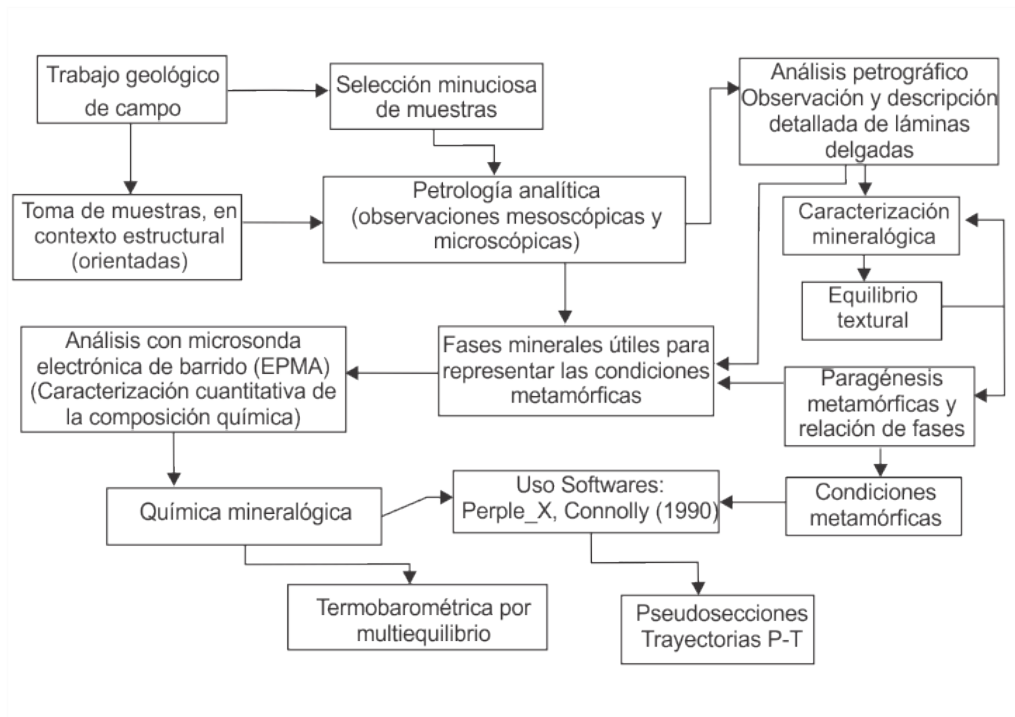


Figura 1.3: Diagrama de la metodología

# Capítulo 2

## Marco teórico

### 2.1. Reacciones metamórficas de rocas de alta presión y baja temperatura en ambientes de subducción

Existen varios escenarios tectónicos donde ocurren transformaciones metamórficas, entre ellos las zonas de subducción oceánica (Fig. 2.1) y colisión continental; persisten como ambientes tectónicos más complejos y significativos, ya que exponen una gran variedad de rocas exhumadas de diferentes niveles corticales (Liou et al., 2004; Ernst and Liou, 2008; Ernst and Liu, 1998), en especial las rocas de alto grado metamórfico.

Las rocas de alta presión y baja temperatura son registros importantes en la historia geodinámica de márgenes convergentes e históricamente están relacionadas con el debate sobre la progresión/retrogresión de los procesos metamórficos. Un ambiente de subducción, en términos metamórficos, tiene una naturaleza dinamo-termal, combinando gradientes geotérmicos, geobáricos y partición de la deformación. Pueden incluirse los efectos progresivos de la presión litostática, además de las perturbaciones térmicas locales, los cambios de presión de poro por deshidratación, sin descartar los cambios episódicos del campo de esfuerzos desviatóricos, todos ellos actuando de manera simultánea.

Uno de los aspectos de mayor relevancia del metamorfismo relacionado a los cinturones orogénicos es el entendimiento de los procesos de retrogresión: i) por la concepción de los cambios termodinámicos durante el proceso de exhumación de rocas que estuvieron a grandes profundidades y temperaturas; ii) el estudio de las interacciones fisicoquímicas que se observan en los sistemas idóneos para generar condiciones de equilibrio termodinámico, dando como resultado facies metamórficas estables.

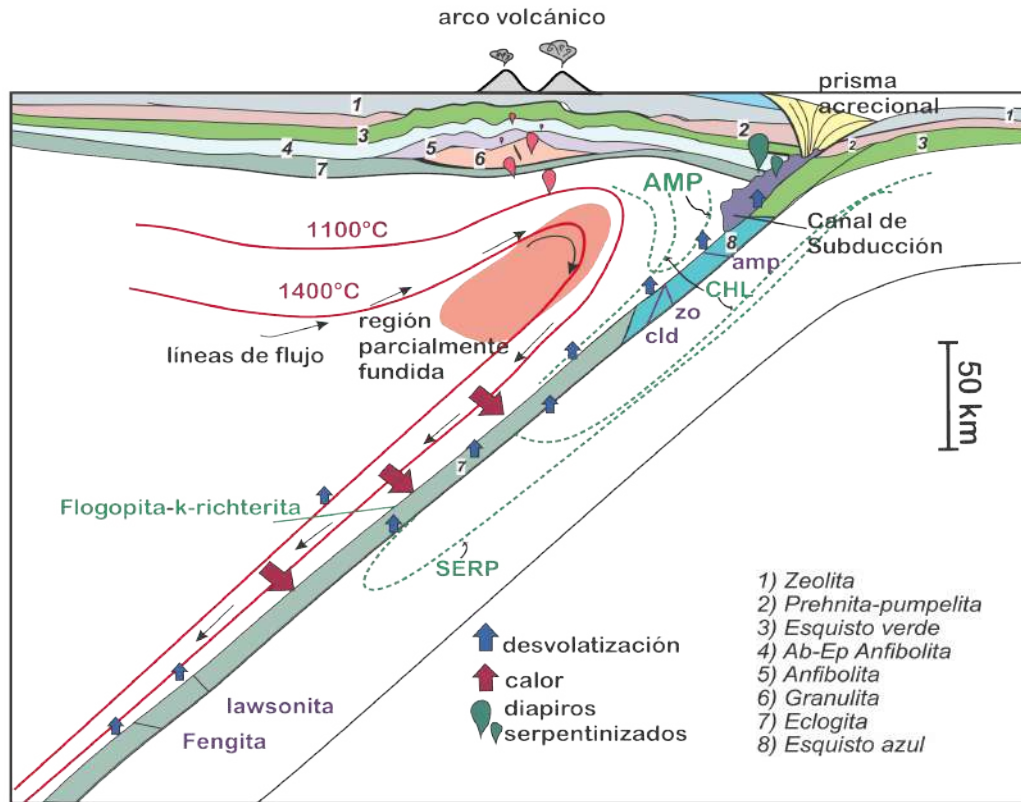


Figura 2.1: Diagrama esquemático de los principales procesos que rigen la dinámica de la zona de subducción, así como la representación esquemática de las zonas representativas de las distintas facies metamórficas. Modificado de (Schmidt and Poli, 1998). Las etiquetas de minerales representan los campos de estabilidad potencial de las fases de soporte volátil. La deshidratación de la cuña del manto se da en profundidades de hasta 150-200 km, por lo que en general el agua está disponible por encima de la litosfera que subduce. La región roja de la cuña del manto tendrá una cantidad significativa de masa fundida dando origen al frente volcánico. Las flechas azules indican el ascenso del líquido, las flechas en rojo indican el flujo de calor que funde la placa. Las flechas negras indican el flujo en la cuña del manto. Las líneas punteadas delimitan los campos de estabilidad de las fases hidratadas en la peridotita; Sin embargo, no implica que la peridotita subyacente a la corteza oceánica esté completamente hidratada. En la corteza oceánica, las temperaturas pueden ser lo suficientemente bajas como para que la fengita alcance su máxima estabilidad de presión; No obstante, en condiciones más calientes (subducción más lenta, ángulo más bajo, corteza más joven) la zoisita será la última fase libre de potasio en generarse. SERP-serpentinización; CHL-Zona de clorita; AMP-zona de anfibolita.



Los cambios químicos asociados con la deshidratación y rehidratación en los ambientes de subducción implican un amplio espectro de posibles reacciones que afectan directamente a los cambios de facies que tuvieron lugar durante los procesos de profundización y exhumación; por lo tanto, para su estudio será necesario restringir y acotar las variantes implicadas, reduciendo así las posibles reacciones involucradas.

Una reacción metamórfica se concibe como una expresión matemática y química de cómo las fases minerales llegan a transformarse desde una composición inicial a un estado final en un lugar en la corteza terrestre, impulsada por cambios energéticos ( $\Delta P$  y  $\Delta T$ ) que tienen lugar durante el metamorfismo (Spear, 1995).

Se representan mediante ecuaciones químicas que generan paragenesis minerales estequiométricamente estables bajo las nuevas condiciones de temperatura y presión, en otras palabras, consiguiendo un equilibrio termodinámico.

Existe una infinidad de cambios mineralógicos que se producen durante una reacción metamórfica por medio de procesos como recristalización de fases preexistentes y/o difusión, generalmente en estado sólido. Cabe recalcar que, una reacción metamórfica no necesariamente nos dice el camino o pasos que la roca tomó para llegar al estado final, no obstante, es posible deducir el camino metamórfico que tomó la roca, mediante el estudio del contexto geológico y mecanismo fisicoquímico que da lugar a la reacción.

Por otro lado, la dinámica de los fluidos que interactúan durante la subducción tiene un papel preponderante en las reacciones. La fase fluida ayuda como catalizador en las reacciones químicas y dependiendo del proceso:

- i) Los fluidos que se obtienen en la deshidratación de la roca que desciende (rocas sedimentarias), a medida que aumenta la presión, la porosidad de las rocas disminuye, y por lo tanto esta fase fluida probablemente es “bombeada” o expulsada de la roca.
- ii) Conjuntamente puede haber/no haber fluidos que se encuentran de forma estructural en las moléculas de los minerales (ejemplo: micas, anfíboles).

Si nos posicionamos en el contexto geológico de convergencia, dichos fluidos pueden ascender en un complejo de subducción por fracturas y zonas de cizalla, y pueden rehidratar a las rocas previamente metamorfoseadas.

También es de resaltar que, las reacciones químicas ocurren más rápido a temperaturas más altas. Durante el metamorfismo prógrado los límites de la reacción están continuamente sobrepasando temperaturas más altas. A mayor temperatura, las tasas de difusión y la vibración molecular necesaria para romper los enlaces químicos son mayores. Así, durante el metamorfismo prógrado las tasas de reacción son más rápidas. A medida que baja la temperatura, las velocidades de reacción son mucho más lentas, es decir, durante el levantamiento y exhumación, las asociaciones minerales retrógradas requerirían mayor tiempo para formarse (Bucher and Grapes, 2011).

Otro ejemplo de la importancia de los fluidos es que, sin la fase fluida es imposible formar minerales hidratados y carbonatos, ya que no pueden estar presentes  $H_2O$  y  $CO_2$ , dos de los componentes clave necesarios en tales reacciones, debido a esto, tampoco podría producirse una paragenesis mineral retrógrado a medida que se bajan la presión y la temperatura.

Las rocas máficas de la placa oceánica subducida suelen experimentar un “*bucle*” o ciclo de P-T, donde se suscitan incrementos/decrementos pequeños durante su descenso y ascenso dentro del canal de subducción, cruzando las facies de esquisto azul, entrando en las facies de eclogita y volviendo a las facies de esquisto azul (Van Der Straaten et al., 2008).

En algunos casos la rehidratación de las eclogitas potencialmente puede generar esquistos azules en donde el glaucófano, la albita y la lawsonita reemplazaron parcialmente a la onfacita y al granate de las eclogitas. Dado que se asume que las eclogitas son anhidras y no aportan  $H_2O$  para la generación de minerales hidratados, se espera que la contribución de los fluidos sea derivada del volumen de rocas circundante (sedimentos dentro del canal de subducción) que rehidratan a las eclogitas (Van Der Straaten et al., 2008).

Una vez rehidratadas, los dominios anfibolitizados siguen una ruta de exhumación cerca de la línea de saturación de  $H_2O$ . En estas condiciones, fases como el granate se consume casi por completo durante la exhumación y se tiene formación de hornblenda y epidota.

Por otro lado, si hay agua disponible, debemos considerar la permeabilidad. Las rocas de grano grueso suelen ser menos permeables y, por lo tanto, podrían tener las tasas de reacción más lentas; en cambio, las rocas de grano fino facilitan las reacciones, dado que tienen una mayor relación de área de superficie de mineral con respecto al volumen.

Otro aspecto a considerar es que las reacciones de hidratación liberan grandes cantidades de energía: Por ejemplo, Bucher and Frey (2002) estimaron que la reacción de Clinopiroxeno + Plagioclasa = Prehnita + Clorita + Zeolita liberaría suficiente energía para elevar la temperatura de las rocas al menos unos  $100\text{ }^\circ\text{C}$  en condiciones aisladas (sistemas cerrados, sin difusión significativa de calor hacia el exterior).

Por lo tanto, los reactantes son metaestables, sin embargo, las reacciones se completarán incluso en los grados bajos. Si las temperaturas son muy bajas, las barreras cinéticas interfieren, es decir el potencial químico que es el que propulsa la reacción se minimiza y las reacciones se detendrían antes de completarse (White et al., 2008), en este caso las texturas ígneas relictas son comunes bajo estas condiciones.

En un sistema cerrado en equilibrio, los cambios en el potencial químico ocurrirán como resultado de los cambios en la presión y temperatura (ecuación 2.1). A presiones

y temperaturas constantes no hay cambio en el potencial químico en equilibrio (ecuación 2.2). Es decir, el equilibrio es el punto dónde el potencial químico de todos los componentes se minimiza.

A su vez, la minimización de la energía de Gibbs es el medio por el cual se puede calcular el estado estable de un sistema (equilibrio) en función de la presión, la temperatura (propiedades intensivas) y la composición química (propiedad extensiva) a partir de datos termodinámicos. En este contexto, se puede deducir la mineralogía de la roca, así como sus propiedades elásticas y calóricas en función de las variables intensivas y extensivas mencionadas previamente.

## 2.2. Conceptos termodinámicos

Como ya se señaló anteriormente, para poder evaluar la estabilidad de un sistema químico se utiliza la energía libre de Gibbs, bajo un conjunto particular de condiciones. Un sistema químico debería evolucionar a un estado apropiado que minimice el parámetro de energía. Es decir, a un estado con la menor energía libre de Gibbs, por lo tanto, se puede decir que la energía libre de Gibbs cuantifica el contenido energético útil de los sistemas químicos; de igual manera, la energía interna extra en el sistema que genera una reacción y está definida matemáticamente como:

$$G = U + PV - TS \quad (2.1)$$

Donde,  $G$  es la energía libre de Gibbs,  $U$  es la energía interna,  $P$  es la presión,  $V$  el volumen,  $T$  es la temperatura absoluta en Kelvin y  $S$  es la entropía.

Diferenciando y combinando la primera y la segunda ley de la termodinámica, tenemos:

$$dG = VdP - SdT \quad (2.2)$$

Estas ecuaciones son aplicables estrictamente a sistemas de un componente (o de composición fija). Sin embargo, las rocas son sistemas químicos más complejos que exhiben una gran variabilidad química. Esta variación en la composición química se puede expresar en términos del potencial químico (o energía interna parcial molar), es una propiedad termodinámica intensiva y expresa la variación de la energía libre de Gibbs correspondiente a un cambio en el ( $n_i$ ) número de moles de  $i$  componentes, cuando  $T$ ,  $P$  y  $n$  de otras especies  $j$  son constantes.

$$\mu_i = \left( \frac{\partial G}{\partial n_i} \right)_{T,P,n_j} \quad (2.3)$$

Donde  $\mu_i$  es el potencial químico, cuando el sistema depende de un cierto número de componentes la energía libre de Gibbs estará en función de dichos componentes, expresándose como:

$$G = \sum_i n_i \left( \frac{\partial G}{\partial n_i} \right)_{T,P,n_j} = \sum_i n_i \mu_i \quad (2.4)$$

Diferenciando:

$$dG = \sum_i n_i d\mu_i - \sum_i n_i \mu_i dn_i \quad (2.5)$$

Utilizando la ecuación de la energía libre de Gibbs con el potencial químico e igualando con la ecuación (2.5), obtenemos la relación Gibbs-Duhem:

$$dG = VdP - SdT + \sum_i n_i dn_i = \sum_i \mu_i dn_i - \sum_i n_i d\mu_i = \sum_i n_i d\mu_i = VdP - SdT \quad (2.6)$$

Entonces si  $P$  y  $T$  son constantes:

$$\sum_i n_i d\mu_i = 0 \quad (2.7)$$

Lo que indica la dependencia de  $\mu_i$  de  $T$  y  $P$ .

## 2.3. Reacciones metamórficas en condiciones de alta presión y baja temperatura

El trabajo petrológico realizado a principios de los años ochenta sobre la evolución de las rocas máficas metamorizadas en facies de esquistos azul, anfíbolita y eclogita (Thompson et al., 1982) ha demostrado que las relaciones de fase en este sistema están dominadas por reacciones continuas. En este caso, la composición de la roca total ejerce un control importante sobre el campo de estabilidad de la paragenesis mineral.

En condiciones de presión inferiores a  $\sim 2,5$  GPa, los anfíboles sódicos, la clorita y la albita y/o clinopiroxenos coexisten con lawsonita o zoisita a lo largo de las trayectorias P-T para las zonas de subducción. Fases relacionadas a la primera fase de subducción de basaltos, es decir, a la progresión hacia condiciones de alta temperatura y presión, se mueven a los campos de clorita y anfíbol sódico y al campo anfíbol-eclogita, donde el anfíbol Na-Ca coexiste con grandes cantidades de clinopiroxeno, y el granate es primordialmente la fase aluminica estable en el lugar de la clorita (Poli and Schmidt, 2002).

Actualmente, es fundamental el entendimiento de los procesos de retrogresión que van de la mano con los cambios termodinámicos que se dan en un sistema tectónico. Y

a su vez, conocer las condiciones propicias para llevar a cabo los cambios químicos por los cuales el sistema (roca) llega al equilibrio, resultando en facies metamórficas estables (Fig. 2.2).

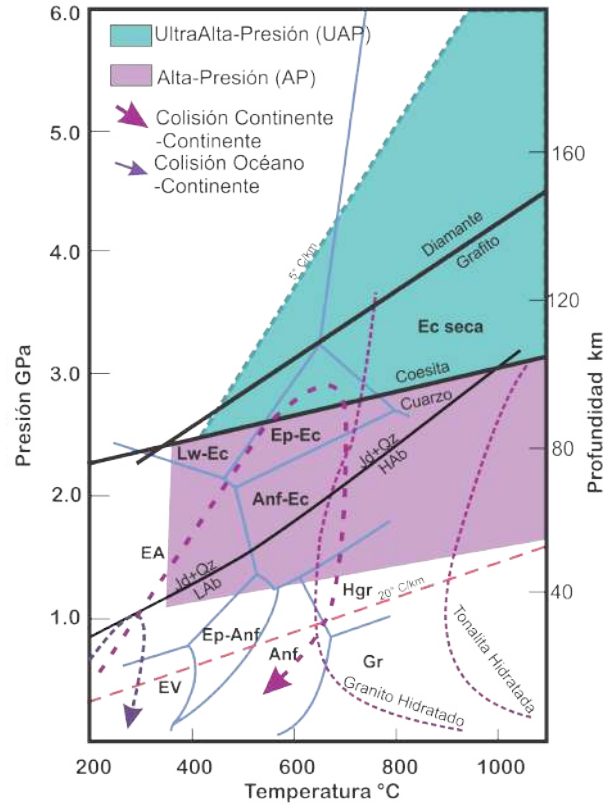


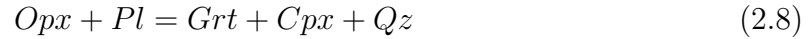
Figura 2.2: Diagrama P-T con campos de facies metamórficas y líneas de estabilidad mineral,  $Jd+Qz=Ab$ , Coesita-Cuarzo, Diamante-Grafito; curvas de fusión de granito hidratado, tonalita hidratada; gradiente de temperatura a  $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$  y  $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ , y ejemplos de trayectorias para colisiones continentales (rosa) y colisión Océano-Continente (morado). Tomado de Liou et al. (2004); Ernst and Liou (2008). Abreviaciones: Lw: Lawsonita, Ec: Eclogita, Ep: Epidota, Anf: Anfibolita, EV: Esquisto verde, EA: Esquisto Azul, Jd: Jadeita, Qz: Cuarzo, HAb: Albita Alta, LAB: Albita Baja, Gr: Granulita, HGr: Granulita Alta.

### 2.3.1. Facies de Eclogita

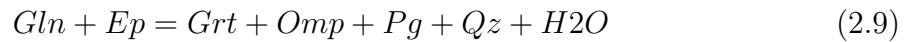
La asociación típica en eclogitas está definida por la presencia de granate (típicamente piropero y grosularia) más onfacita (*Omp*), adicionalmente incluye minerales accesorios como la cianita (*Ky*), el cuarzo (*Qz*) y el rutilo (*Rt*) (Spear, 1995)(Fig. 2.3).

La transición de anfibolita a eclogita abarca un amplio campo de presión y temperatura. El anfíbol puede generarse con piroxeno y granate mediante una serie de reaccio-

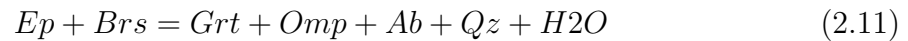
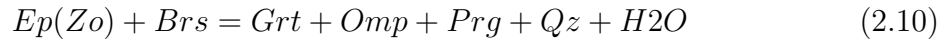
nes, por ejemplo, la paragénesis  $Grt + Amp(Tr) + Ep(Czo) + Pl(Ab) + Cpx(Di) + Qz + fluido$  es común en un gran número de terrenos metamórficos (Bucher and Grapes, 2011). En general, estas fases minerales son muy complejas ya que las variaciones están en función de las soluciones sólidas (reacciones continuas) que describen a los minerales. Una de las reacciones continuas que describen este tipo de transición es:



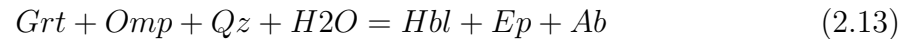
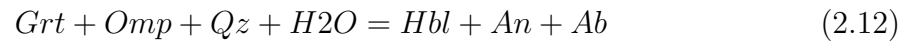
Y la sugerida por Reinsch (1979) y Ridle (1984):



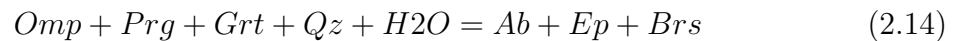
o por Krogh (1980a) y Takasu (1984):



Mientras que la transición de la eclogita a la anfibolita puede ser descrita mediante las reacciones sugeridas por Takasu (1984) en condiciones de 550-650 °C y 10-13 kbar:



Dónde la reacción 2.18 delimita la transición de eclogita a facies de anfibolita con epidota. Maresch (1977) y (Maresch and Abraham, 1981) proponen que, durante la descompresión en rangos de 450-570 °C y 11.5-13.5 kbar, la reacción de transición es:



### 2.3.2. Facies de Anfibolita

La asociación general en las anfibolitas está representada por la presencia predominante de anfíbol (en particular hornblenda) en asociación con plagioclasa y en menor cantidad cuarzo. En condiciones de baja temperatura, a las facies de anfibolita se les asocia fases minerales de granate y epidota, además de que puede haber presencia de  $Cpx$  en condiciones de más alto grado (Fig.2.3). Las reacciones de transición de eclogita a anfibolita se describen en la siguiente sección.

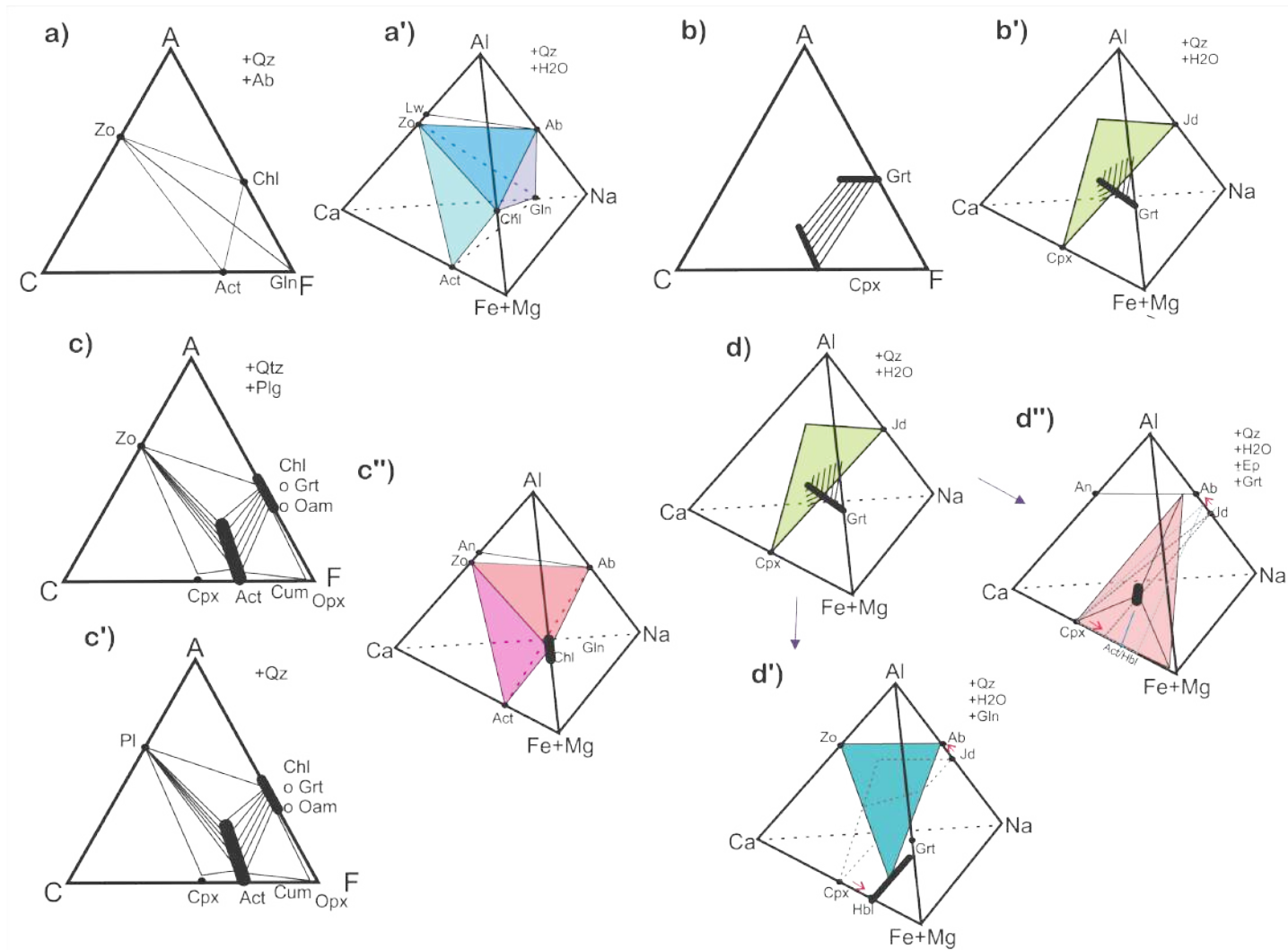
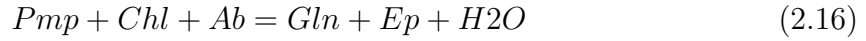
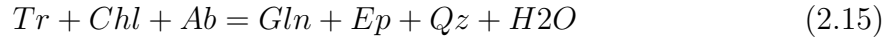


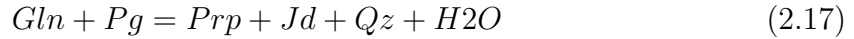
Figura 2.3: Diagramas ternarios ACF, representan la paragénesis mineral para cada facie metamórfica; y Proyecciones tetragonales para ACFM del sistema CKFMASH, muestran la compatibilidad de los minerales que generan las paragénesis diagnóstico para cada facie: a) y a') facies de esquist azul, la asociación diagnóstico es:  $Gln + Ep$ . b) y b') facies de eclogita, asociación diagnóstica:  $Grt + Cpx$ . c) y c') facies de Anfibolita-Epidota:  $Hbl + Ep + Pl$  y de Anfibolita:  $Hbl + Pl$  respectivamente, c'') proyección de facies de Anfibolita-Epidota. Modificadas de Spear (1995). d) Proyecciones de la transición de facies de eclogita: d') facies de esquist azul y d'') facies de anfibolita. Oam=Orto-Anfibol.

### 2.3.3. Facies de Esquistos azul

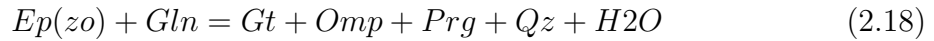
La asociación diagnóstica es la presencia de glaucófano (*Gln*) y lawsonita (*law*) o Epidota (*Ep*) (Fig. 2.3). Existen varias reacciones que pueden generar glaucófano y que definen la transición hacia las facies de esquistos azul. La paragénesis jadeíta (*Jd*) + cuarzo (*Qz*) indica alta presión en facies de esquistos azul. La generación de glaucófano puede ser explicada por las siguientes reacciones (Bucher and Grapes, 2011):



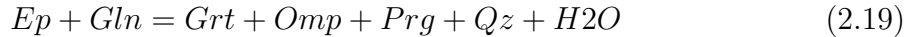
La transición de facies de esquistos azul a facies de eclogita, a presiones por arriba de los 12 *kbar*, involucra la reacción del glaucófano y la paragonita (*Pg*) para formar la paragénesis *Grt+Omp* según Winter (2001).



Por otro lado, en condiciones de 13-22 *kbar* y temperaturas de ~440-650 °C (Holland, 1979; Reinsch, 1979; Ridley, 1984; Droop, 1990) se puede producir la reacción:



La propuesta de Reinsch (1979), en condiciones de 440-650 °C y 13-22 *kbar*:

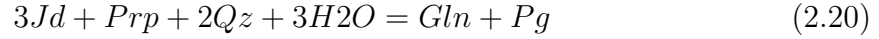


## 2.4. Retrogresión: Reacciones metamórficas de Eclogitas a Esquistos Azul y Eclogita a Anfibolita

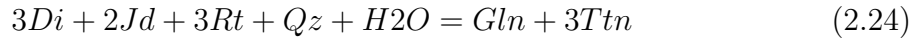
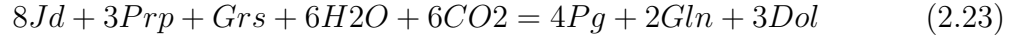
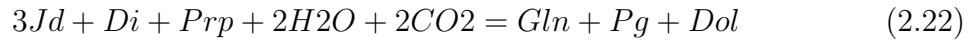
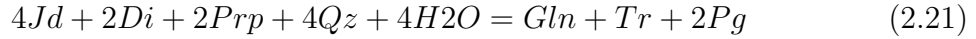
Las etapas de retrogresión del metamorfismo se caracterizan por varias reacciones. La transformación retrógrada de eclogita a esquistos azul puede ser descrita por las reacciones propuestas por Evans (1990); Gao and Klemd (2001) (reacciones 2,20–2,24), además de que la transformación de eclogita a esquistos azul también puede ser deducida con base en las texturas de reacción mineral, pueden y deben ser observadas en el



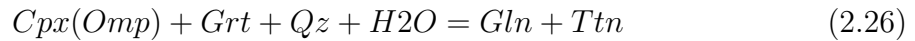
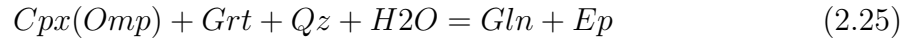
dominio de eclogita preservado o relicto. La titanita puede formarse de la interacción del rutilo con las otras fases presentes en las eclogitas (Van Der Straaten et al., 2008).



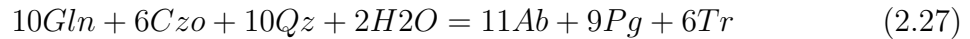
Reacción intermedia entre el glaucófano y la tremolita:



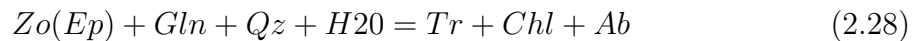
Aunque también la reacción:  $Jd + Lws + Rt = Pg + Ttn + H_2O$  puede generar  $Ttn$ . Li et al. (2017) proponen que a una profundidad de  $\sim 60$  km durante la exhumación, en condiciones hidratadas ocurren reacciones de retrogresión a facies de esquisto azul como:



La clinzoisita puede estar relacionada con la reacción (2,27), la cual sólo puede llevarse a cabo si hay cantidades suficientes de agua en compañía de anfíbol sódico, esto ocurre primordialmente en esquistos azules pero no se ha observado en eclogitas, es decir, únicamente representarían a los esquistos azules en retrogresión.

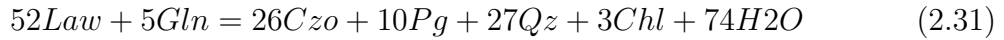
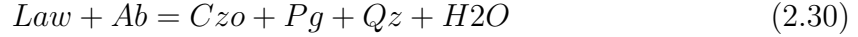
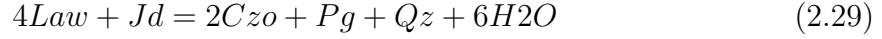


Por otro lado, para los límites entre las facies de esquisto azul y esquisto verde se define la reacción:

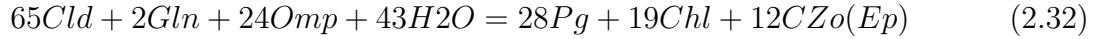


Y se toma de manera convencional la reacción  $Gln + Czo = Hbl + Chl + Ab$  como el límite del rango de baja presión para las facies de esquisto azules (Maruyama et al., 1986).

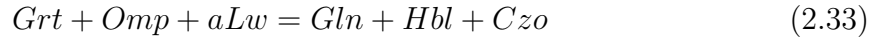
A su vez, las reacciones sugeridas por Evans (1990) para obtener las fases de epidota-clinozoicita (*Czo*) son:



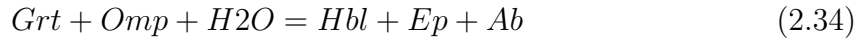
En caso de existencia de cloritoide, la reacción que generaría epidota será:



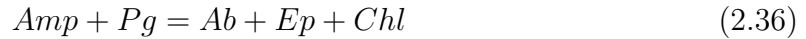
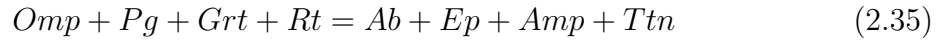
Y las relaciones propuestas por Carson (2000) a temperaturas límites de  $\sim 540$ - $570$  °C para generar glaucófano son:



La transición de eclogita a anfibolita puede ser descrita por una variedad de reacciones que requieren de  $H_2O$  y esto resulta en la remoción del sílice:



las propuestas por Carmichael (1969):



Incluso también obtenido así:  $CPx + Pg + Qz = Amp + Ab + Czo + H_2O$ , sugerida por Molina and Poli (1998).

La desintegración del granate en otras fases durante la retrogresión puede haber tenido lugar con la reacción (2,37), mientras que para la reacción (2,38) sólo es posible en entornos ricos en fluidos en condiciones de oxidación.





Es muy común que la descompresión de *Cpx* puede generar crecimiento simpléctico de *Ab + Wnc + Cpx* y de *Ab + Hbl*. Y de *Opx + Ab* obtenido de la reacción  $Grt + Cpx(Omp) + Qz = Opx + Ab$  (Nakano et al., 2004).

# Capítulo 3

## Petrografía

En este capítulo las características descritas de forma simplificada son: textura y paragénesis. Las descripciones de las muestras están ordenadas conforme a la estructura del cinturón de alto grado, orientado en dirección Suroeste-Noreste dentro del Ensamble Piaxtla (Fig. 1.1 y Tab. 1.1).

### 3.1. Ixcamilpa

Las eclogitas con retrogresión a facies de anfíbolita (Fig. 3.1 a y b), presentan un dominio granoblástico constituido de plagioclasa anhedral, cuarzo subhedral-anhedral y porfidoblastos/porfidoclastos subhedrales de granate (*Alm*) con diámetros de  $\sim 2$ -5 mm, en algunas muestras el tamaño de grano varía de fino a medio. Algunos granates están rotados, presentan una foliación interna plegada y los de mayor tamaño están zoneados, muchos de ellos presentan una textura poiquiloblástica, con inclusiones de cuarzo (mayormente en el núcleo) y en menor proporción rutilo y circón. Además, estos porfidoblastos tienen sombras de presión de plagioclasa y cuarzo, están inmersos en una matriz de textura lepidoblástica de mica blanca (*Ph/Ms*) y clorita (*Chl*). Bandas de anfíbol subhedral de  $\sim 0.3$ -0.7 mm en contacto con epidota y piroxenos con bordes corroídos.

Los clinopiroxenos (*Omp*) son granulares de  $\sim 0.5$ -1 mm de largo, tienen bordes corroídos y están sustituidos por anfíbol (*Act*), están en contacto con granate y rutilo. Como minerales accesorios se identificaron, cuarzo, ilmenita y esporádicamente circón y apatito. Además, se observan simplectitas de grano fino en anfíbol y plagioclasa.

La paragénesis observada en el dominio granoblástico es de granate (*Alm*) + clinopiroxeno (*Omp*) + rutilo (Rt)  $\pm$  cuarzo (*Qz*), en el dominio lepidoblástico: mica blanca

(*Ph/Ms*) + clorita (*Chl*). Los porcentajes modales son de  $\sim 45\%$  de granate,  $\sim 35\%$  de *Cpx*-onfacita, de un  $\sim 3-4\%$  de rutilo,  $\sim 3\%$  de cuarzo y  $\sim 16\%$  de plagioclasa.

Las anfibolitas (Fig. 3.1, c, d y e) ostentan una textura nematoblástica, constituida de anfíbol (*Ca*, *Na*) subhedral-anhedral de  $\sim 0.5-1$  mm. En algunas muestras los cristales de anfíbol están fracturados por flujo cataclástico, además, tienen bordes de reacción de clorita en contacto con plagioclasa (*Ab*) anhedral de  $\sim 0.2-0.5$  mm y cristales de granate. Los granates (*Alm*) tienen formas euhedrales-subhedral de  $\sim 0.4-3$  mm con texturas poiquiloblásticas, con múltiples inclusiones de cuarzo y rutilo, algunos con bordes de reacción sustituidos por clorita. Algunas muestras presentan variaciones en cuanto al tamaño y abundancia del granate. También, se observan dominios lepidoblásticos de mica blanca (*Ph/Ms*), clorita y epidota (Fig. 3.1, e). La asociación mineral de las anfibolitas es anfíbol (*Ca*, *Ca-Na*) + granate (*Alm*) + plagioclasa (*Ab*) + epidota (*Ep*) + mica blanca (*Ph/Ms*)  $\pm$  cuarzo (*Qz*) (Tab. 3.1). En algunas muestras se observa crecimiento de mica (*Bt*) en contacto con epidota y anfíbol, y ocasional crecimiento de calcita (*Cal*).

Los esquistos azules estudiados en esta localidad (Fig. 3.1, f) tienen una textura nematoblástica con un marcado bandeamiento de anfíbol (*Gln*) subhedral de  $\sim 1$  mm de largo, con bordes de reacción y remplazamiento por clorita (*Chl*), intercalado con bandas de epidota (*Ep*) subhedral de  $\sim 0.5-1.5$  mm, estable con mica blanca (*Ph/Ms*) y en contacto con plagioclasa (*Ab*) subhedral de  $\sim 0.5$  mm. La paragénesis principal observada es de anfíbol-Na (*Gln*) + epidota (*Ep*) + mica blanca (*Ph/Ms*) + cuarzo (*Qz*)  $\pm$  plagioclasa (*Pl*) (Tab. 3.1). También, se observan minerales opacos euhedrales de  $\sim 0.2-0.5$  mm.

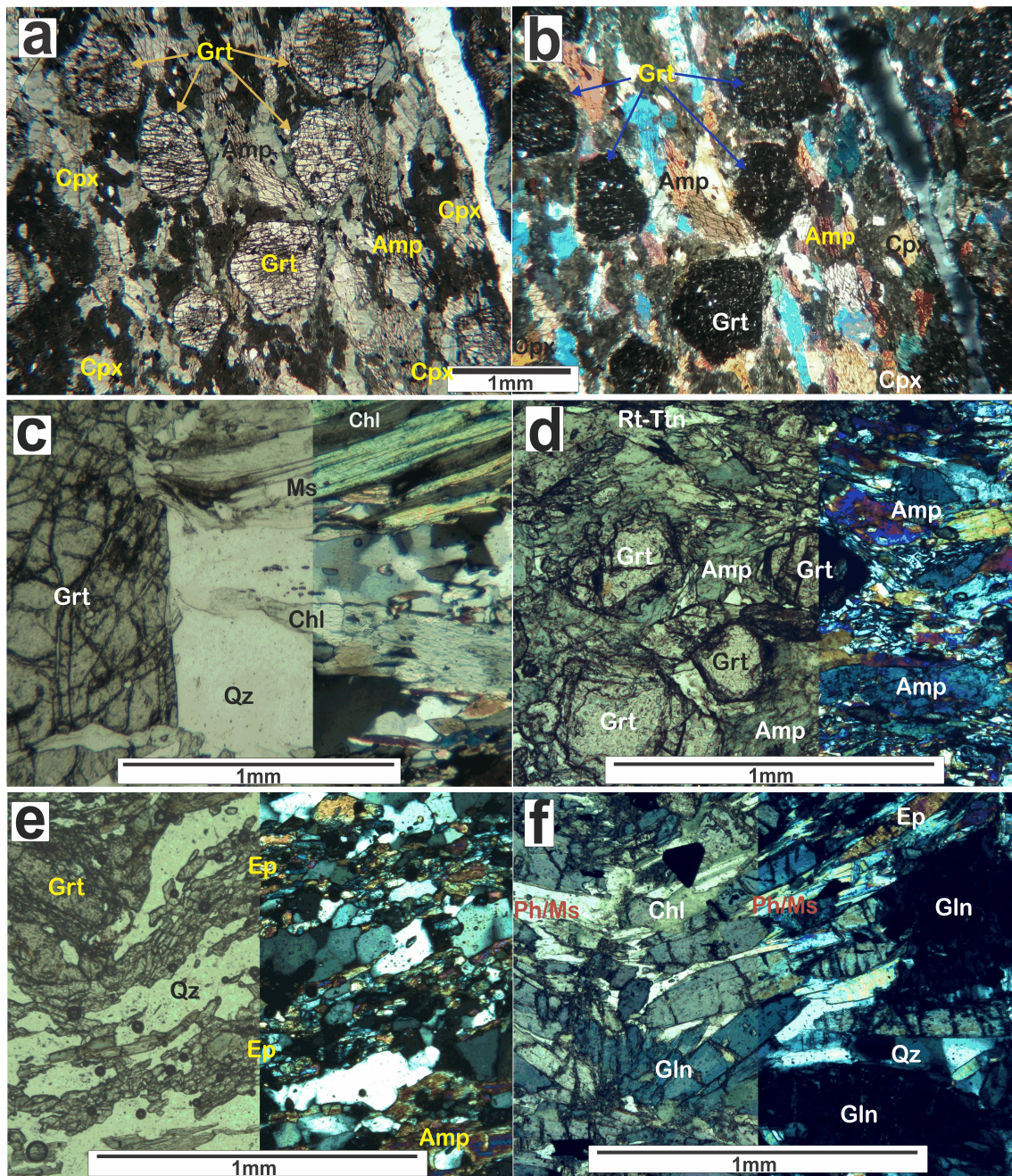


Figura 3.1: Micrografías de secciones delgadas del área de Ixcamilpa. a y b ) Lámina delgada de una eclogita retrógrada en la que se preserva la asociación Grt + Cpx + Rt, con poiquiloblastos de Grt con inclusiones de Qz y Rt. Nícoles paralelos y cruzados respectivamente (PIAX-04). c) Dominios granoblásticos de granate y cuarzo, y dominios lepidoblásticos representados por mica blanca (IX-151). d) Anfibolita granatífera con deformación cataclástica (IX-167). e) Foliación interna de bandas de epidota con mica blanca (IX-164b). f) Textura nematoblástica en esquistu azul, asociación Gln + Ep + Ph/Ms + Qtz (IX-184). Micrografías en nícoles paralelos y cruzados.



### 3.2. Piaxtla-Tecomatlán

Las eclogitas presentan una textura granoblástica inequigranular, el tamaño de los cristales varía de fino a medio entre las distintas muestras. Los granates tienen formas subhedrales de  $\sim 1\text{-}5$  mm de diámetro, los de mayor tamaño están zoneados y presentan una textura poiquiloblástica con múltiples inclusiones de cuarzo (mayormente en el núcleo) y en menor proporción rutilo y circón. A su vez, los granates están en contacto con clinopiroxenos (*Omp*) tabulares de  $\sim 0.5\text{-}1.5$  mm de largo con bordes corroídos y bordes simplectíticos de *Cpx + Pl*. La matriz contiene en menor cantidad cuarzo y se observan granos diseminados de titanita y rutilo en contacto con ilmenita. Esporádicamente se observa apatito secundario.

La paragénesis principal de las eclogitas es de granate (*Alm*) + *cpx(Omp)* + rutilo (*Rt*)  $\pm$  cuarzo (*Qz*) (Fig. 3.2, Tab. 3.1). Los porcentajes modales obtenidos son de  $\sim 45\%$  de granate (*Alm*),  $\sim 35\%$  de clinopiroxeno (*Omp*),  $\sim 3\text{-}4\%$  de rutilo y  $\sim 3\%$  de cuarzo.

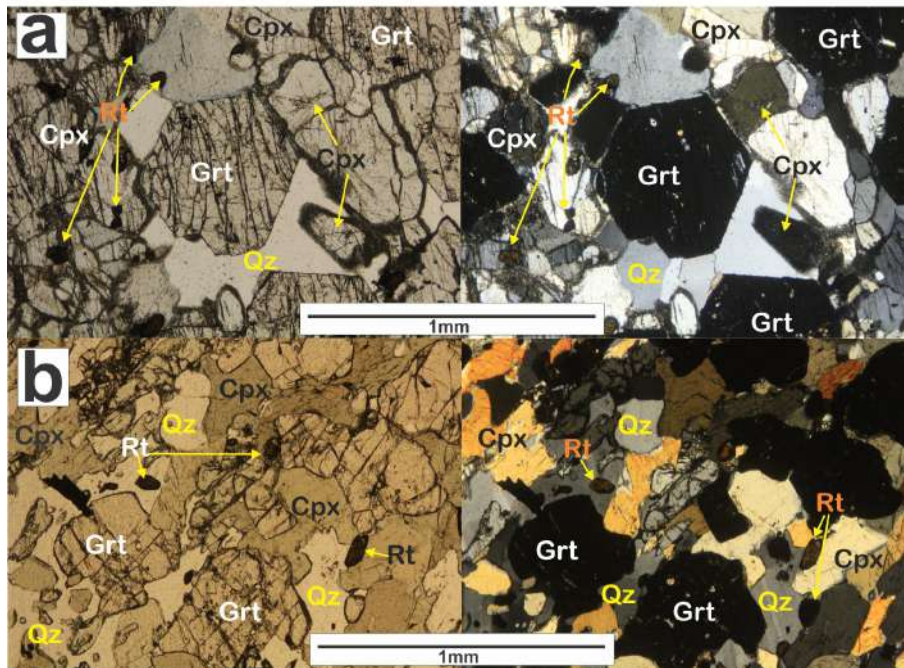


Figura 3.2: Micrografías de secciones delgadas del área de Tecomatlán-Piaxtla. a y b) Paragenésis mineral típico de facies de eclogita, granos de Cpx (*Omp*) subhedral-anhedral y cuarzo que forman la matriz, algunos granos de Cpx presentan bordes parcialmente alterados, porfiroblastos de granate con múltiples facturas y granos de rutilo diseminados en la matriz. (PIAX-15, PIAX-Z3) Mostradas ambas en nícoles paralelos y cruzados.

### 3.3. San Francisco de Asís (Asís)

En las eclogitas se observa una textura predominantemente granoblástica inequi-granular, porfidoblastos de granate subhedrales de  $\sim 2-5$  mm, los granates de mayor tamaño están visiblemente zoneados y presentan textura poiquiloblástica con abundantes inclusiones (en el núcleo) de cuarzo, rutilo e ilmenita. Los de menor tamaño no presentan inclusiones y tienen zoneamiento escaso o nulo. Los granates están en contacto con clinopiroxeno (*Omp*) granulares de  $\sim 0.5-1.5$  mm, presentan bordes corroídos y sustituciones parciales simplécticas de *Cpx* y *Pl*, están en contacto con anfíbol. Los anfíboles tienen forma subhedral-euhedral de  $\sim 1-2$  mm y se encuentran presentes en la matriz junto con cuarzo y rutilo.

La paragenésis mineral típicamente está compuesto por granate (*Alm*) + *cpx*(*Omp*) + rutilo (*Rt*)  $\pm$  cuarzo (Fig. 3.3 a y b). Los porcentajes modales son de  $\sim 46-47\%$  de granate,  $\sim 26\%$  de onfacita,  $\sim 12-13\%$  de anfíbol,  $\sim 5-6\%$  de plagioclasa,  $\sim 3-4\%$  de rutilo-titanita,  $\sim 1-5\%$  de mica blanca,  $\sim 5-6\%$  de cuarzo y clorita con un  $\sim 1-2\%$ .

En las anfibolitas se observan bandas de textura nematoblástica, constituida de anfíbol subhedral de  $\sim 0.2-1$  mm, algunos anfíboles presentan crecimiento de clorita en sus bordes y están en contacto con plagioclasa. La plagioclasa exhibe un hábito subhedral de  $\sim 0.4-1$  mm, de textura poiquioblástica con maclado polisintético y mecánico (Fig. 3.3 c y d), contienen inclusiones de piroxeno y rutilo, además se observa una fase de exsolución (simplectitas). Las micas blancas (*Ph/Ms*) ésta generalmente junto a los clinopiroxenos y anfíboles. También se observan esporádicamente apatitos, ilmenitas y rutilos. La asociación mineral de las anfibolitas es anfíbol-Ca + granate (*Alm*) + plagioclasa (*Ab*) + epidota + mica blanca (*Ph/Ms*)  $\pm$  biotita (*Bt*) (Tab. 3.1).



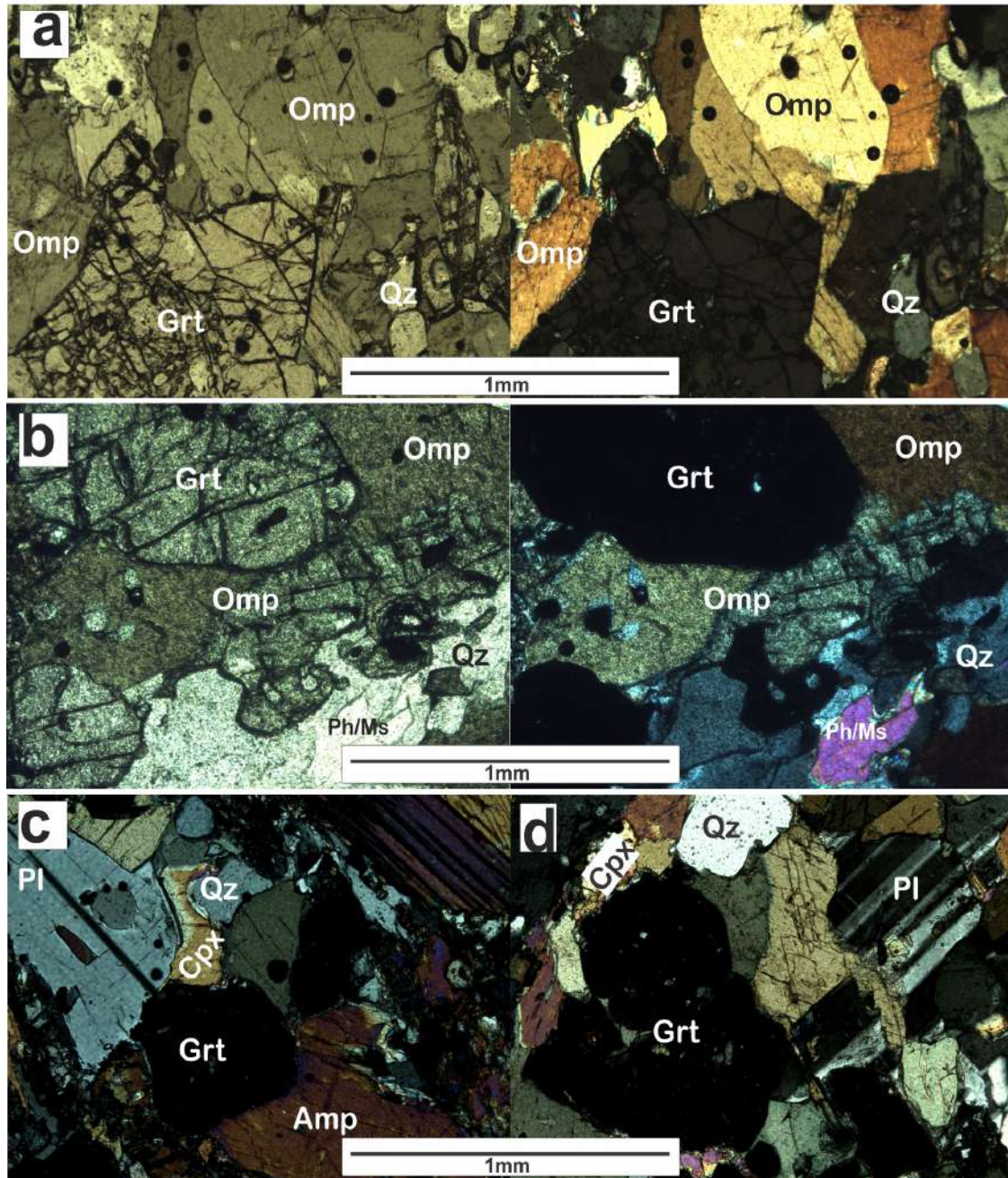


Figura 3.3: Micrografías de secciones delgadas del área de San Francisco de Asís. a) Eclogita (*PIAX* – 27), detalle de la asociación *Grt* + *Cpx*(*Omp*) + *Rt* en meta-basita. b) Detalle de la asociación *Grt* + *Cpx*(*Omp*) + *Rt* + *Qz* con crecimiento de mica blanca (*PIAX* – 13A). En nícoles paralelos y cruzados. c, d) la metaeclogita preserva la paragénesis *Grt* + *Cpx* + *Rt* + *Pl* + *Amp*, facies de anfibolita (*PIAX* – 27, *PIAX* – 28) en nícoles cruzados.

### 3.4. Mimitulco

Los esquistos azules presentan una textura nematoblástica foliada con intercalaciones de dominios granoblásticos y lepidoblásticos, tienen microestructuras de deformación como maclas y micropliegues.

El dominio nematoblastico está conformado por anfíbol-Na (*Gln*) tabular/fibroso, subhedral-anhedral, algunos con zoneamiento y bordes de sustitución por actinolita en anfíboles Na-Ca (winchita, barroisita).

El dominio granoblásticos está formado de plagioclasa anhedral  $\sim 0.5$  mm de textura poiquiloblástica, con maclas y con múltiples inclusiones de cuarzo. La plagioclasa está en contacto con epidota tabular y granular. También se observan apatitos, rutilos, titanitas y óxidos (ilmenita) distribuidos paralelamente a la foliación. En algunas muestras los dominios granoblástico, están intercalados con bandas de epidota subhedral y bandas lepidoblásticas de mica blanca (*Ph/Ms*) y clorita. Asimismo se observan pseudomorfos subhedrales (¿granates?) con  $\sim 1-2$  mm de diámetro, están completamente cloritizados y/o epidotizados (Fig. 3.4 a y c).

La asociación mineral principal es de anfíbol-Na (*Gln*) + epidota  $\pm$  plagioclasa (*Ab*)  $\pm$  mica blanca (*Ph/Ms*)  $\pm$  cuarzo  $\pm$  rutilo (*Rt*) (Tab. 3.1). Los porcentajes modales son de  $\sim 40-50$  % de anfíbol (*Gln*),  $\sim 35-50$  % de epidota,  $\sim 5-6$  % de anfíbol (Ca, Ca-Na),  $\sim 3-4$  % de plagioclasa,  $\sim 1-2$  % de rutilo-titanita,  $\sim 5-10$  % de mica blanca, cuarzo con  $\sim 4-5$  % y clorita con un  $\sim 5-6$  %.

Las anfibolitas exhiben dominios granoblásticos con dominios nematoblásticos. El anfíbol se observa subhedral-anhedral de  $\sim 0.5-1$  mm. El dominio granoblástico formado de cuarzo (con inclusiones de apatito) y plagioclasa inequigranular. La plagioclasa tiene múltiples fracturas y maclas simples. También se observan mica blanca y feldespatos con textura simplectítica, bordes corroídos y crecimiento de sericita. Los granates tienen formas euhedrales-subhedrales de  $\sim 2-5$  mm con texturas poiquiloblásticas con inclusiones mayoritariamente de cuarzo, además algunos cristales ostentan alas de presión de cuarzo y mica.

La paragénesis principal observada es de anfíbol Ca-Na + granate (*Alm*) + epidota + mica blanca (*Ph/Ms*)  $\pm$  cuarzo  $\pm$  piroxeno Ca-Na  $\pm$  plagioclasa (*Ab*)  $\pm$  rutilo (*Rt*) (Tab. 3.1).



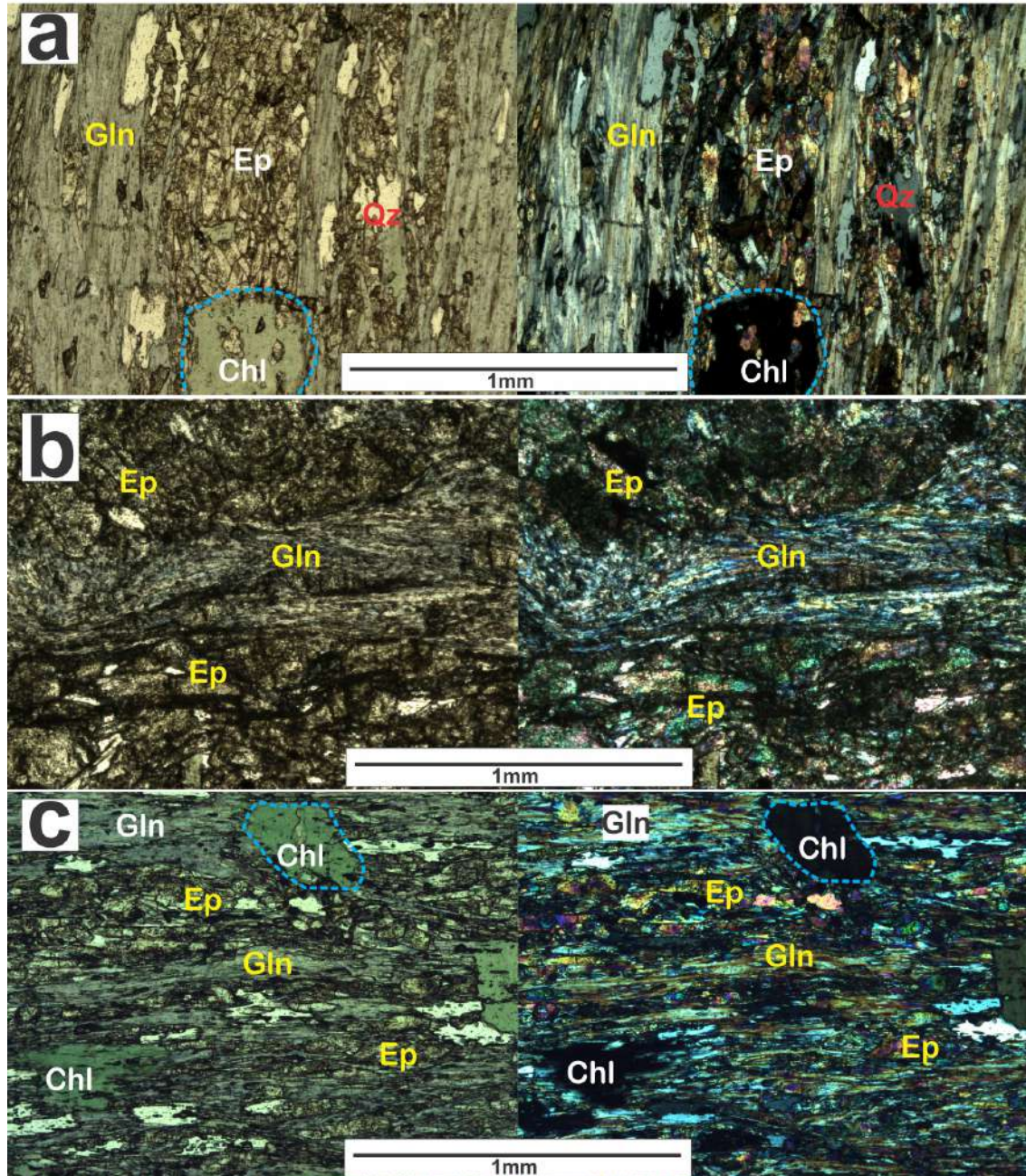


Figura 3.4: Micrografías de esquistos azules en secciones delgadas del área de Mimilulco. a y c) Textura nematoblastica (anfibol-Na, *Gln*) con dominios granoblásticos (*Ep* + *Qtz*), se observan pseudomorfos de granate completamente cloritizado, están punteados en azul (MIM-Z8A, MIM-Z10B). b) Microestructura de micropliegue de anfibol-Na (*Gln*), se observa crecimiento de óxidos con orientación de la foliación e intercalados con la epidota (MIM-Z10A). En nicoles paralelos y cruzados.

Tabla 3.1: Resumen de las paragénesis observadas en las rocas de alto grado del Ensamble Piaxtla. Además, se muestran las asociaciones minerales de las facies retrógradas. Las abreviaciones de las zonas de muestreo son: IX=Ixcamilpa; PT=Piaxtla-Tecomatlán; A=Asis; MIM=Mimilulco. Las abreviaturas minerales usadas son de acuerdo con Whitney and Evans (2010).

	Área	Paragénesis		
		Diagnóstica	Minerales del metamorfismo de retrogresión	
			1 2	
<b>Eclogita</b>	<b>IX</b>	Grt+Cpx+Rt±Qz	Ep+Pl+Amp±Px+Ms/Ph ±Ttn	Amp+Chl±Bt±Ilm±Cal
<b>Anfibolita</b>		Amp+Grt+Pl+Ep+Ms/Ph+Qz ±Ttn	Amp+Chl+Qz±Bt±Rt	
<b>Esquisto azul</b>		Gln+Ep+Ms/Ph+Qz±Pl±Ttn	Amp±Chl±Fsp	±Cal
<b>Eclogita</b>	<b>PT</b>	Grt+Cpx(Omp)+Rt+Qz	Ep+Amp+Pl+Ms/Ph+Ttn	Chl +Ilm
<b>Eclogita</b>	<b>A</b>	Grt+Cpx(Omp)+Rt+Qz	Ep+Amp+Pl+Ttn ±Chl±Ms/Ph	
<b>Anfibolita</b>		Amp+Grt+Pl±Ep±Ms/Ph±Chl ±Bt±Ttn	Amp+Fsp	
<b>Anfibolita</b>	<b>MIM</b>	Amp+Grt+Ep+Ms/Ph +Qz±Ttn	Chl+Ilm	±Cal
<b>Esquisto azul</b>		Amp+Ep+Gln+Pl+Qz±Ttn Gln+Ep+Ms/Ph+Qz±Pl±Ttn Gln+Ep+Plg+Grt?±Ttn	Amp+Chl+Ms/Ph+Ilm	±Fsp±Cal

## Capítulo 4

# Geoquímica de roca total y mineral

Con base en los análisis de microsonda (EMPA)(Ver Anexo B), análisis por fluorescencia de rayos X (Ver Cap. 1, sec. 1.3) y junto con los análisis tomados de diferentes trabajos previos (Ver Anexo A.2), este capítulo pretende ilustrar: i) La composición de las litologías estudiadas (eclogitas, anfibolitas y esquistos azules) y su variación composicional de elementos mayores; ii) Las características químicas de los principales grupos minerales, de acuerdo a las distintas clases químicas. Además, de definir la variabilidad química de las fases y su relación con las paragénesis metamórficas presentes en las litologías asociadas al Ensamble Piaxtla.

### 4.1. Elementos mayores roca total

En los diagramas (Fig. 4.1 a, b y c) se observa que la composición en términos de elementos mayores y la relación  $Zr/TiO_2$  vs.  $Nb/Y$  de las muestras son similares entre sí. Para observar las diferencias y las similitudes entre las rocas estudiadas (eclogitas, esquistos azules y anfibolitas), se utilizaron diagramas de variación composicional, en los elementos mayores ( $MgO$ ,  $Al_2O_3$  u otros componentes minoritarios y relativamente inmóviles como el  $TiO_2$ ), con respecto al contenido de  $SiO_2$ . En general en los diagramas de álcalis total vs. Sílice (i.e.,  $TAS$ ) y el de series toleítica y calco-alcalina de potasio alto (AFM) (Le Bas et al., 1986) se emplearon para representar la variabilidad química preservada durante el proceso metamórfico y no necesariamente representan las composiciones originales de los protolitos.

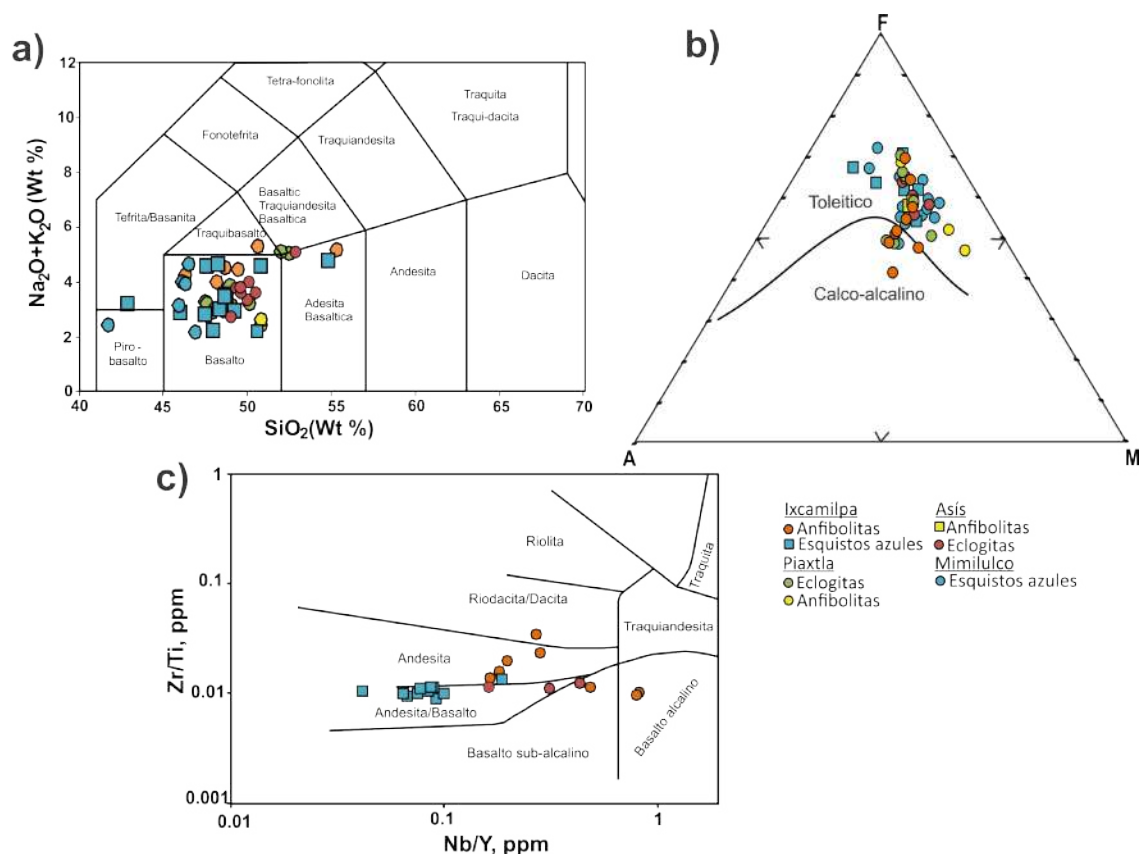


Figura 4.1: Química de roca total de las muestras de roca estudiadas (metabasitas). a) Diagrama de álcalis total vs. sílice (*TAS*) para rocas volcánicas (LeBas et al., 1986). b) Diagrama AFM para diferenciar series toleíticas de las alcalinas (Irvine and Baragar, 1971). b) Diagrama *Zr/TiO<sub>2</sub>* vs. *Nb/Y* de Winchester y Floyd (1977).

Para las eclogitas el contenido en porcentaje en peso (*wt %*) de *SiO<sub>2</sub>* varía de 47.62 % a 52.52 % (Fig 4.1 a); en las anfibolitas el contenido de *SiO<sub>2</sub>* varía de 46.34 % a 55.34 % (Fig. 4.1 a) y en los esquistos azules varía de 43 % a 50.94 % (Fig 4.1 a).

La mayoría de las metabasitas estudiadas presentan una afinidad sub-alcalina, es decir una composición de afinidad basáltica (Fig. 4.1 a) y son similares a lo que muestran las series toleíticas (Fig.4.1 b). Sin embargo, 4 muestras presentan una tendencia en la serie calco-alcalina (Fig.4.1 b).

Las eclogitas tienen un contenido relativamente alto para el hierro (*Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>* total: 10.84-16.79 wt %), el contenido de *MgO* varía de 5.64-9.28 wt %, *Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>* de 12.82-16.00 wt %, *CaO* de 6.58-11.68 wt %, *Na<sub>2</sub>O* con una tendencia que oscila de los 2.12 a 2.81 wt % y con un valor mayor de 4.76 wt %. La proporción *Mg/(Mg + Fe)* varía de 0.26-0.63 wt %, la relación *K<sub>2</sub>O/NaO* varía entre 0.05 y los 0.28 wt %.

Las anfíbolitas muestran patrones similares a de las eclogitas. El  $FeO$  varía entre 7.75-15.58 wt %, el contenido de  $MgO$  varía de 5.98 a 8.41 wt %,  $Al_2O_3$  en 12.87-17.15 wt %,  $CaO$  en 8.05-12.35 wt %,  $Na_2O$  de 2.41 a 4.66 wt %;  $Mg/(Mg + Fe)$  varía en un rango de 0.27 a 0.46 wt %, la relación  $K_2O/NaO$  varía entre 0.05 y los 0.40 wt %.

Los esquistos azules presentan  $FeO$  en rangos de 10.58 a 14.77 wt %,  $MgO$  de 3.29 a 7.64 wt %,  $Al_2O_3$  relativamente alto, varía de 13.87 a 19.57 wt %,  $CaO$  en 7 - 17.89 wt %,  $NaO$  de 1.66 a 4.43 wt % y proporciones de  $Mg/(Mg + Fe)$  que varía de 0.21 a 0.42 wt % y  $K_2O/NaO$  entre 0.06 y los 0.76 wt %.

Aunque los rangos composicionales entre estos tres tipos de rocas son similares, se puede observar diferencias químicas significativas. Particularmente en las concentraciones de  $Al_2O_3$  y  $CaO$  donde, se observan rangos mayores para los esquistos azules en comparación a las eclogitas y anfíbolitas. Buena correlación en la relación de  $Mg/(Mg + Fe)$  y un aumento en el intervalo de la relación  $K_2O/NaO$  en los esquistos azules.

Un esquema de clasificación química más apropiado para discriminar entre series de distintas procedencia magmática es el diagrama  $Zr/TiO_2$  vs.  $Nb/Y$  (Winchester and Floyd, 1977) (Fig. 4.1, c), puesto que, se basa en elementos inmóviles, aunque  $Zr$  se considera comúnmente como un elemento relativamente inmóvil. La movilidad de  $Zr$  ha sido reconocida en una amplia gama de entornos geológicos, incluidos los entornos hidrotermales y metamórficos (Jørgensen et al., 2017) en donde se produce fusión parcial o a profundidades mayores a los 160 km, donde las propiedades de los fluidos y de los silicatos fundidos convergen para formar un líquido supercrítico capaz de movilizar  $Zr$  (Watson and Harrison, 1983; Rubatto and Hermann, 2003; Kessel et al., 2005).

Por lo tanto, se hace hincapié en que el uso de los diagramas es sólo para representar la poca variabilidad química preservada posteriormente del proceso metamórfico y no necesariamente representan a los protolitos. Posteriormente, para tener una representación más fidedigna del protolito se tendrá que tomar en cuenta la movilización y redistribución de elementos dentro del sistema de estudio (sistema roca y sistema cerrado). A su vez, de acuerdo con Eskola (1939), las rocas con una misma composición química determinada tienen siempre la misma composición mineralógica a las mismas condiciones de presión y temperatura.



## 4.2. Química mineral

De los datos de microsonda se obtuvieron datos de composición específica para caracterizar químicamente los principales grupos minerales, usando distintos parámetros de discriminación y en algunos casos diagramas de composición para definir la variabilidad química de las fases y su relación con la paragénesis metamórfica. Así como también las fórmulas estructurales de cada uno de los minerales analizados.

En la tabla 4.1, al final del capítulo, se presentan los promedios de análisis representativos de los principales grupos minerales, su fórmula estructural promedio y su fracción molar promedio.

### 4.2.1. Granates

El análisis de granates se limitó a los cuatro miembros comunes del grupo del granate: piropero, almandino, espersantino y grosularia. Las composiciones se expresan en % mol y son calculadas al cien por ciento. (Anexo B, Tabla B.1). Se realizaron transectos de borde a borde para observar cambios de composición. Además de analizar dos tamaños predominantes de granate. En caso de que el granate presente inclusiones, estas se omiten en el análisis de composición del granate.

Los granates analizados para las áreas de Piaxtla-Tecomatlán y Asís son de eclogita, mientras que para el área de Ixcamilpa los granates pertenecen a muestras de anfibolita.

La mayoría de los granates analizados mediante microsonda, en general, presentan una composición rica en almandino (Ver Fig. 4.2, a) con una proporción que oscila entre los 46 % mol al 68 % mol en almandino; 7 % mol al 24 % mol en piropero, 17 % mol a 34 % mol de grosularia y en menor concentración se tiene espersantino.

La asociación mineral primaria de las eclogitas presentan granate rico en almandino (Fig.4.2,a). En el área de Piaxtla-Tecomatlán el almandino varía de 55- 68 % mol, mientras que para el área de Asís el almandino no sobrepasa el 63 % mol y el mínimo es de 46 % mol. En los granates del área de Asís se observa un decremento de Mg hacia el núcleo, un incremento y a su vez una constante de contenido de Mg en el núcleo y un incremento de Mg en los bordes; en el área de Piaxtla-Tecomatlán se tiene un incremento de Mg hacia los bordes y un decremento en el núcleo (Ver Fig. 4.2, b).

En las anfibolitas se tiene granate rico en almandino (Fig.4.2,a), para el área de Ixcamilpa la composición de los granates esta menos enriquecida en piropero con rangos de 2 % mol a 4 % mol y de grosularia alcanzando un valor máximo de 28 % mol.

La variación en las especies del granate tiene un comportamiento similar para la mayoría de los granates. Para Ixcamilpa, se observan patrones de enriquecimiento de gro-



sularia+espersantino hacia el núcleo y empobrecimiento de almandino hacia el núcleo, mientras que el contenido de piropo es constante (Fig. 4.3, c).

En el área de Piaxtla-Tecomatlán se observa un empobrecimiento de almandino hacia el núcleo y empobrecimiento de grosularia+espersantino hacia los bordes, mientras que el piropo se mantiene casi constante (Fig. 4.3, c).

Para el área de Asís se observan pequeñas fluctuaciones de borde a borde, pequeños aumentos y decrementos para todas las especies analizadas (Alm, Grs+Sps, Prp), en los bordes disminuye el almandino y con un comportamiento similar la espersantina, mientras que para el piropo se observa un incremento hacia los bordes (Fig. 4.3, c).

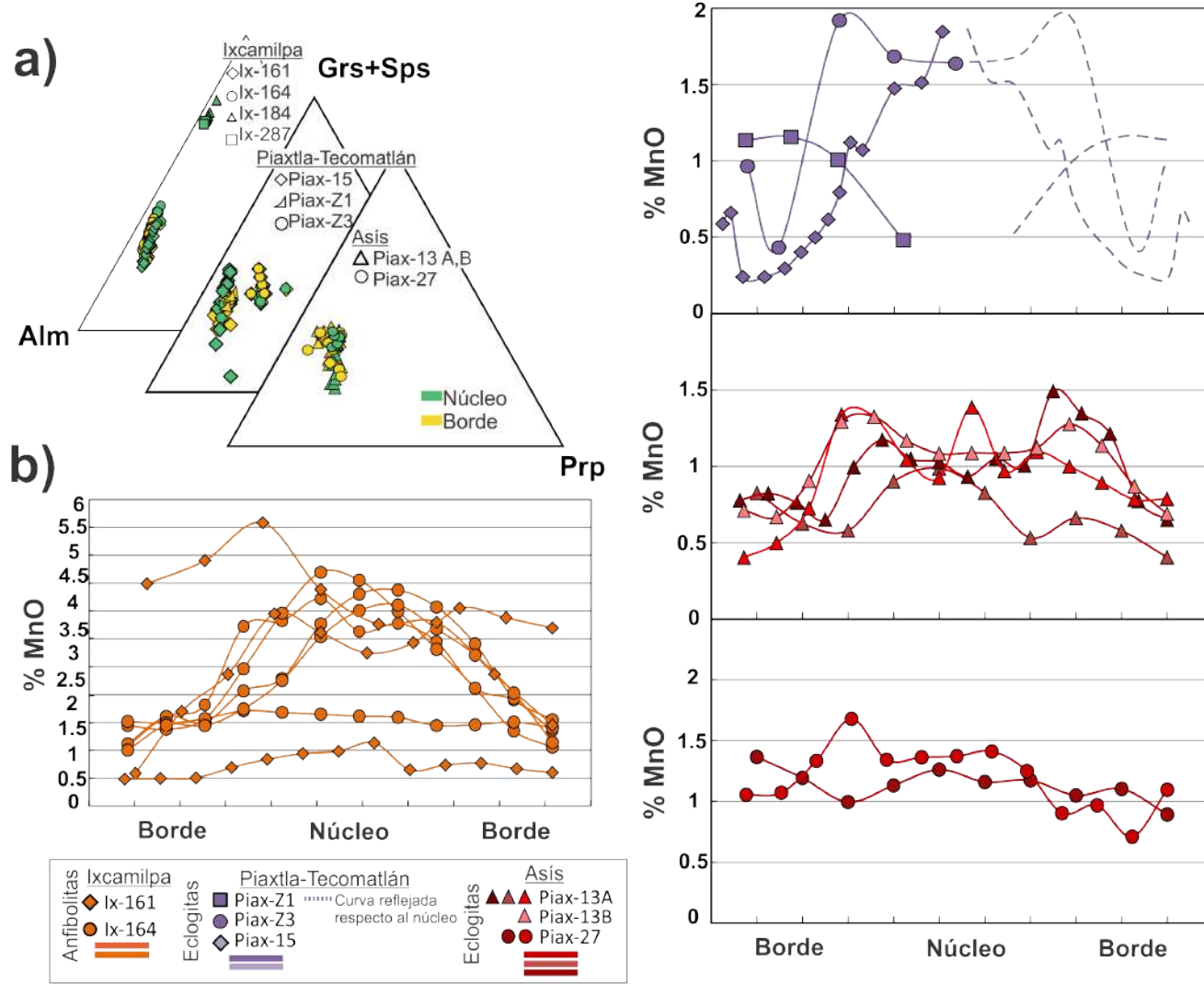


Figura 4.2: Diagramas de los granates para las áreas de Ixcamilpa, Piaxtla-Tecomatlán y Asís. a) Diagramas ternarios composicionales  $Grs + Sps - Prp - Alm$  para los granates, se muestra en azul los análisis de los puntos tomados en bordes y en amarillo los análisis de los puntos tomados en los núcleos. b) Gráficas de la variación del %MgO de borde-núcleo-borde en los granates.

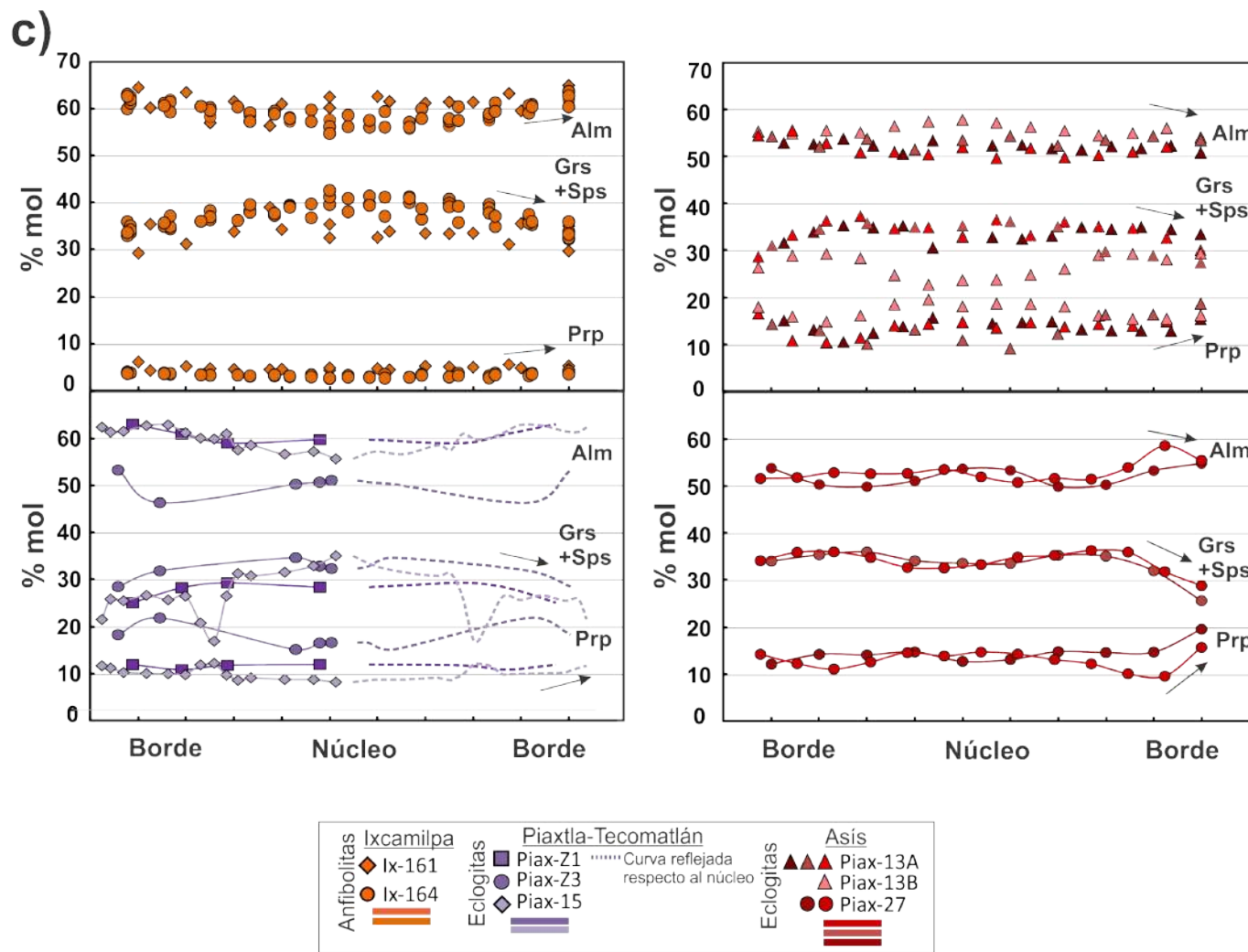


Figura 4.3: Diagramas de los granates para las áreas de Ixcamilpa, Piaxtla-Tecomatlán y Asís. c) Gráficas de la variación de las especies presentes en los granates de diferentes localidades y muestras, las flechas indican la tendencia de la mayoría de las curvas. Grs-grosularia; Sps-espersantino; Alm-almantino; Prp-piropo.

### 4.2.2. Piroxenos

Utilizando el programa PX-NOM (Sturm, 2002) se obtuvo una clasificación de piroxenos basada en los datos de microsonda. En la tabla B.2 (Anexo B) y la figura 4.3, se observa que la composición química de los piroxenos es variable dependiendo de su contenido de algunos de los elementos (*Ca, Na, Mg, Fe<sup>2+</sup>, Al*) dentro de su retículo cristalino. En general, los piroxenos analizados son de eclogitas de las áreas de Piaxtla-Tecomatlán y Asís. La mayoría de los clinopiroxenos analizados pertenecen al grupo *Ca – Na* entran en el campo de la onfacita con rangos de entre 31 % - 38 % moles de jadeíta y 61 % - 66 % moles de quad<sup>1</sup> para el área de Piaxtla-Tecomatlán. En el área de Asís los piroxenos muestran rangos de 23 % - 38 % moles de jadeíta y 57 % - 76 % moles de quad (Fig. 4.4, b).

También se observa que algunos piroxenos del área de Asís y de Piaxtla-Tecomatlán entran en el campo de la augita con rangos de 22 %-32 % moles de enstatita 42 %-52 % moles de ferrosilita y 26 %-27 % moles de wollastonita en el área de Piaxtla-Tecomatlán; mientras que en el área de Asís, el piroxeno tiene 45 %-46 % moles de enstatita 24 %-25 % moles de ferrosilita y 29 %-30 % moles de wollastonita (Fig. 4.4, c). La presencia de diópsido en el área de Asís es escasa y tiene una composición general de  $En_{34-42}Fs_{13-17}Wo_{45-49}$ . La clinoferrosilita y la augita poseen una composición general de  $En_{20-21}Fs_{78-79}Wo_{1-2}$  y de  $En_{20-21}Fs_{78-79}Wo_{1-2}$  respectivamente.

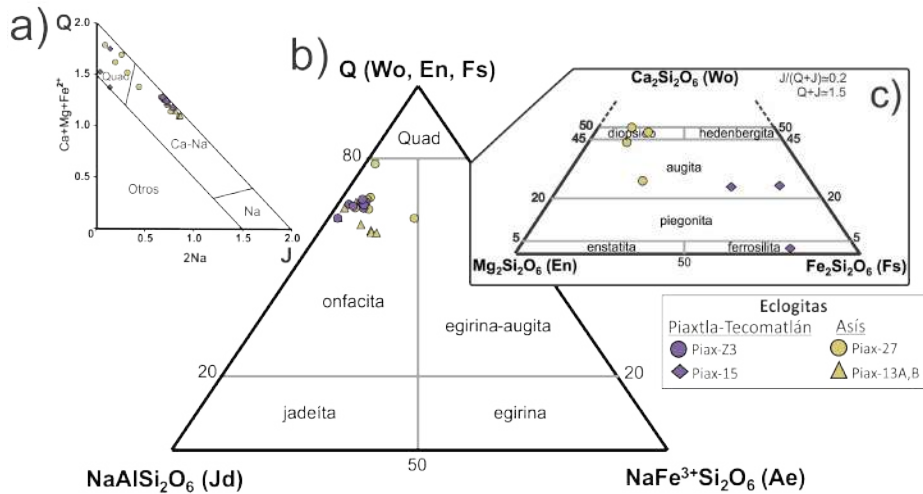


Figura 4.4: Diagramas de clasificación de piroxenos (Morimoto and Kitamura, 1983), para las áreas de Piaxtla-Tecomatlán y Asís. a) Diagrama de preclasificación *Q – J* se muestra en morado los análisis de los puntos tomados en las eclogitas del área de Piaxtla-Tecomatlán, en rojo los análisis tomados de las eclogitas de Asís., b) Diagrama de clasificación de clinopiroxenos., c) Diagrama QUAD para piroxenos *Ca – Mg – Fe*. Wo-wollastonita; En-enstatita; Fs-ferrosilita; Jd-jadeíta; Ae-egirina.

<sup>1</sup>Piroxenos de *Ca – Mg – Fe*

### 4.2.3. Anfíboles

El anfíbol es la fase mineral más abundante en las rocas máficas del Ensamble Piaxtla. Anfibolitas presentes en el área de Ixcamilpa muestran anfíboles con composiciones que van entre sódico-cálcico a cálcico, con  $Si = 6.28-7.84$  a.p.u.f.<sup>2</sup>,  $(Na + K)_A = 0.15-0.68$  a.p.u.f.,  $Na$  en el sitio  $B = 0.53-0.68$  a.p.u.f. y  $X_{Mg} = 0.54-0.68$  % mol para los sódico-cálcicos; y con  $Si = 6.23-8$  a.p.u.f.,  $(Na + K)_A = 0.18-1.42$  a.p.u.f.,  $Na$  en el sitio  $B = 0.25-0.95$  a.p.u.f. y  $X_{Mg} = 0.34-0.75$  % mol para los cálcicos. Principalmente los anfíboles son barroisita, *Mg*-horblenda y *Fe*-horblenda, y en menor cantidad se observan anfíboles en el campo de la *Fe*-tschermakita. También, se tienen anfíboles en el campo de la pargasita, algunos pocos son *Fe*-edenita y actinolita.

En los esquistos azules del área de Ixcamilpa y Mimilulco, los anfíboles se clasifican en sódicos y sódico-cálcicos con  $Si = 7.1-8$  a.p.u.f.,  $(Na + K)_A = 0.01-0.2$  a.p.u.f.,  $Na_B = 1.48-1.90$  a.p.u.f. y  $X_{Mg} = 0.40-0.59$  % mol para los sódicos; y con  $Si = 6.85-8$  a.p.u.f.,  $(Na + K)_A = 0.27-0.64$  a.p.u.f.,  $Na$  en el sitio  $B = 0.61-1.13$  a.p.u.f. y  $X_{Mg} = 0.36-0.46$  % mol para los sódico-cálcicos (Fig. 4.5 a, b y c). Principalmente los anfíboles (de Ixcamilpa y Mimilulco) se clasifican en ferroglaucofano, glaucofano, winchita a *Fe*-winchita, los anfíboles de Ixcamilpa también tienen composición de barroisita (Fig. 4.5 b y c; Anexo B: Tabla B.3), y en menor cantidad se tienen anfíboles del área de Mimilulco en el campo de la Catoforita (Fig. 4.5 b, y Anexo B: Tabla B.3).

---

<sup>2</sup>a.p.f.u: atoms per formula unit (átomos por unidad de fórmula).

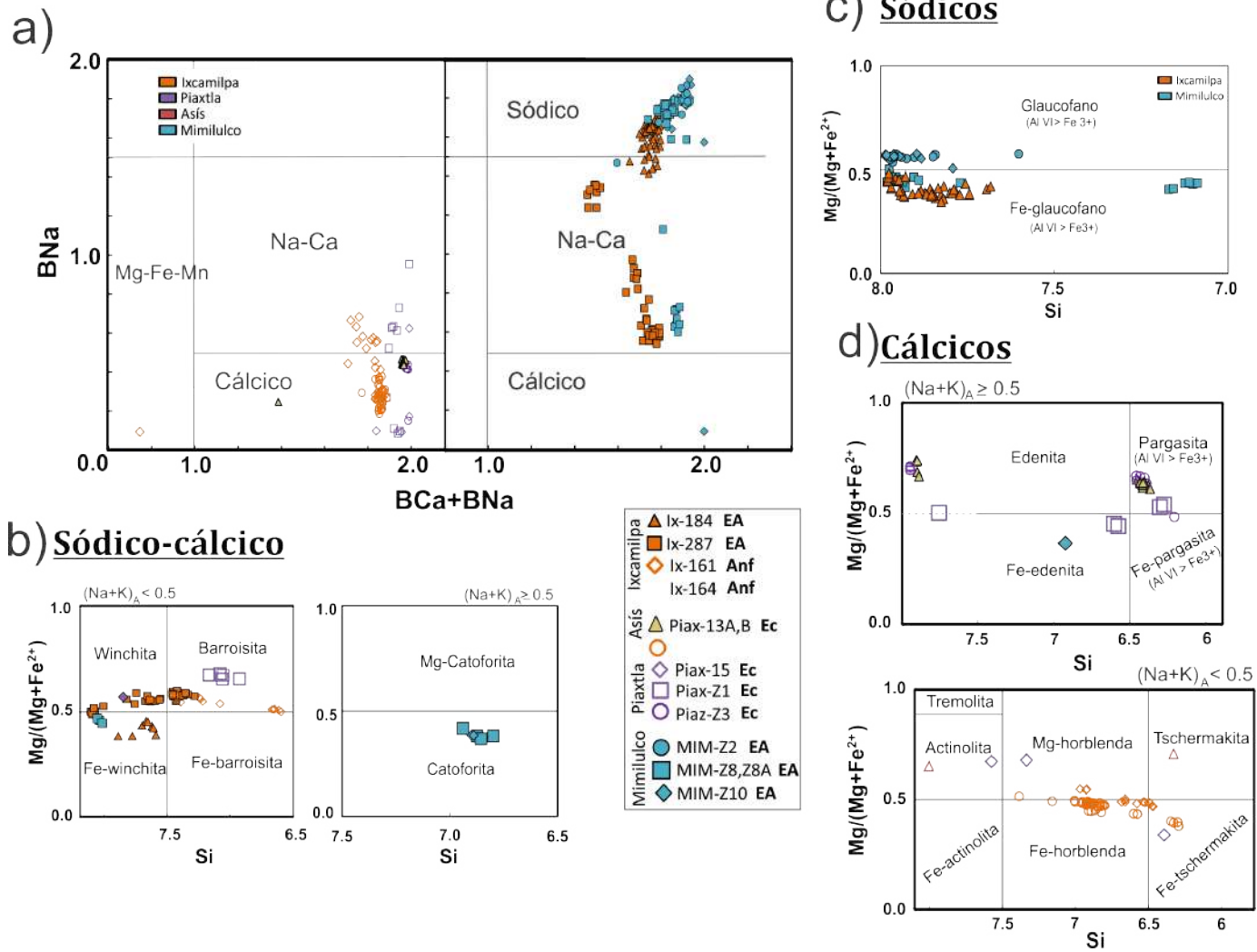


Figura 4.5: Diagramas de clasificación para los anfíboles de las áreas de Ixcamilpa, Piaxtla-Tecomatlán, Asís y Mimilulco, según Leake (1997). a) Diagrama general de clasificación para anfíboles. Los símbolos sin relleno representan a los anfíboles presentes en las anfibolitas y en las eclogitas con retrogresión, los símbolos rellenos representan a los anfíboles presentes en los esquistos azules. b) Diagrama de clasificación para anfíboles sódico-cálcico., c) Diagrama clasificación para anfíboles sódicos., d) Diagrama clasificación para anfíboles cálcicos. Anf-Anfibolita; Ec-Eclogita; EA-Esquistos Azules.

#### 4.2.4. Plagioclasa

Las plagioclasas tienen una composición predominantemente albitica (Fig. 4.6, a). Para el área de Ixcamilpa las anfibolitas poseen una composición general (fracción molar) de  $Ab_{97,5-99,2}An_{0,7-2,25}Or_{0,1-0,75}$ ; los esquistos azules de  $Ab_{96,7-99,6}An_{0,4-3,15}Or_{0,1-0,7}$ . En el área de Piaxtla-Tecomatlán las plagioclasas analizadas en las eclogitas con retrogresión exhiben composiciones de  $Ab_{91,8-98,5}An_{1,4-7,9}Or_{0,1-0,3}$ . En el área de Asís, las plagioclasas en eclogitas, arrojaron composiciones de  $Ab_{88,9-98,9}An_{0,4-10,9}Or_{0,1-0,5}$ . En Mimilulco, las plagioclasas de los esquistos azules muestran una composición de  $Ab_{95,2-99,7}An_{0,1-4,8}Or_{0,04-0,3}$ .

Por otro lado, cabe mencionar que se encontró ortoclasas con una composición de  $Ab_{2,3}An_{0,2}Or_{97,3}$  en una eclogita de Piaxtla-Tecomatlán y  $Ab_{2,2}An_{0,2}Or_{97,7}$  en un esquistos azul del área de Mimilulco (Fig. 4.6, a).

#### 4.2.5. Epidotas

La epidota es una de las fases minerales más abundantes en los esquistos azules estudiados en las áreas de Ixcamilpa y Mimilulco, y define la foliación. También, se observó epidota en las anfibolitas del área de Ixcamilpa con una composición de  $X_{Czo} = 0.46-0.63$  % mol y  $X_{Ep} = 0.28-0.41$  % mol. Los datos químicos de las epidotas, indican una composición variable de  $X_{Czo} = 0.18-0.42$  % mol y  $X_{Ep} = 0.43-0.61$  % mol en los esquistos azules de Ixcamilpa (Fig. 4.6, b).

En el área de Piaxtla-Tecomatlán las eclogitas con retrogresión exhiben epidotas con composición de  $X_{Czo} = 0.35-0.70$  % molar y  $X_{Ep} = 0.22-0.70$  % molar. En Mimilulco la composición general de la epidota en los esquistos azules es de  $X_{Czo} = 0.12-0.55$  % molar en  $X_{Ep} = 0.34-0.66$  % molar (Fig. 4.6, b).

#### 4.2.6. Micas

La mica analizada en los esquistos azules del área de Ixcamila y Mimilulco es de composición fengítica. Particularmente tiene un amplio rango de composición entre moscovita y celadonita ( $Ms = 53.34- 65.82$  % moles,  $Cel = 31.34- 57.68$  % mol). Para los esquistos azules en el área de Ixcamilpa se observa un rango de  $Si = 3.19-3.45$  *a.p.u.f.* y baja relación de  $X_{Na} = 0.013-0.70$  *a.p.u.f.* ( $X_{Na} = Na/(Na + K)$ ). En el área de Mimilulco hay rangos de:  $Ms = 56.60 - 64.20$  % moles,  $Cel = 31.80- 39.99$  % mol;  $Si = 3.32-3.40$  *a.p.u.f.* y baja relación de  $X_{Na} = 0.055-0.078$  *a.p.u.f.* (Fig. 4.6, c).

#### 4.2.6.1. Cloritas

La clorita se presenta esencialmente reemplazando a granate, piróxeno y anfíbol. De los análisis de las cloritas se obtienen composiciones de  $X_{Fe} = 0.46-0.47$  % mol,  $Si = 2.68-2.70$  *a.p.u.f.* en las anfibolitas de Ixcamilpa, y  $X_{Fe} = 0.40-0.53$  % mol,  $Si = 2.7-2.8$  *a.p.u.f.* en los esquistos azules para el área de Ixcamilpa. En el área de Piaxtla-Tecomatlán se observan rangos de  $X_{Fe} = 0.66-0.68$  % mol y  $Si = 2.72-2.74$  *a.p.u.f.* para las eclogitas. En el área de Asís se muestran rangos de  $X_{Fe} = 0.58$  % mol y  $Si = 3.11$  *a.p.u.f.* para las eclogitas. Y en los esquistos azules de Mimilulco, los rangos están en:  $X_{Fe} = 0.43-0.59$  % mol y  $Si = 2.7-3$  *a.p.u.f.* (Fig. 4.6, d).

#### 4.2.7. Rutilo, titanita e ilmenita

El rutilo se encuentra principalmente como inclusión en el granate y anfíboles, también, aparece como cristales diseminados en la matriz de las muestras estudiadas. Su composición es  $Ti_{0,99}O_2$ . Mención particular merece el contenido de  $Zr$  en rutilo, el cual varía 106.8 ppm a 333.8 ppm en muestras ( $Ix - 13$  e  $Ix - 27$ ) de eclogita en el área de Asís.

La titanita presente en las zonas alrededor y coronando a los rutilos tienen una fórmula promedio de  $Ca_{0,95-0,95}Ti_{0,75-0,9}Al_{0,12-0,2}SiO_5$  (en esquistos azules de Mimilulco y en eclogitas de Piaxtla y Asís). La ilmenita presente en esquistos azules de Mimilulco, exhibe una composición fórmula promedio de  $Fe_{0,92-0,93}Ti_{0,93-0,97}O_3$ .



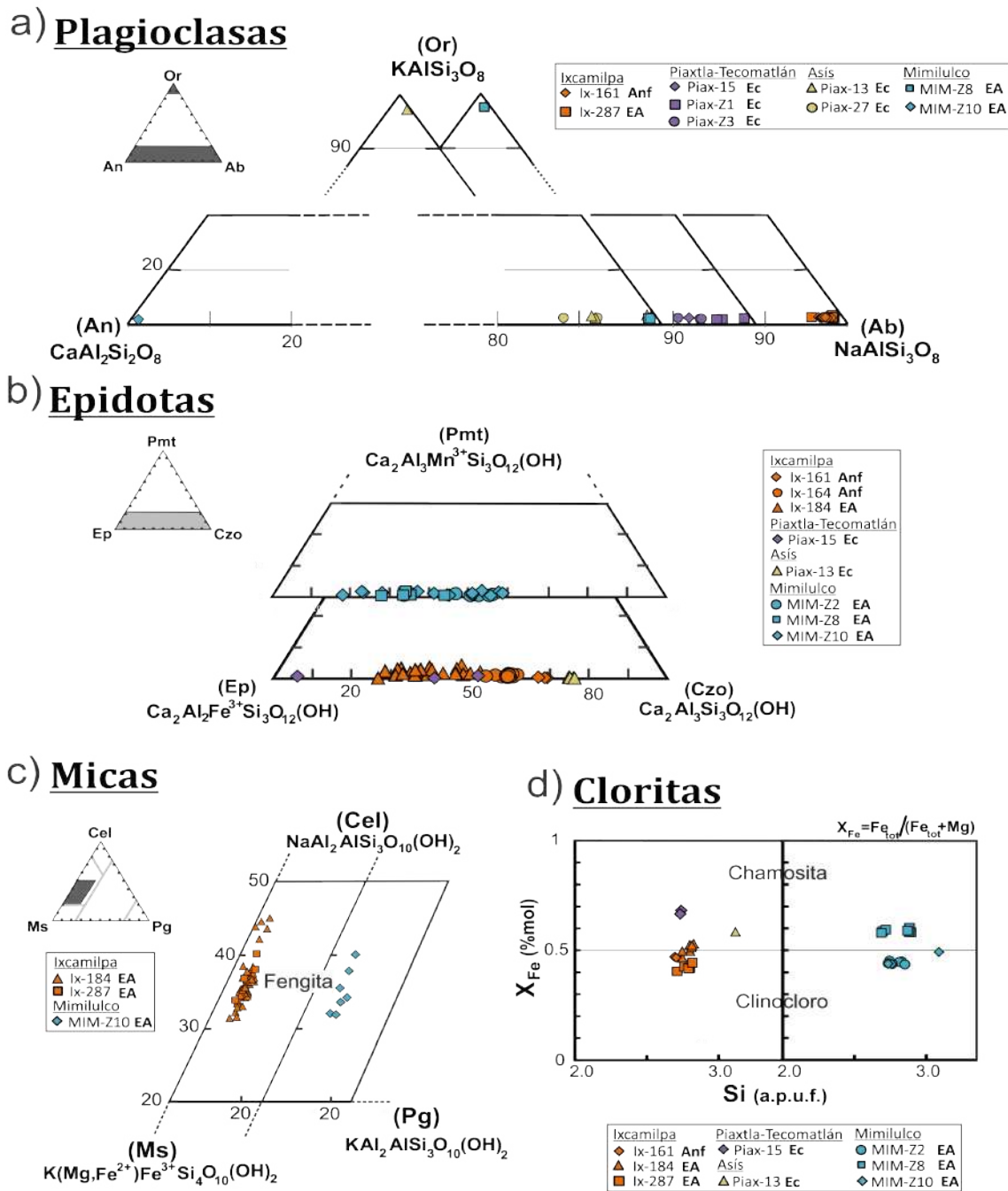


Figura 4.6: Diagramas de los minerales representativos en las distintas paragénesis en las rocas estudiadas para las áreas de Ixcamilpa, Piaxtla-Tecomatlán, Asís y Mimilulco. a) Diagrama ternario composicional  $An-Or-Ab$  para las plagioclasas. b) Diagrama ternario composicional  $Ep-Pmt-Czo$  para las epidotas, modificado de Franz y Liebscher (2004). c) Diagrama ternario  $Ms-Cel-Pg$  para la clasificación de Micas, modificado de Schliestedt (1980). d) Gráfica de la variación composicional de las cloritas en términos de  $X_{Fe}$  respecto del contenido de  $Si$  (a.p.u.f.), modificado de Melka (1965). An-anortita; Or-ortoclasa; Ab-albita; Ep-epidota; Pmt-piemontita; Czo-clinozocita; Ms-moscovita; Cel-celadonita; Pg-paragonita. Anf-Anfibolita; Ec-Eclogita; EA-Esquisto Azul.

Tabla 4.1: Promedios de análisis representativos de los principales grupos minerales, su formula estructural promedio y su fracción molar promedio. Las abreviaciones de las zonas de muestreo son: IX=Ixcamilpa; PT=Piactla-Tecomatlán; A=Asís; MIM=Mimilulco.

Localidad	Litología	Fases	n	% wt promedio										Formula estructural promedio	% Fracción molar promedio						
				1σ											Prp	Alm	Sps	Uv	And	GrS	
				SiO2	TiO2	Al2O3	Cr2O3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	Total							
IX	Anfibolita	Granate (Alm)	154	38.16	0.14	20.21	0.00	28.24	1.61	0.91	11.66	0.00	0.00	100.93	$Fe^{3+}_{1.88}Al_{1.89}Si_{3.03}O_{12}$	3.5	60.8	3.5	0.0	0.0	31.9
A	Eclogita	Granate (Alm)	9	37.92	0.16	21.76	0.01	23.86	1.00	3.62	11.69	0.00	0.00	100.01	$Fe^{3+}_{1.47}Al_{2.02}Si_{2.96}O_{12}$	12.9	52.3	2.1	0.0	0.8	31.9
PT	Eclogita*	Granate (Alm)	54	37.89	0.17	20.98	0.01	25.63	0.57	2.71	10.52	0.04	0.00	99.53	$Fe^{3+}_{1.63}Al_{1.9}Si_{2.99}O_{12}$	11.2	54.5	1.9	0.0	0.5	31.9
				0.20	0.08	1.63	0.00	5.80	1.29	0.40	4.11	0.00	0.00								
				0.57	0.08	0.45	0.03	0.83	0.31	0.58	1.15	0.05	0.01								
				0.74	0.21	1.14	0.02	4.85	0.60	1.13	3.63	0.05	0.04								
IX	Anfibolita	Anfibol (Fe-hornblenda)	10	46.68	0.17	10.57	0.00	20.25	0.12	8.51	9.96	1.74	0.33	98.32	$Ca_{1.57}(Fe^{2+}_{1.98}Al_{1.22})Si_{6.88}Al_{0.72}O_{22}(OH)_2$						
IX	Esquisto azul	Anfibol (Fgl)	36	53.66	0.03	8.82	0.00	18.50	0.20	7.70	1.20	5.70	0.05	95.85	$Na_{1.52}(Fe^{2+}_{1.72}Al_{1.34})Si_{1.78}O_{22}(OH)_2$						
PT	Eclogita*	Anfibol (Prg)	11	44.04	0.66	14.46	0.02	11.97	0.04	11.34	9.71	3.31	0.50	96.06	$Na_{0.53}Ca_{1.53}(Mg_{2.45}Al)Si_{6.49}Al_{1.51}O_{22}(OH)_2$						
MIM	Esquisto azul	Anfibol (Gln)	23	55.63	0.04	9.68	0.03	14.48	0.07	8.50	0.68	6.41	0.02	95.55	$Na_{1.74}(Mg_{1.81}Al_{1.59})Si_{6.49}Al_{1.51}O_{22}(OH)_2$						
				2.07	0.05	1.82	0.00	1.39	0.03	0.81	1.14	0.37	0.09								
				1.92	0.03	1.35	0.01	1.07	0.06	1.98	2.85	1.47	0.07								
				3.94	0.30	3.06	0.03	3.61	0.07	2.36	1.39	1.13	0.38								
				3.49	0.10	0.97	0.03	2.92	0.03	0.80	2.24	0.91	0.12								
																Zo	Czo				
IX	Anfibolita	Epidota (Ep)	21	38.83	0.07	26.76	0.00	10.09	0.14	0.02	23.45	0.01	0.00	99.37	$Ca_2Al_{2.51}Fe^{3+}_{0.67}Si_{3.10}O_{12}(OH)$	56.7	43.3				
IX	Esquisto azul	Epidota (Ep)	12	38.30	0.02	24.04	0.00	12.96	0.41	0.01	23.07	0.00	0.02	98.82	$Ca_2Al_{2.51}Fe^{3+}_{0.67}Si_{3.10}O_{12}(OH)$	74.9	25.14				
A	Eclogita	Epidota (Czo)	4	38.39	0.18	29.05	0.00	6.00	0.04	0.04	22.81	0.09	0.00	96.61	$Ca_{1.83}Al_{2.56}Si_{2.87}O_{12}(OH)$	40.2	59.8				
PT	Eclogita*	Epidota (Ep)	3	33.45	0.20	20.67	0.00	21.70	0.18	4.16	11.20	0.05	0.01	91.62	$Ca_{0.96}Al_2Fe^{3+}_{1.45}Si_{3.02}O_{12}(OH)$	98.2	1.8				
MIM	Esquisto azul	Epidota (Ep)	22	37.20	0.08	23.23	0.08	11.92	0.14	0.03	23.02	0.00	0.00	95.72	$Ca_{1.98}Al_{2.24}Fe^{3+}_{0.75}Si_{2.99}O_{12}(OH)$	78.8	20.7				
				0.16	0.02	0.70	0.00	0.86	0.12	0.01	0.19	0.01	0.00								
				0.11	0.04	0.53	0.00	0.60	0.23	0.01	0.20	0.01	0.03								
				0.12	0.05	0.16	0.00	0.16	0.02	0.01	0.21	0.05	0.00								
				2.77	0.14	1.38	0.00	9.28	0.20	2.13	4.63	0.99	0.36								
				0.32	0.05	1.69	0.04	2.03	0.09	0.03	0.64	0.05	0.01								
A	Eclogita	Feldespato (Ab)	6	66.15	0.03	20.14	0.00	0.40	0.00	0.19	1.47	10.70	0.03	99.10	$Na_{0.87}Al_{0.99}Si_{2.78}O_8$	5.4	78.4	16.2			
PT	Eclogita*	Feldespato (Ab)	9	66.55	0.04	19.74	0.00	0.25	0.01	0.01	1.41	11.08	0.02	99.13	$Na_{0.9}Al_{0.97}Si_{2.78}O_8$	5.1	83.1	11.8			
MIM	Esquisto azul	Feldespato (Ab)	5	68.31	0.04	18.99	0.01	0.27	0.02	0.00	0.08	11.77	0.01	99.49	$Na_{0.95}Al_{0.93}Si_{2.82}O_8$	0.3	99.5	0.1			
				1.61	0.28	0.45	0.00	0.31	0.00	0.13	0.70	0.48	0.04								
				0.63	0.02	0.75	0.02	0.29	0.01	0.37	0.52	0.40	0.02								
				0.21	0.03	0.22	0.00	0.03	0.01	0.01	0.03	0.09	0.01								
																An	Ab	Or			
A	Eclogita	Piroxeno (Onfacita)	17	53.44	0.19	8.94	0.02	6.21	0.07	9.19	15.75	4.96	0.01	98.78	$Ca_{0.55}Na_{0.28}(Mg_{0.53}Fe^{2+}_{0.32}Al_{0.35})Si_{1.99}O_6$	33.7	0.0	66.3			
PT	Eclogita	Piroxeno (Onfacita)	12	54.09	0.18	8.98	0.02	5.48	0.03	9.26	16.15	4.89	0.01	99.09	$Ca_{0.52}Na_{0.30}(Mg_{0.53}Fe^{2+}_{0.22}Al_{0.35})Si_{1.96}O_6$	31.9	0.9	67.2			
				1.68	0.08	2.21	0.03	1.85	0.07	1.54	2.40	1.56	0.08								
				3.17	0.08	2.72	0.05	9.54	0.09	1.61	4.96	1.99	0.52								
																Jd	Aeg	Quad**			
IX	Esquisto azul	Mica (Ms)	53	51.36	0.15	28.20	0.00	5.53	0.03	2.42	0.01	0.08	10.61	98.39	$K_{0.88}Al_{1.54}(Al_{0.64}Si_{3.36})O_{10}(OH)_2$	35.8	61.4	2.8	0.1		
MIM	Esquisto azul	Mica (Ms)	7	48.55	0.27	26.47	0.11	5.11	0.01	3.09	0.15	0.44	10.13	94.35	$K_{0.85}Al_{1.48}(Al_{0.66}Si_{3.34})O_{10}(OH)_2$	34.0	60.4	3.8	0.8		
				1.36	0.03	0.88	0.00	0.44	0.02	0.29	0.32	0.01	0.22								
				0.46	0.02	0.38	0.03	0.39	0.02	0.18	0.05	0.10	1.34								

Abreviaturas: áreas estudiadas IX=Ixcamilpa, A=Asís, PT=Piactla-Tecomatlán y MIM= Mimilulco; n- número de análisis; σ- desviación estándar. \*Eclogita con retrogresión \*\*Quad- Wo, En, Fs; dónde Wo=Wollastonita, En=Enstatita y Fs=Ferrosilita.

## Capítulo 5

# Modelado petrológico: Pseudosecciones para el Ensamble Piactla

Las pseudosecciones son diagramas  $P$ - $T$ - $x$ , que muestran los conjuntos minerales estables en cualquier punto, y las líneas que delimitan dichos campos estables pueden reflejar las reacciones tanto continuas como discontinuas. Se erigen como una herramienta para estimar las trayectorias  $P - T$  y en combinación con los datos observacionales de la roca, como las paragénesis, proporciones y composición minerales, las pseudosecciones proporcionan información termobarométrica, y con ello inferir la evolución de las rocas metamórfica (Winter, 2001; Bucher and Grapes, 2011). La composición específica de la roca (en condiciones anhidras o hidratadas), proporciona restricciones en un cierto rango de presión y temperatura (Powell and Holland, 2008).

Las pseudosecciones que aquí se presentan, se calculan a partir de análisis individuales ( $XRF$ ) de roca total ( $BC$ -*Bulk composition*) y para una roca efectiva ( $EBC$ -*Effective bulk composition*)<sup>1</sup> considerando los parámetros texturales y puntuales de microsonda. La composición y la abundancia molar de los minerales dentro de cada paragénesis se representa mediante isopletras, las cuales, tienen asignados valores composicionales y modales. Se han utilizado las intersecciones entre isopletras de diferente composición ( $Grt$  y  $Omp$ ) en las eclogitas; ( $Amp$ ,  $Grt$ ,  $Pl$ ,  $Ep$ ,  $Mg$  y  $Si$  a.p.f.u.<sup>2</sup>) en las anfibolitas y ( $Mg$  y  $Si$  a.p.f.u.) en los esquistos azules para estimaciones termobarométricas.

Hay que considerar, que las pseudosecciones no están exentas de limitaciones, en particular, cuando se tienen elementos de interés localizados en el núcleo de minerales

---

<sup>1</sup>Para más detalle ver Anexo D

<sup>2</sup>a.p.f.u: atoms per formula unit (átomos por unidad de fórmula).

zoneados (ej. granates), la diferencia entre la composición de la roca total y la composición de roca efectiva puede ser significativa, puesto que depende del volumen, lo que implica que no se puede esperar que una sola pseudosección refleje toda la historia de una roca. Es difícil representar los dominios de equilibrio en eventos de descompresión y enfriamiento porque generalmente no son sistemas cerrados (White et al., 2008).

## 5.1. Construcción de Pseudosecciones

En la presente tesis, fueron elaboradas 22 pseudosecciones. Bajo el sistema cerrado  $MnNCFMASHT$  ( $Na_2O-CaO-FeO-MgO-MnO-Al_2O_3-SiO_2 \pm H_2O-TiO_2$ ). Con la elección de soluciones sólidas de: Gt (HP) para el granate (Holland and Powell, 1998); Omph (HP) para la onfacita (Holland and Powell, 2006); GTrTsPG (Wei and Powell, 2003; White et al., 2008), Amph (DPH) y Ca-Amph (D) (Dale et al., 2000) y Gl para los anfíboles, Pheng (HP) para la fengita (Holland and Powell, 1998), Chl(HP) para la clorita y Ep (HP) (Holland and Powell, 1998) para la epidota. Cabe señalar, que la composición en la que se basa la pseudosección tiene que representar la composición del sistema químico durante el metamorfismo, entre más parecido esté al sistema químico real de la roca a modelar, menor será la incertidumbre involucrada en el cálculo. Para el presente trabajo se seleccionaron distintos análisis que pertenecen a las distintas litologías de alto grado del Ensamble Piaxtla (ver secciones Fig. 1.1).

Se generaron pseudosecciones para 13 análisis de roca total, 6 para eclogitas, 4 análisis para anfibolitas y 3 para esquistos azules. Es importante enfatizar, que para las eclogitas relictas se seleccionaron los análisis que representan eclogitas con menor grado de retrogresión. Se utilizaron 5 análisis de roca efectiva para eclogitas, 2 para anfibolitas y 2 para los esquistos azules. La composición de roca efectiva la suponemos como la que representa la composición de la roca teórica para cada una de las litologías estudiadas.

Las pseudosecciones  $P-T$  con composición de roca total (BC) y roca efectiva (EBC) para las eclogitas se realizaron en condiciones anhidras, y en rangos de 500-800 °C y 8-22 *kbar*. Mientras que, para las anfibolitas se realizaron en condiciones hidratadas ( $\sim 5\%$ ) y en rangos de 400-800 °C y 8-22 *kbar*. Por último, los esquistos azules se modelaron en condiciones hidratadas ( $\sim 5\%$ ) y en rangos de 400-800 °C y 8-22 *kbar*.

Para los casos de roca efectiva en eclogitas y anfibolitas, se trazan isopletras de composición del granate para refinar las condiciones P-T metamórficas (y posibles picos metamórficos). Usando el análisis de microsonda del granate de composición Mn más alto, ya que, se considera que este análisis representa el granate más antiguo (Carlson, 1989) y, por lo tanto, se asume una baja probabilidad de alteración debido al fraccionamiento del cristal.

Para establecer la ubicación y las intersecciones de isopletas, los criterios usados fueron los siguientes: a) Datos previos (i. e. condiciones termobarométricas y composición mineral) encontrados en la literatura para las diferentes litologías presentes en el Ensamble Piaxtla; b) Observaciones petrográficas (i. e. la selección de los campos de estabilidad se basa en la paragénesis observada; y c) Composición mineral predominante (diagramas de discriminación). Tomando en cuenta lo previo se puede especificar el campo de estabilidad que representa a las muestras, y a su vez, las condiciones metamórficas mediante la intersección de las isopletas.

Sí las isopletas se intersecan todas dentro de la superposición de la incertidumbre  $2\sigma$ , entonces el modelado del equilibrio y la roca total se puede considerar adecuado dentro de las restricciones del error en los datos termodinámicos.

Otros aspectos que se deben considerar son los factores reales (i. e. la transferencia de masa, los controles cinéticos de la nucleación y las reacciones de interfases) por los que se rigen las transformaciones de las rocas metamórficas, normalmente en desequilibrio constante. Además, la composición volumétrica efectiva de una roca no es siempre certera y puede cambiar significativamente durante la evolución progresiva de las condiciones  $P-T$ . Después de todas las consideraciones anteriores, asumiendo el equilibrio y con la premisa de que la química mineral obtenida de los análisis de microsonda está considerada para generar la composición de roca efectiva, y por lo tanto, está considerada dentro de la modelización, es posible obtener aproximaciones lo suficientemente validas que describan los sistemas metamórficos en condiciones restringidas.

Las composiciones de las pseudosecciones  $P-T$  realizadas para el Ensamble Piaxtla se muestran en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: XRF análisis de roca total (%wt) para 6 muestras de eclogitas, 4 de anfibolitas y 3 de esquistos azules. Composición de roca efectiva (%mol) para 5 eclogitas, 2 anfibolitas y 2 esquistos azules. Abreviaturas para los análisis tomados de otros autores: MF= Meza-Figueroa (Tesis Doctoral, 1998), M e IX = Murphy et al., 2006, PL=Pérez-López (Tesis de Licenciatura, 2004). Abreviaturas para las áreas estudiadas: A=Asís, PT=Piactla-Tecomatlán, IX= Ixcamilpa y MIM= Mimilulco. \*Datos no publicados.

	Muestra	Localidad	SiO2	TiO2	Al2O3	Fe2O3t	FeO	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	P2O5	P x C	Total	Autor	
Eclogitas	BC	Piax-13	A	49.17	1.86	14.88	13.53	-	0.27	6.47	9.92	2.38	0.85	0.21	0.61	100.14	Este trabajo
		M-49-1	A	45.12	1.52	15.46	11.7	-	10.53	0.19	6.6	9.78	2.23	0.26	0.13	103.52	Murphy et la., 2006*
		Piax-15	PT	48.45	3.04	13.25	15.1	-	0.21	6.05	9.24	3.13	0.31	0.27	1.13	100.17	Este trabajo
	EBC	Piax-28	PT	49.21	1.98	13.32	13.41	-	0.23	7.52	9.68	3.04	0.84	0.19	0.68	100.1	Este trabajo
		MF-MP3	PT	47.7	2.05	12.7	12.2	8	0.18	8.81	10	3.08	0.65	0.19	-	105.56	Meza-Figueroa 1998
		MF-D6814	PT	47.9	3.1	12.9	14.9	8.6	0.2	5.51	10.1	2.65	0.36	0.31	-	106.53	Meza-Figueroa 1998
Anfibolitas	BC	Piax-13	A	48.32	2.97	12.9	-	10.44	0.23	7.00	14.59	3.52	-	-	-	100	Este trabajo
		Piax-27	A	53.02	4.55	15.2	-	7.48	0.27	4.69	9.37	5.37	-	-	-	100	Este trabajo
		Piax-15	PT	50.14	4.06	11.94	-	9.41	0.09	6.74	12.48	5.1	-	-	-	100	Este trabajo
	EBC	Piax-Z3	PT	43.63	3.16	16.82	-	15.09	3.87	8.56	7.03	1.83	-	-	-	100	Este trabajo
		MF-MP3	PT	48.01	2	13.44	-	11.74	0.59	7.08	13.64	3.5	-	-	-	100	Meza-Figueroa 1998
		PIAX-12	A	49.83	1.78	14.75	12.7	-	0.22	6.45	10.44	2.79	0.69	0.18	0.35	100.17	Este trabajo
EBC	IX-266	IX	46.65	3.02	12.48	16.79	-	0.23	5.8	10.84	2.38	0.49	0.31	1.47	100.45	Murphy et la., 2006*	
	MF-D17814	PT	47.7	3.18	13.2	15.6	8.2	0.22	5.25	10.2	2.48	0.35	0.34	-	106.72	Meza-Figueroa 1998	
	MF-MI-6	MIM	49.9	0.98	14.1	11.1	5.7	0.17	8.29	11	2.38	0.13	0.08	-	103.83	Meza-Figueroa 1998	
	IX-164	IX	44.16	0.18	14.92	-	21.6	1.02	5.77	10.8	1.04	-	-	-	99	Ramos-Arías et al., 2011	
Esquistos azules	BC	MF-MI-6	MIM	49.13	0.01	10.99	-	14.78	0.38	12.04	11.03	1.63	-	-	-	100	Meza-Figueroa 1998
		IX-233	IX	46.74	1.57	14.79	12.44	-	0.18	7.32	10.67	3.04	0.26	0.13	2.95	100.09	Murphy et la., 2006*
		IX-58	IX	46.04	1.5	14.96	12	-	0.18	7.66	10.96	2.77	0.04	0.12	3.78	100.02	Murphy et la., 2006*
	EBC	PL-05	MIM	45.33	1.6	16.37	12.5	-	0.27	5.42	9.83	2.54	0.52	0.13	5.29	99.8	Pérez-López 2014
		IX-184	IX	49.61	1.33	16.13	-	14.52	0.36	4.31	8.35	4.12	1.25	-	-	100	Ramos-Arías et al., 2011
		MIM-Z10	MIM	50.64	1.26	14.82	-	14.58	0.12	5.97	7.95	3.94	0.72	-	-	100	Este trabajo

### 5.1.1. Pseudosecciones de Eclogitas

En las pseudosecciones de eclogitas de roca total (BC)(Fig. 5.1 a 5.3), se observan una serie de similitudes entre ellas:

-Los campos de estabilidad por encima de los  $\sim 12$  kbar están dominados principalmente por granate (*Grt*), clinopiroxeno (*Omp*), cuarzo (*Qz*), rutilo (*Rt*) e ilmenita (*Ilm*), además de un límite marcado en la temperatura hacia los  $\sim 600$  °C.

-Por debajo de los  $\sim 14$  kbar y arriba de los  $\sim 600$  °C se observa que la aparición de la plagioclasa (*Pl, ab*) de forma estable, mientras que en bajas temperaturas la estabilidad de la plagioclasa se condiciona por debajo de  $\sim 10$  kbar.

-Es muy notorio que el granate es estable en todos los campos de la pseudosección, se observa en la isopletras que la composición predominante de almandino ( $X_{alm} = 48-71$ ,  $X_{prp} = 14-39$ ,  $X_{grs} = 3-21$ ) cuya composición en *Fe* va disminuyendo simultáneamente con la presión y aumento de la temperatura, no obstante que para la M-49-1 el contenido de *Mg* aumenta conforme aumenta la temperatura. (Fig. 5.1, a y b).

-Por otro lado, el clinopiroxeno (*Omp*) tiene un campo de estabilidad más restringido y a pesar de que se encuentra presente en todos los campos con isopletras de composición en rangos de  $X_{jd} = 16-36$  para todas las pseudosecciones, la onfacita sólo se mantiene estable por encima de los  $\sim 550$  °C y  $\sim 14$  kbar y se desestabiliza a bajas presiones y temperaturas donde aparecen otros piroxenos en su sustitución (Diópsido y/o Augita).

-La ilmenita aparece por debajo de los  $\sim 18-16$  kbar, mientras que para la muestra MF-MP3 (Fig. 5.2, a) se encuentra en todos los campos. Y las muestras Piax-13 Y M-49-1 carecen de ella (Fig. 5.1).

-El rutilo se mantiene estable a altas temperaturas y presiones, mientras que, se observa un decremento por debajo de los  $\sim 600$  °C para la mayoría de las muestras, excepto para Piax-13 y M-49-1 en dónde está presente en todos los campos (Fig. 5.1, a y b).

Las pseudosecciones de composición de roca efectiva presentan un patrón similar y consistente al de las pseudosecciones de roca total:

-Los campos de estabilidad están dominados principalmente por granate (*Alm*), clinopiroxeno (*Omp*), cuarzo, rutilo e ilmenita para temperaturas y presiones altas ( $>550-600$  °C;  $>12-13$  kbar); además de presentar albita y piroxenos a bajas condiciones de temperatura y presión ( $<550$  °C,  $<12$  kbar).

-El granate es estable en todos los campos de la pseudosecciones, se observan isopletras de composición predominantemente almandínico ( $X_{alm} = 40-70$ ,  $X_{prp} = 12-33$ ,  $X_{grs} = 10-22$ ), proporción que disminuye simultáneamente con la presión.

-El clinopiroxeno (*Omp*) se encuentra presente en todos los campos y se mantiene estable por encima de  $\sim 550$  °C-600 °C, con isopletas de composición  $X_{jd} = 16-40$  para la mayoría de las muestras excepto para la muestra Piax-27 que presenta un rango de  $X_{jd} = 63-69$ ; no obstante, comienza a observarse inestable con la reducción de la presión y la temperatura, generando nuevos clinopiroxenos (Di) en las muestras Piax-Z3, MF-MP3, Piax-27, Piax-13B y Piax-15; y (Hd) en la muestra Piax-15.

-Entre los  $\sim 14$  kbar (y para algunas muestras (Piax-27 y Piax-15)  $\sim 16$  kbar, Fig. 5.4) y los  $\sim 12$  kbar y a los  $\sim 600$  °C la plagioclasa (Pl, ab) aparece y se mantiene estable, mientras que a bajas temperaturas ( $< 600$  °C) la estabilidad se encuentra por debajo de  $\sim 12-10$  kbar.

Las isopletas calculadas para cada pseudosección se intersectan en múltiples puntos (Tabla 5.2), entre los  $\sim 600-730$  °C aprox. y en  $\sim 15-22$  kbar (elipses amarillas, Fig. 5.1- 5.3) para las eclogitas de roca total; y entre los  $\sim 620-730$  °C y en  $\sim 15-22$  kbar (elipses azules, Fig. 5.4- 5.6) para las eclogitas de roca efectiva; esto es consistente con los campos y las paragénesis observadas en láminas delgadas (ver Tabla 3.1).

En la figura 5.1 inciso a), se observa una línea azul que representa el promedio de las temperaturas obtenidas con el termómetro de Zr en rutilo de Tomkins et al. (2007), la cual se encuentra entre los  $\sim 645-685$  °C. El criterio para utilizar el promedio y no los extremos se basa en que la pseudosección se realizó en términos composición de roca total.

En las figuras 5.4 y 5.5 incisos a), se ilustran con líneas en verde las condiciones mínimas (entre los  $\sim 570-650$  °C) y máximas (entre los  $\sim 620-685$  °C) de temperatura generadas con el par mineral Grt-Omp (Nakamura, 2009).

Mientras que, las condiciones del posible pico metamórfico ( $\sim 710$  °C y  $\sim 21.4$  kbar) obtenidas con el termómetro de Tomkins et al. (2007) de Zr en rutilo, se ilustran para la muestra Piax-13B (Fig. 5.6) con las líneas marcadas en verde, las cuales se encuentran entre los  $\sim 590-700$  °C. A su vez, se sobreponen las líneas en rosa que muestran las condiciones obtenidas con el termobarómetro de Nakamura (2009) utilizando el par mineral Grt-Omp, situadas entre los  $\sim 580-650$  °C (Fig. 5.6).



Tabla 5.2: Intervalo de isopleetas representadas en las pseudosecciones que se muestran en las figuras 5.1 a 5.6. Las intersecciones entre isopleetas están señaladas en cursiva. También se muestran las paragénesis y condiciones P-T deducidas por las intersecciones.

Intersección Isopleetas									
Pseudosección	Loc.	Isopleetas				Campo de estabilidad	Condiciones P-T		
		Grt [%mol]			Px [%mol]		Paragenesis	P (kbar)	T (°C)
		alm	grs	prp	jd				
BC	Piax-13	A	54.8-57.2	16.4-20.4	25.5-29	16-28	Grt Omp Qz Rt	~17, ~18 y ~21.8	~610, ~640 y ~700
			<i>56.4, 56 y 54.8</i>	<i>18</i>	<i>28.5, 28 y 26.5</i>	<i>19, 21 y 27</i>			
	M-49-1	A	48.5-60	15.5-18.5	28-30.8	16-29	Grt Omp Qz Rt	~17.5, ~19 y ~21	~605, ~645 y ~685
			<i>49.5, 49 y 48.5</i>	<i>16</i>	<i>28.4, 28.8 y 29.4</i>	<i>20, 24 y 28</i>			
	Piax-15	PT	66-71	8.6-10.4	17-24	25-36	Grt Omp Qz Rt Ilm	~17 y ~19	~650 y ~690
			<i>67.5, 68 y 67</i>	<i>9.6, 8.6 y 8.6</i>	<i>21.5, 22 y 23</i>	<i>31, 33 y 35</i>	Grt Omp Qz Rt	~20.8	~725
Piax-28	PT	60.2-63.2	7-8.2	27-30.5	20-30	Grt Omp Qz Rt Ilm	~15.9	~640	
		<i>62.2, 61.4 y 60.2</i>	<i>7.2, 7.4 y 7.6</i>	<i>28.5, 29 y 30</i>	<i>23.5, 26.5 y 29.5</i>	Grt Omp Qz Rt	~19 y ~21.8	~675 y ~710	
MF-MP3	PT	56-59	3.7-4.9	35-38.5	20.5-28	Grt Omp Qz Rt Ilm	~18 y ~20.5	~660 y ~680	
		<i>57.5 y 58.5</i>	<i>4.4 y 3.9</i>	<i>37 y 36.5</i>	<i>23.5 y 25</i>				
MF-D6814	PT	65-68.5	13.6-16	14.5-19.5	18-29.5	Grt Omp Qz Rt	~17, ~19 y ~21	~600, ~640 y ~675	
		<i>68, 67 y 66</i>	<i>15.2</i>	<i>15.5, 16.5 y 17.5</i>	<i>20.5, 23.5 y 26.5</i>				
Piax-Z3	PT	48-48.8	5.4-5.7	30.9-32.6	20.5-27.5	Grt Omp Px Qz Rt	~15.5	~620	
		<i>49.2, 48.8 y 48.6</i>	<i>5.5, 5.5 y 5.7</i>	<i>31.6, 32 y 32.1</i>	<i>20.5, 24 y 26.5</i>	Grt Omp Qz Rt	~17 y ~18.2	~670 y ~720	
MF-MP3	PT	58.8-63	18.5-21.5	14-19	17.5-26.5	Grt Omp Rt Ilm	~15.8, ~19 y ~21.5	~615, ~670 y ~705	
		<i>62.6, 60.6 y 59.2</i>	<i>20, 20 y 20.5</i>	<i>15, 17 y 18</i>	<i>18, 22.5 y 26</i>				
EBC	Piax-27	A	63-67	14.5-16	15-21	63.5-69.5	Grt Omp Qz Rt	~16.5, ~17.5 y ~21.5	~620, ~650 y ~720
			<i>66.5, 65 y 61.5</i>	<i>15.5, 15 y 15.5</i>	<i>15, 17 y 20</i>	<i>68.5, 66.5 y 64</i>			
Piax-15	PT	63-67	14.5-16	15-21	34-40	Grt Omp Qz Rt Ilm	~15.2, ~16.9 y ~19.9	~625, ~650 y ~725	
		<i>66.5, 65 y 61.5</i>	<i>15.5, 15 y 15.5</i>	<i>15, 17 y 20</i>	<i>35, 36 y 39</i>				
Piax-13B	A	59.2-67.8	19-23	13-18	16-24	Grt Omp Rt ilm	~16.8, ~17.9 y ~21.4	~620, ~670 y ~710	
		<i>70.8, 70.2 y 59.2</i>	<i>21, 19.5 y 20.5</i>	<i>14, 16 y 17</i>	<i>17.5, 20.5 y 23.5</i>				

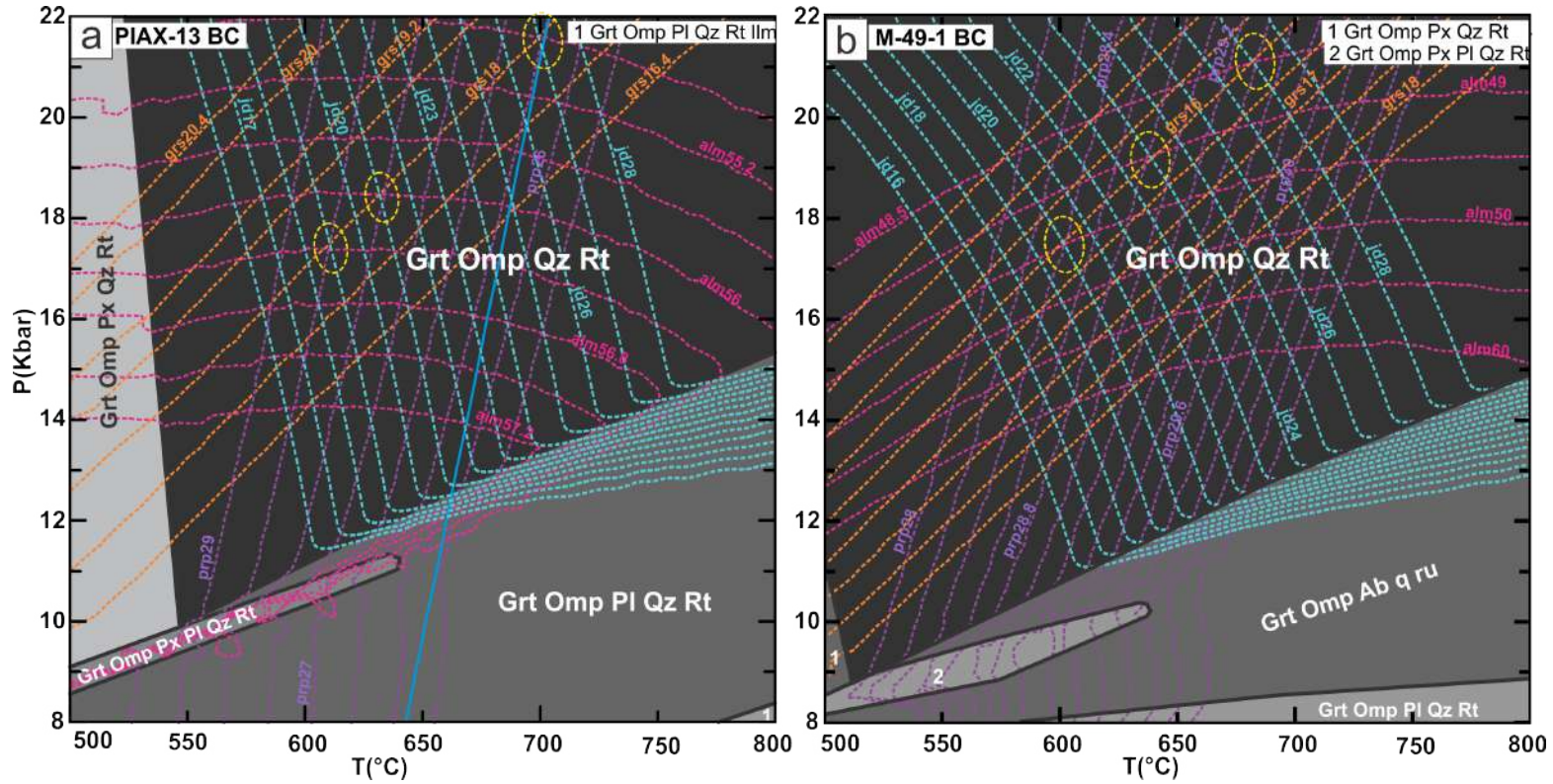


Figura 5.1: Pseudosecciones P-T calculadas para la composición de roca total BC (%wt) para las muestras pertenecientes al área de Asís. Eclogitas en un sistema cerrado  $MnNCFMAST$ . Isopletas calculadas para granate (Alm-rosa, Grs-naranja, Prp-morado) y clinopiroxeno (Jd-turquesa). Las elipses en amarillo indican las áreas de equilibrio P-T con base en las isopletas y en las observaciones petrográficas. a) Piax-13, la línea azul representa el promedio de las condiciones máximas obtenidas con el termómetro de Zr en rutilo Zr. b) M-49-1 (Murphy et al., 2006). Abreviaturas: Pl = plagioclasa; Px = piroxeno; Grt = granate; ilm = ilmenita; Omp= solución sólida Omp(HP) de Holland and Powell, 2007 (onfacita); rt = rutilo, Qz=cuarzo.

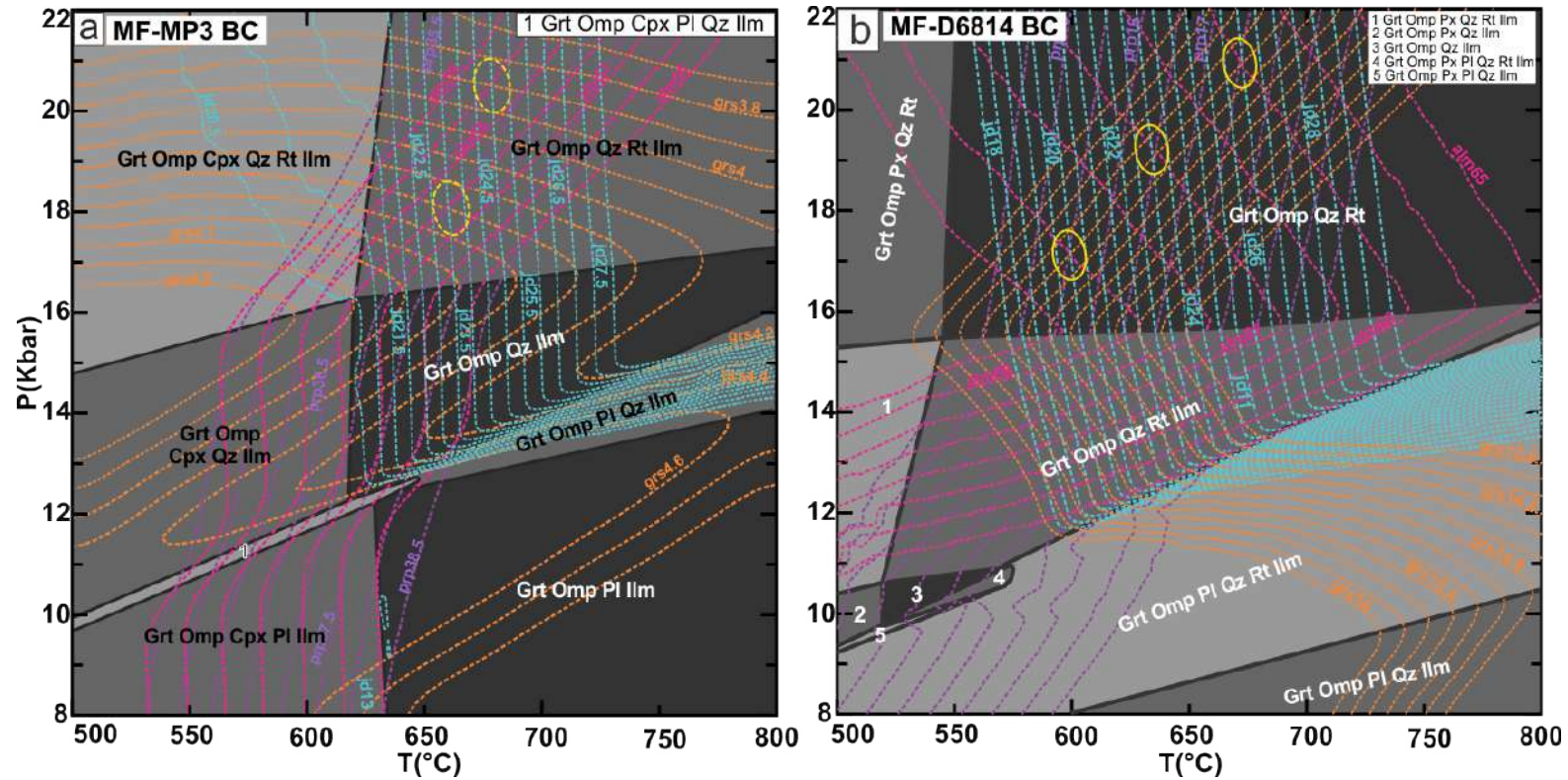


Figura 5.2: a) y b) Pseudosecciones P-T calculadas para la composición de roca total BC (%wt) para los datos de Meza-Figueroa (Tesis Doctoral, 1998) MF-MP3 y MF-D6814 pertenecientes al área de Piaxtla-Tecomatlán. Eclogitas en un sistema cerrado  $MnNCFMAST$ . Isopletas calculadas para granate (Alm-rosa, Grs-naranja, Prp-morado) y clinopiroxeno (Jd-turquesa). Las elipses en amarillo indican las áreas de equilibrio P-T con base en las isopletas y en las observaciones petrográficas. Abreviaturas: Pl = plagioclasa; Px = piroxeno; Grt = granate; ilm = ilmenita; Omp= solución sólida Omp(HP) de Holland and Powell, 2007 (onfacita); rt = rutilo, Qz=cuarzo.



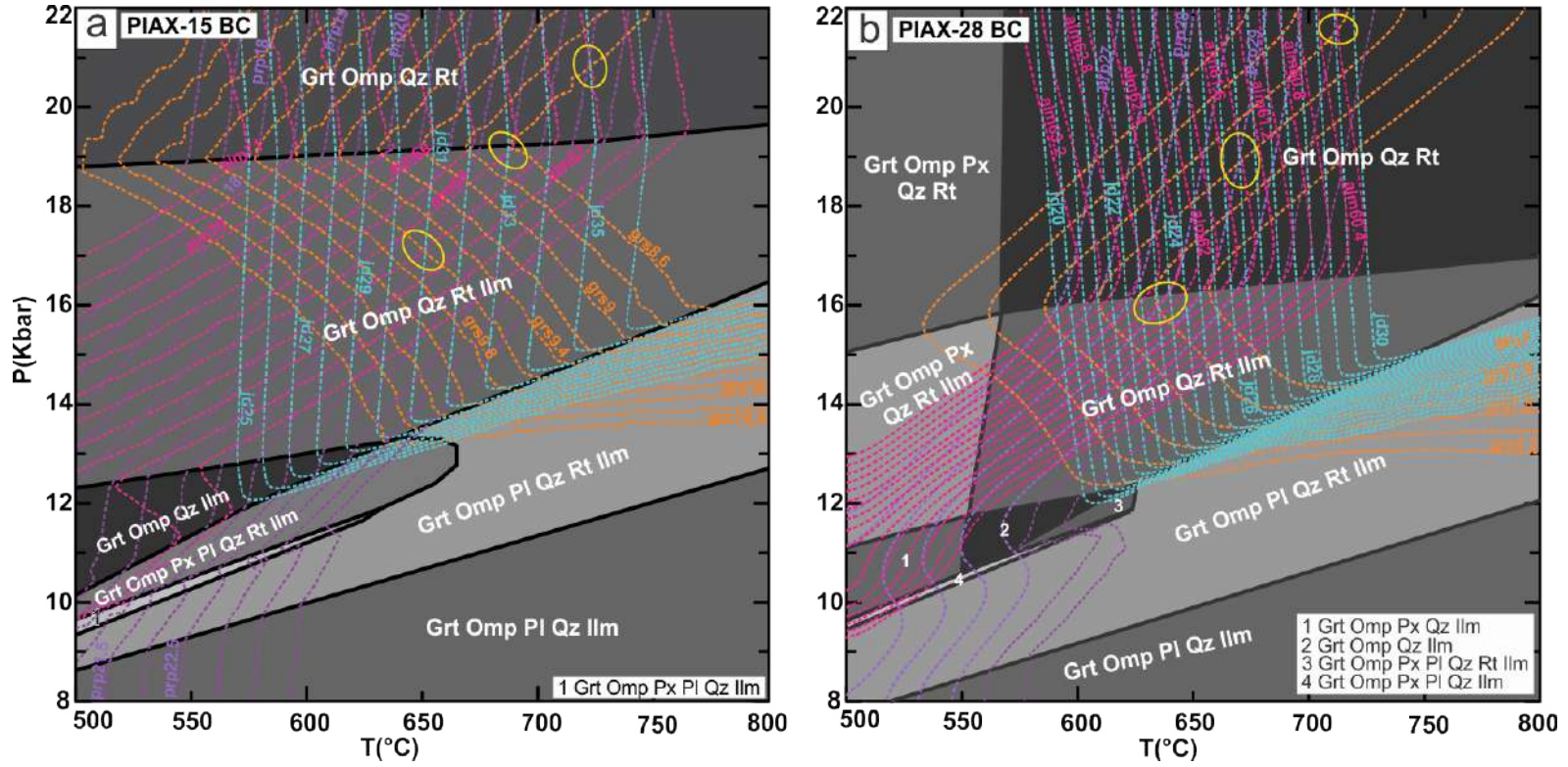


Figura 5.3: a) y b) Pseudosecciones P-T calculadas para la composición de roca total BC (%wt) para las muestras Piax-15 y Piax-28 pertenecientes al área de Piaxtla-Tecomatlán. Eclogitas en un sistema cerrado  $MnNCFMAST$ . Isojetas calculadas para granate (Alm-rosa, Grs-naranja, Prp-morado) y clinopiroxeno (Jd-turquesa). Las elipses en amarillo indican las áreas de equilibrio P-T con base en las isojetas y en las observaciones petrográficas. Abreviaturas: Pl = plagioclasa; Px = piroxeno; Grt = granate; ilm = ilmenita Omp = solución sólida Omph(HP) de Holland and Powell, 2007 (onfacita); rt = rutilo, Qz=cuarzo.

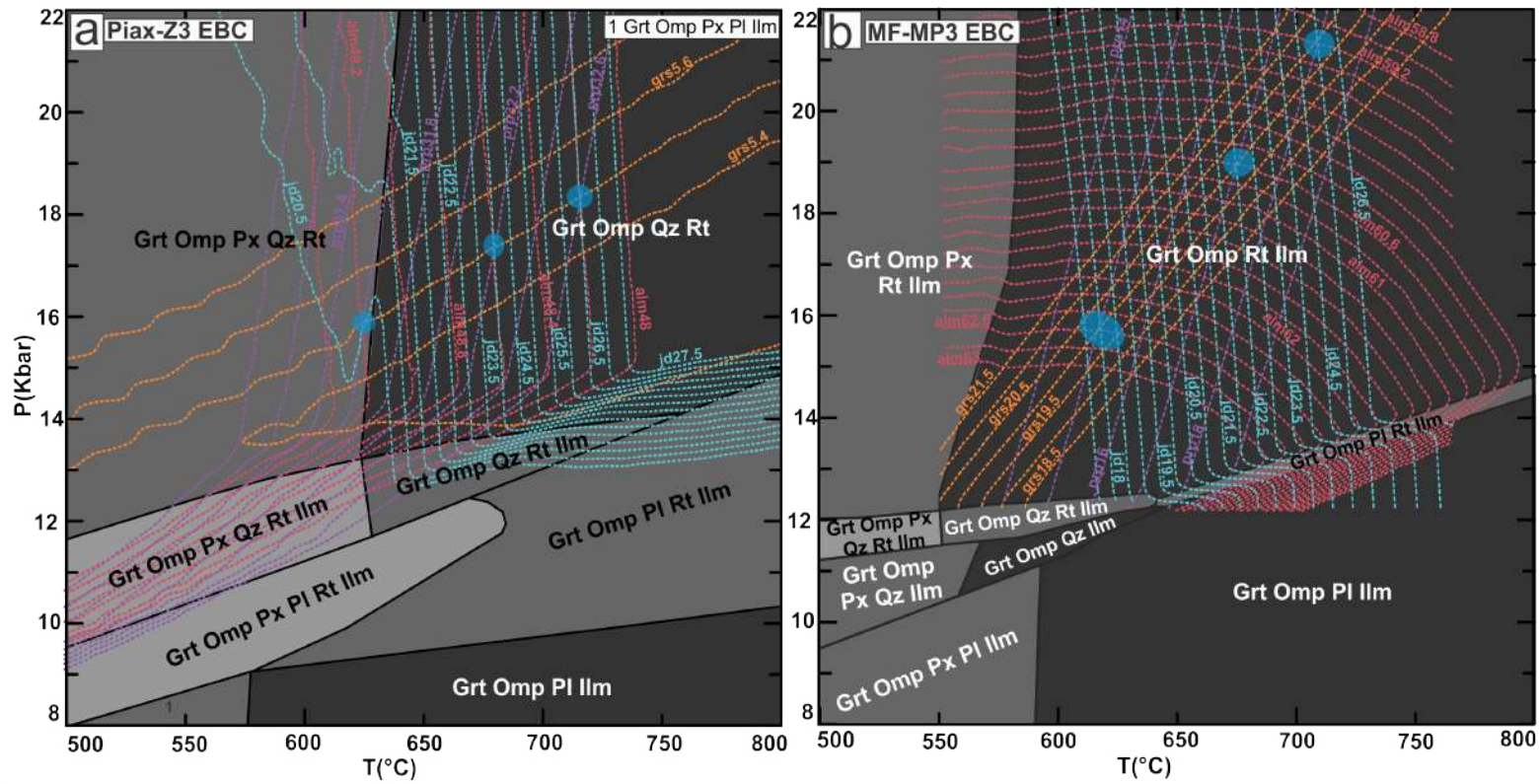
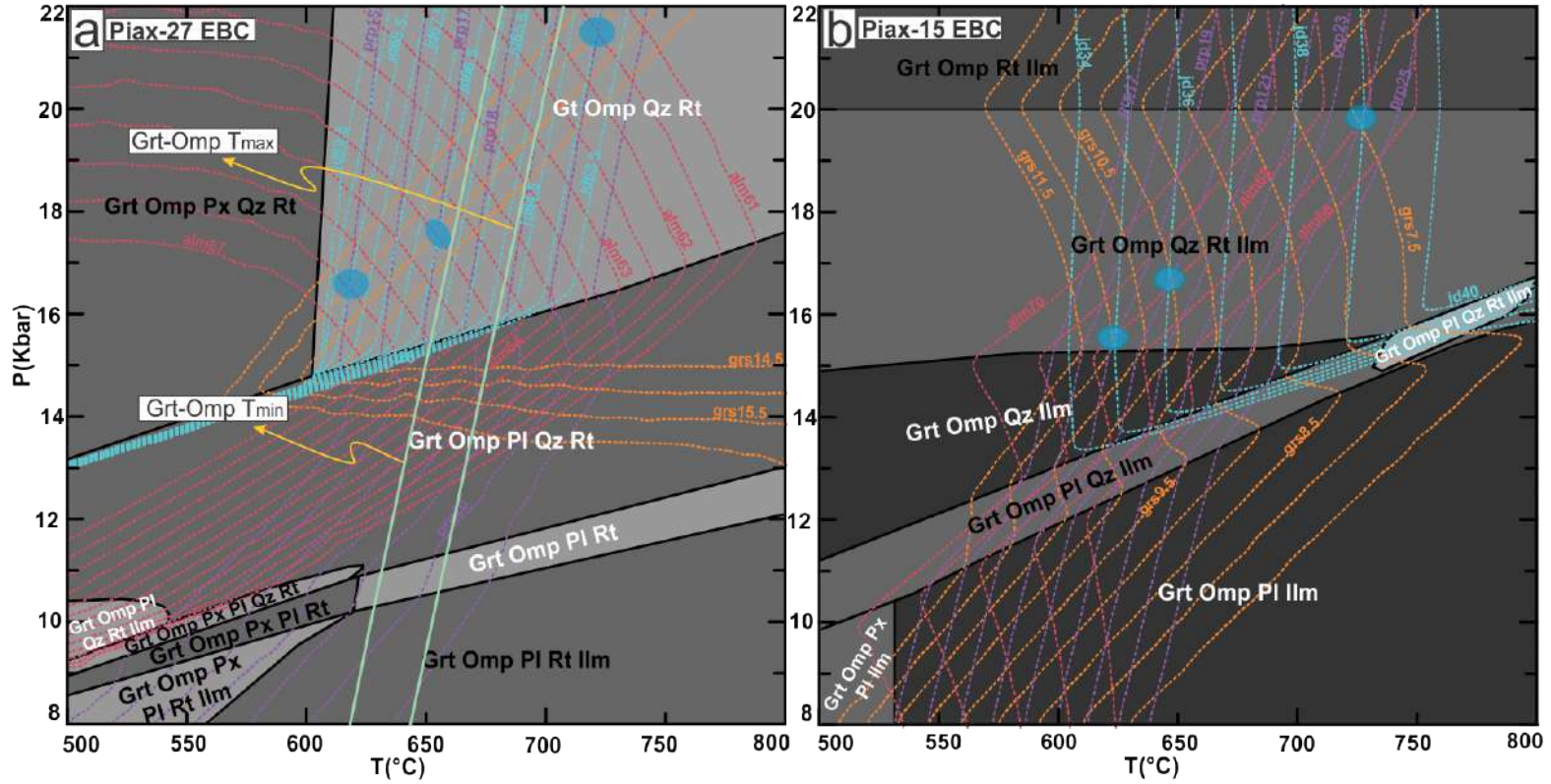


Figura 5.4: a) y b) Pseudosecciones P-T calculadas para la composición de roca efectiva EBC para las muestras Piax-Z3 y MF-MP3 pertenecientes al área de Piaxtla-Tecomatlán. Eclogitas en un sistema cerrado  $MnNCFMAST$ . Isopletas calculadas para granate (Alm-rosa, Grs-naranja, Prp-morado) y clinopiroxeno (Jd-turquesa). Las elipses en azul indican las áreas de equilibrio P-T con base en las isopletas y en las observaciones petrográficas. Las líneas en verde muestran las condiciones mínimas y máximas de temperatura generadas con el par mineral Grt-Omp (Nakamura, 2009). Abreviaturas: Pl = plagioclasa; Px = piroxeno; Grt = granate; ilm = ilmenita; Omp = solución sólida Omph(HP) de Holland and Powell, 2007 (onfacita); rt = rutilo, Qz=cuarzo.





65

Figura 5.5: a) y b) Pseudosecciones P-T calculadas para la composición de roca efectiva EBC para las muestras Piax-27 y Piax-15 pertenecientes al área de Asís y Piaxtla-Tecomatlán respectivamente. Eclogitas en un sistema cerrado  $MnNCFMAST$ . Isopletas calculadas para granate (Alm-rosa, Grs-naranja, Prp-morado) y clinopiroxeno (Jd-turquesa). Las elipses en azul indican las áreas de equilibrio P-T con base en las isopletas y en las observaciones petrográficas. Las líneas en verde muestran las condiciones mínimas y máximas de temperatura generadas con el par mineral Grt-Omp (Nakamura, 2009). Abreviaturas: Pl = plagioclasa; Px = piroxeno; Grt = granate; ilm = ilmenita; Omp = solución sólida Omph(HP) de Holland and Powell, 2007 (onfacita); rt = rutilo, Qz=cuarzo.

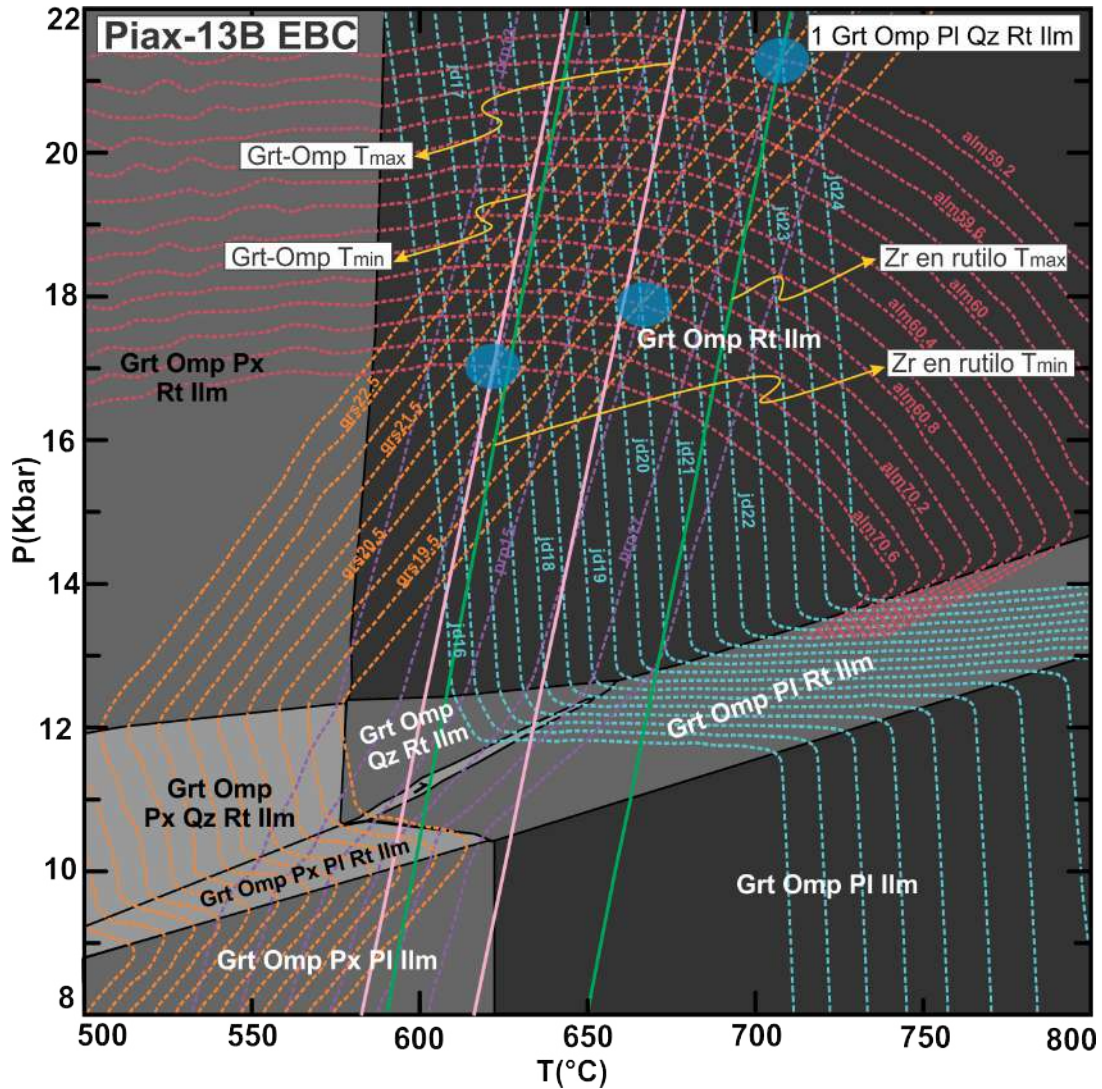


Figura 5.6: Pseudosección P-T calculada para la muestra Piax-13B del área de Asís, composición de roca total efectiva EBC, de una eclogitas en un sistema cerrado  $MnNCFMAST$ . Isopletas calculadas para granate (Alm-rosa, Grs-naranja, Prp-morado) y clinopiroxeno (Jd-turquesa). Las elipses en azul indican las áreas de equilibrio P-T con base en las isopletas y en las observaciones petrográficas, las líneas verde y rosa muestran las condiciones máximas y mínimas obtenidas con el termómetro de Zr en rutilo (Tomkins et al., 2007) y el par mineral Grt-Omp (Nakamura, 2009) respectivamente. Abreviaturas: PI = plagioclasa; Px = piroxeno; Grt = granate; Ilm = ilmenita; Omp = solución sólida Omph(HP) de Holland and Powell, 2007 (onfacita); Rt = rutilo, Qz = cuarzo.

### 5.1.2. Pseudosecciones de Anfibolitas

Las pseudosecciones para las anfibolitas (Tabla 5.1) de roca total (Fig. 5.7 y 5.8) y roca efectiva (Fig. 5.9) presentan dominios con estabilidad de anfíbol, granate, y clinopiroxeno, en casi toda las pseudosecciones menos en Ix-266 e Ix-164 en las cuales los dominios principales están acompañados por epidota. También, se observa titanita, clorita, albita y en menor proporción rutilo, cuarzo, ilmenita y mica blanca. Debido a que se obtuvieron pseudosecciones con distintas características se describen por separado:

#### Pi-12

El anfíbol-Ca es estable en todos los campos de la pseudosección, cabe destacar que a temperaturas mayores a  $\sim 510$  °C se observa pargasita y en todos los campos es estable la tremolita.

Se realizaron isopletras<sup>3</sup> y  $X_{Mg} = \sim 0.70-0.90$  %mol lo que indican que se tienen anfíboles cálcicos predominantemente (pargasita). El granate también aparece en todos los campos y presenta una composición preferentemente almandínica  $X_{alm} = \sim 40-60$  %mol. Las isopletras calculadas para la plagioclasa presentan una composición albitica con  $Ab = \sim 28-29$  %mol.

A su vez, la ilmenita aparece por debajo de los  $\sim 10$  kbar y a una temperatura menor de  $\sim 620$  °C. La clorita presenta un comportamiento similar al de la ilmenita surgiendo por debajo de los  $\sim 550$  °C. La epidota se genera por debajo de los  $\sim 720$  °C y el rutilo sólo se observa estable en unos cuantos campos, los cuales se señalan en líneas rojas en la Fig. 5.7, a).

#### Ix-266

El anfíbol-Ca (pargasita) y el granate (almandino) se mantienen estables en todos los campos de la pseudosección.

Las isopletras composicionales de  $Si$  a.p.f.u. y  $X_{Mg}$  en anfíbol presentan una composición de  $Si = \sim 6.7-7$  %mol y  $X_{Mg} = \sim 0.60-0.70$  %mol. El granate tiene una composición principal almandínica de  $X_{alm} = \sim 50-60$  % mol. La plagioclasa presenta una composición predominantemente albitica con  $X_{ab} = \sim 55-65$  %mol.

Por encima de los  $\sim 10$  kbar se mantienen estables los clinopiroxenos (diopsido-jadeita). Conforme aumenta la presión  $> \sim 11$  kbar y la temperatura  $> \sim 400$  °C la

<sup>3</sup>Para establecer la ubicación y con ello los rangos de las isopletras, los criterios usados fueron los siguientes: a) Datos previos (i. e. condiciones termobarométricas y composición mineral) encontrados en la literatura para las diferentes litologías presentes en el Ensamble Piactla; b) Observaciones petrográficas (i. e. la selección de los campos de estabilidad se basa en la paragénesis observada); y c) Composición mineral predominante (diagramas de discriminación. Isopletras composicionales de  $Si$  a.p.f.u. y  $X_{Mg} = Mg/(Mg + Fe)$  en anfíbol las cuales presentan una composición de  $Si = \sim 6.6-6.8$  %mol Estos mismos criterios se usaron para todas las isopletras en este capítulo.



ilmenita desaparece. La plagioclasa se mantiene estable conforme aumenta la presión  $> \sim 10$  kbar y la temperatura  $> \sim 400$  °C.

La ilmenita aparece a temperaturas altas ( $> \sim 550$  °C) y por debajo de los  $\sim 17$  kbar, y a temperaturas bajas ( $< \sim 550$  °C) por debajo de los  $\sim 13-14$  kbar. La clorita y la mica blanca surgen por debajo de los  $\sim 515$  °C (Fig. 5.7 b).

#### MF-D17814

El anfíbol-Ca (tremolita o pargasita), el granate (almandino) y la titanita aparecen estables en todos los campos de la pseudosección. Las isopleetas en anfíbol tienen composición de  $Si = \sim 6.4-7.5$  % mol y  $X_{Mg} = \sim 0.55-0.69$  % mol. El granate presenta una composición almandínica de  $X_{alm} = \sim 56-65$  %mol. La plagioclasa presenta una composición albitica con  $Ab = \sim 60-72$  % mol. La epidota (zoisita) tiene una composición de  $Zo = \sim 35-48$  % mol.

La pargasita es estable a temperaturas altas  $> \sim 420$  °C y por debajo de los  $< \sim 14$  kbar, mientras que la tremolita es estable en todos los campos de la pseudosección.

La plagioclasa aparece conforme aumenta la presión y la temperatura, los campos de estabilidad se observan por debajo de la curva en amarillo (Fig. 5.8, a).

La ilmenita aparece por debajo de los  $\sim 10$  kbar y a una temperatura menor de  $\sim 640$  °C. La clorita presenta un patrón similar al de la ilmenita surgiendo estable por debajo de los  $\sim 450$  °C. El rutilo no se encuentra en equilibrio en todos los campos, las líneas en rojo representan el cambio del rutilo a otras fases (ej. Ilmenita) (Fig. 5.8, a).

#### MF-MI6

El anfíbol es estable en todos los campos de la pseudosección al igual que el granate. El anfíbol tiene una composición predominante cálcica (pargasita y tremolita) con  $Si = \sim 6-7.4$  % mol y  $X_{Mg} = \sim 0.40-0.90$  % mol. El granate presenta una composición preferentemente almandínica  $X_{alm} = \sim 45-58$  % mol.

La plagioclasa tiene composición predominantemente albitica con  $Ab = \sim 55-67$  % mol. Es notorio que los piroxenos se encuentran estables por encima de los  $\sim 14$  kbar y temperaturas por arriba de los  $\sim 550$  °C, por debajo de esa temperatura están estables a presiones superiores a los  $\sim 12.5-13$  kbar.

La mica blanca (fengita) y la ilmenita aparecen por debajo de los  $\sim 14$  kbar y en un intervalo de temperatura de los  $\sim 480$  °C a los  $\sim 550$  °C. La clorita se genera por debajo de los  $\sim 525$  °C. La estabilidad de la epidota desciende conforme aumenta la presión, es decir, a presiones altas ( $> \sim 16$  kbar) es estable por debajo de los  $\sim 560$  °C y a presiones bajas ( $< \sim 16$  kbar) es estable por debajo de los  $\sim 680$  °C, presenta una composición  $Zo = \sim 33-47$  % mol. Por último, el rutilo no se encuentra estable en todos los campos, las líneas en rojo acotan los campos de estabilidad, ver Fig. 5.8, b).

**Ix-164 EBC**

El anfíbol-Ca (pargasita y tremolita) es estable en todos los campos de la pseudosección, con una composición de  $Si \approx 6-7.4$  y  $X_{Mg} \approx 0.51-0.64$  % mol. De igual manera, el granate se observa en todos los campos y presenta una composición almandinica en  $X_{alm} \approx 59-62$  % mol.

Al igual que otras muestras, la plagioclasa pierde estabilidad conforme disminuye la presión y la temperatura, es decir, a bajas temperaturas ( $< 500$  °C) es estable por debajo de los  $\sim 10$  kbar, muestra una composición  $Ab \approx 29-55$  % mol.

La ilmenita se mantiene estable en todos los campos de la pseudosección, y en comparación con las demás muestras, no hay presencia de rutilo; la clorita aparece por debajo de los  $\sim 500$  °C.

Los clinopiroxenos (diopsido-jadeita) son estables por encima de los  $\sim 700$  °C, por debajo de esta temperatura la estabilidad se observa por encima de los  $\sim 16.5$  kbar (Fig. 5.9 a).

**MF-MI6 EBC**

El anfíbol (pargasita y tremolita) y el granate se mantienen estables en todos los campos de la pseudosección. Las isopletas composicionales de  $Si$  a.p.f.u. y  $X_{Mg}$  en anfíbol presentan una composición de  $Si \approx 6.7-7$  %mol y  $X_{Mg} \approx 0.69-0.80$  % mol. El granate tiene una composición predominante almandinica de  $X_{alm} \approx 55-60$  % mol.

La epidota se mantiene estable por debajo de los  $\sim 670$  °C y tiene una composición  $Zo \approx 12-23$  % mol.

La plagioclasa aparece a temperaturas mayores a  $\sim 550$  °C. La ilmenita y la mica blanca aparecen a temperaturas menores a  $\sim 580$  °C y por debajo de los  $\sim 9$  kbar.

La clorita es estable conforme disminuye la temperatura ( $< \sim 580$  °C) y aumenta la presión. El rutilo por debajo de los  $\sim 720$  °C se mantiene estable mientras por encima de esta temperatura aparece la titanita (Fig. 5.9, b).

Las isopleas calculadas para cada pseudosección se intersectan en varios puntos:

Para las anfibolitas de roca total: Las muestras Piax-12 e Ix-266 presentan isopleas que se conjugan entre los 550-600 °C y en 12-14.5 kbar (elipses amarillas, Fig. 5.7 y Tabla 5.3) las isopleas de las muestras MF-D1784, MF-MI6, también tienen sus intersecciones entre los 450-550 °C y en 12-14 kbar (elipses amarillas, Fig. 5.8 y Tabla 5.3).

Las isopleas construidas en pseudosecciones con roca efectiva: Las muestras Ix-164 y MF-MI6 exhiben isopleas que se cruzan entre los 475-550 °C y en 10-14 kbar (elipses amarillas, Fig. 5.9 y Tabla 5.3).

Tabla 5.3: Intervalo de isopleas representadas en las pseudosecciones que se muestran en las figuras 5.7 a 5.9. Las intersecciones entre isopleas están señaladas en cursiva. También se muestran las paragénesis y condiciones P-T deducidas por las intersecciones.

		Intersección Isopleas					Campo de estabilidad	Condiciones P-T		
Pseudosección	Loc.	Isopleas						Paragenesis	P (kbar)	T (°C)
		Grt (Alm)	Ep (Zo)	Pl (Ab)	Si	X <sub>mg</sub>				
		[%mol]			[a.p.f.u]	[%mol]				
BC	Piax-12	A	49.5-52 <i>52</i>	-	29.1-29.3 <i>29.2</i>	6.60-6.80 <i>6.65</i>	0.76-0.80 <i>0.76</i>	Amp Grt Ep Pl Qz Ttn Rt	~13	~600
	Ix-266	IX	56-57 <i>56.5</i>	-	56-59 <i>59</i>	6.78-6.84 <i>6.82</i>	0.61-0.65 <i>0.65</i>	Amp Grt Cpx Pl Ttn Ilm	~14.2	~575
	MF-D1784	PT	59-60	38-42	64.5-67	6.62-6.76	0.61-0.67	Amp Grt Ep Pl Qz Ttn Rt	~12.5	~460
			<i>59 y 59.5</i>	<i>38 y 40</i>	<i>64.5 y 66.5</i>	<i>6.66 y 6.70</i>	<i>0.64 y 0.67</i>	Amp Grt Pl Qz Ttn Rt	~13.5	~480
MF-MI6	MIM	51.5-53.5 <i>52</i>	34-36 <i>34</i>	57-58 <i>58</i>	6.5-6.7 <i>6.6</i>	0.7-0.8 <i>0.7</i>	Amp Grt Ep Cpx Pl Rt	~13.5	~570	
EBC	Ix-164	IX	60.8-61.1	-	30-50	6.5-6.7	0.57-0.62	Amp Grt Cpx Ilm	~11	~500
			<i>61.4 y 61.6</i>	-	<i>30 y 50</i>	<i>6.5 y 6.7</i>	<i>0.61</i>	Amp Grt Cpx Pl Ilm	~11.5	~540
	MF-MI6	MIM	59-64 <i>64 y 62</i>	-	-	6.91-6.99 <i>6.95 y 6.98</i>	0.70-0.77 <i>0.72 y 0.76</i>	Amp Grt Ep Chl Ilm	~10.9 y ~13.4	~490 y ~500

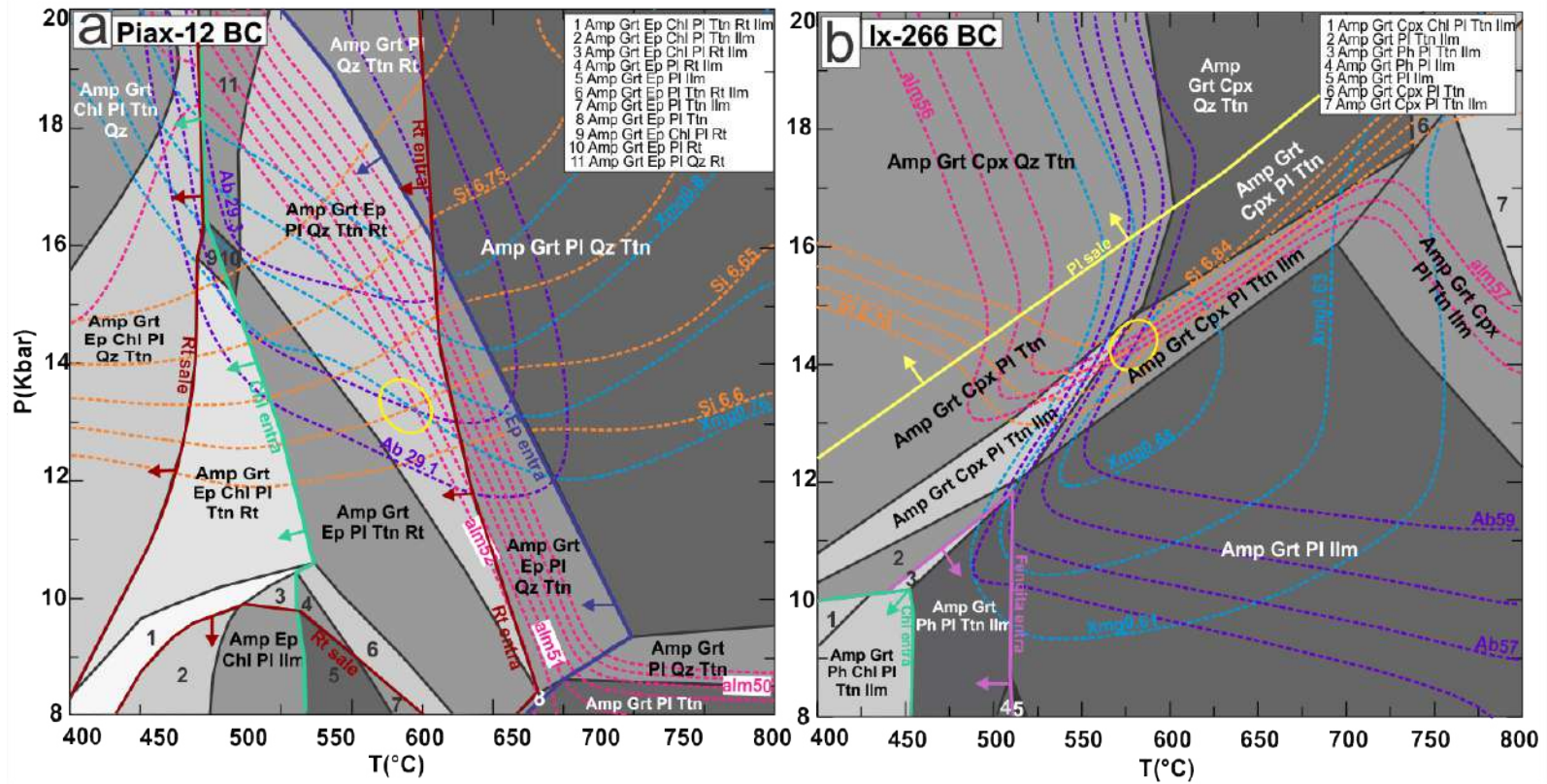


Figura 5.7: a) Piax-12 y b) Ix-266 muestras de las áreas de Asís e Ixcamilpa respectivamente. Pseudosecciones P-T calculadas para la composición de roca total (%wt). Anfibolitas en un sistema cerrado  $MnNCFMASHT$ . Isopletas calculadas para el granate (Alm-rosa), para el anfíbol (Si a.p.u.f.-naranja, Xmg-azul) y modales (Ab-morado). Las líneas solidas indican las fronteras de entrada y salida en la formación de una fase mineral (Pl-amarillo, Chl-verde, Ep-azul, Rt-rojo y Ph-lila). Las elipses en amarillo indican las áreas de equilibrio P-T con base en las isopletas, en los análisis de microsonda y en las observaciones petrográficas. Abreviaturas: Ab = albita; Pl= plagioclasa; Amp=anfíbol; Cpx =clipiroxeno; Chl=clorita; Grt = granate; Ilm = ilmenita; Rt = rutilo; Ttn= titanita; Qt=cuarzo; Ep=Epidota.

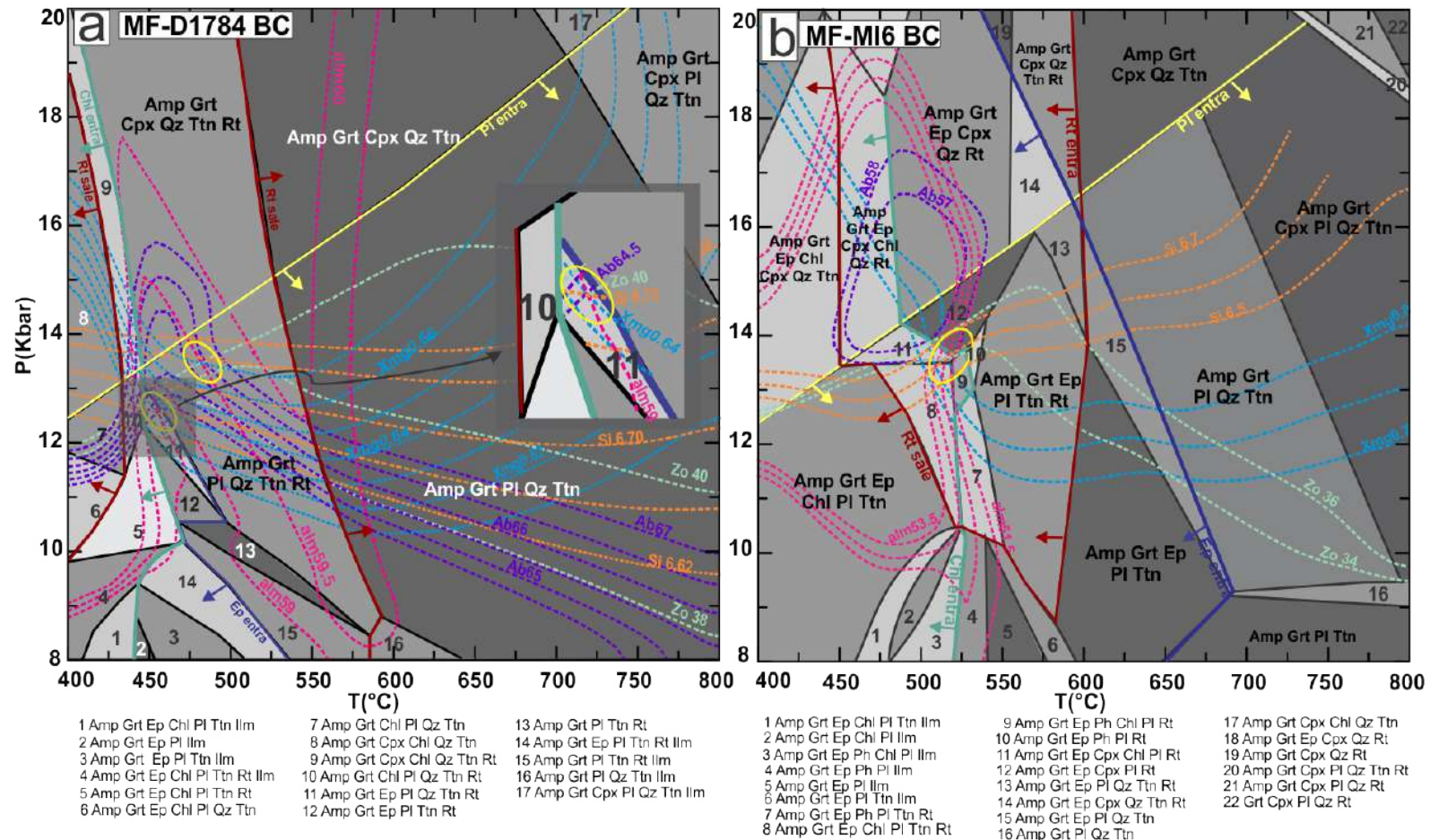


Figura 5.8: a) MF-D1784 y b) MF-MI6 para las áreas de Piaxtla-Tecomatlán, ambas muestras tomadas de Meza-Figueroa (Tesis Doctoral, 1998). Pseudosecciones P-T calculadas para la composición de roca total BC (%wt). Anfibolitas en un sistema cerrado *MnNCFMASHT*. Isopletas calculadas para el granate (Alm-rosa), para el anfíbol (Si a.p.u.f.-naranja, Xmg-azul) y modales (Abmorado, Ep/Zo-verde menta). Las líneas solidas indican las fronteras de entrada y salida en la formación de una fase mineral (Pl-amarillo, Chl-verde, Ep-azul y Rt-rojo). Las elipses en amarillo indican las áreas de equilibrio P-T con base en las isopletas, en los análisis de microsonda y en las observaciones petrográficas. Abreviaturas: Ab = albita; Pl=plagioclasa; Amp=anfíbol; Cpx =clipiroxeno; Chl=clorita; Grt = granate; Ilm = ilmenita; Rt = rutilo; Ttn= titanita; Qz=cuarzo; Zo=zoisita; Ep= epidota.



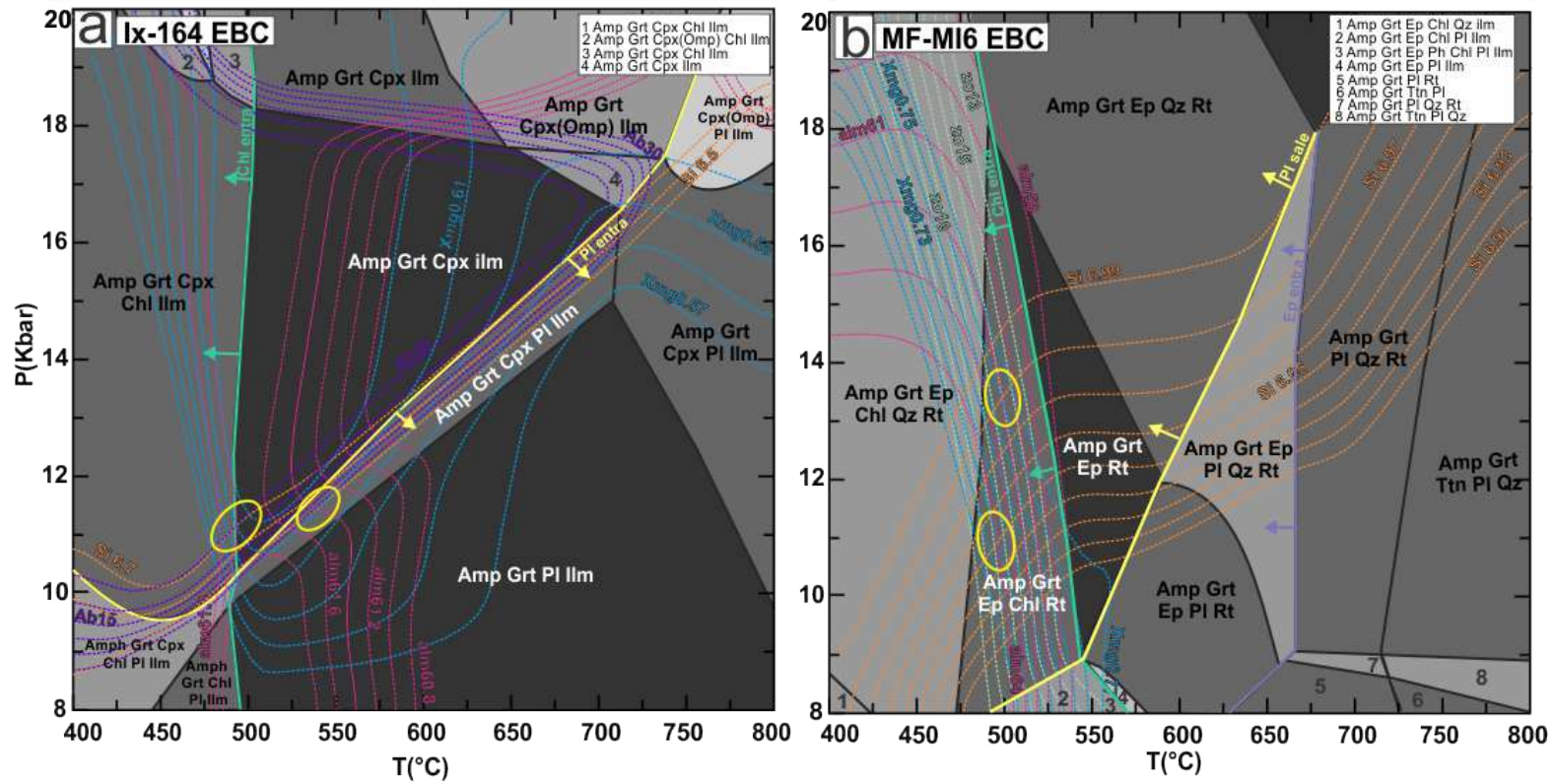


Figura 5.9: a) Ix-164 y b) MF-MI6 para las áreas de Ixcamilpa y Piaxtla-Tecomatlán respectivamente, análisis de la muestra b) tomada de Meza-Figueroa (Tesis Doctoral, 1998). Pseudosecciones P-T calculadas para la composición de roca efectiva EBC. Anfibolitas en un sistema cerrado  $MnNCFMASHT$ . Isopletas calculadas para el granate (Alm-rosa), para el anfíbol (Si a.p.u.f.-naranja, Xmg-azul) y modales (Ab-morado, Ep/Zo-verde menta). Las líneas solidas indican las fronteras de entrada y salida en la formación de una fase mineral (Pl-amarillo, Chl-verde, Ep-Lila). Las elipses en amarillo indican las áreas de equilibrio P-T con base en las isopletas, en los análisis de microsonda y en las observaciones petrográficas. Abreviaturas: Ab = albita; Pl=plagioclasa; Amp=anfíbol; Cpx =clipiroxeno; Chl=clorita; Grt = granate; Ilm = ilmenita; Rt = rutilo; Ttn= titanita; Qz=cuarzo; Zo=zoisita; Ep= epidota.

### 5.1.3. Pseudosecciones de Esquistos azules

En las pseudosecciones  $P - T$  para los esquistos azules con roca total (Tabla 5.1; Fig. 5.10 y 5.11); y roca efectiva (Tabla 5.1 y Fig.5.12) se observan patrones similares entre ellas:

El anfíbol-Ca (pargasita) está presente en casi todas las pseudosecciones; para las muestras Ix-58 BC y PL-05 BC está presente en todos los campos. En la muestra Ix-233BC la inestabilidad del anfíbol se restringe a unos cuantos campos de alta presión  $> \sim 11 \text{ kbar}$  y por debajo de los  $\sim 550 \text{ }^\circ\text{C}$ . Mientras que para las muestras Ix-184EBC y MIM-Z10EBC la estabilidad se encuentra por arriba de los  $\sim 530 \text{ }^\circ\text{C}$ , cabe mencionar que Ix-184EBC carece de pargasita.

El anfíbol-Na (Gln-glaucofano) en la mayoría de las pseudosecciones esta restringido a condiciones de alta presión, los campos de estabilidad están por encima de los  $\sim 9-11 \text{ kbar}$ . A lo largo de la pseudosección se mantiene una relación proporcional entre la T y la P. Es decir, al incrementarse la temperatura la estabilidad del glaucofano está a mayores presiones. La muestra Ix-184EBC presenta un patrón distinto, la estabilidad para el glaucofano esta por debajo de los  $\sim 550 \text{ }^\circ\text{C}$  y sobre los  $\sim 12 \text{ kbar}$ .

El granate (Grt, almandino) para la mayoría de las pseudosecciones es estable por encima de los  $\sim 570-600 \text{ }^\circ\text{C}$ . Para la muestra Ix-233BC es estable en el intervalo de temperatura  $\sim 460-630 \text{ }^\circ\text{C}$  y a todas las presiones. En la muestra MIM-Z10EBC, presenta campos de estabilidad por arriba de los  $\sim 480 \text{ }^\circ\text{C}$  y los  $\sim 13 \text{ kbar}$ ; y  $> \sim 570 \text{ }^\circ\text{C}$  y por debajo de los  $\sim 14 \text{ kbar}$ .

La plagioclasa (Pl, albita) esta estable por debajo de los  $\sim 10-13 \text{ kbar}$ , tiene un comportamiento similar al del glaucofano, conforme aumenta la temperatura aumentan los campos de estabilidad a mayores presiones en la mayoría de las pseudosecciones. En la muestra Ix-184EBC se ve un comportamiento distinto, el campo de estabilidad de la plagioclasa se establece entre los  $\sim 400 \text{ }^\circ\text{C}$  y los  $\sim 640 \text{ }^\circ\text{C}$  a presiones por debajo de los  $\sim 14 \text{ kbar}$ .

La epidota (Ep, zoisita) es estable es casi todos los campos de las pseudosecciones, sin embargo, no hay epidota en los campos que están por encima de los  $\sim 630-650 \text{ }^\circ\text{C}$  y por debajo de los  $\sim 11-12 \text{ kbar}$ . Para las muestras Ix-184EBC y MIM-Z10EBC la epidota se observa estable en todos los campos.

El clinopiroxeno (Cpx, jadeita) presente en todas las pseudosecciones, es estable por encima de los  $\sim 14 \text{ kbar}$ . Para la mayoría de las muestras la hedenbergita es estable a bajas temperaturas por debajo de los  $\sim 550 \text{ }^\circ\text{C}$ , en la muestra PL-05BC aparece entre los  $\sim 500 \text{ }^\circ\text{C}$  y los  $\sim 530 \text{ }^\circ\text{C}$  y por encima de los  $\sim 18 \text{ kbar}$ . Mientras que el diopsido es estable en todos los campos que presenten clinopiroxeno.

La ilmenita (Ilm) es estable sobre los  $\sim 445 \text{ }^\circ\text{C}$  para la muestra Ix-184EBC. Para las

muestras: Ix-233BC e Ix-58BC, se observa la estabilidad entre los  $\sim 550$  °C y los  $\sim 650$ - $670$  °C, mientras que por encima de los  $\sim 650$ - $670$  °C la estabilidad esta por debajo de los  $\sim 18$  kbar. En PL-05BC la estabilidad se restringe a campos por debajo de los  $\sim 17$  kbar y por encima de los  $\sim 530$  °C. Mientras que para la muestra MIM-Z10EBC no es estable por debajo de los  $\sim 490$  °C y por encima de los  $\sim 14$  kbar; ni en los campos que están por arriba de los  $\sim 16$  kbar y mayores a  $\sim 680$  °C.

En casi todas las pseudosecciones el rutilo (Rt) sólo se observa estable en campos de más altas temperaturas  $\sim 650$  °C y en presiones mayores a  $\sim 16$  kbar, para la muestra Ix-184EBC se encuentra estable por debajo de los  $\sim 470$  °C y por encima de los  $\sim 13$  kbar.

La clorita (Chl) y la fengita (Ph) se encuentran presentes en todos los campos de todas las pseudosecciones. La titanita (Ttn) aparece por encima de los  $\sim 14$  kbar para la mayoría de las pseudosecciones, en la muestra Ix-184EBC se observa en campos con temperaturas  $\sim 470$  °C y la muestra MIM-Z10EBC no presenta titanita.

Se realizaron isopleetas composicionales (para todas las pseudosecciones) de  $Mg = Mg/(Mg + Fe)$  en Anfíbol-Na y  $Si$  a.p.f.u. en fengita, las cuales presentan rangos de composición de  $X_{Mg} = \sim 0.9$  a 2 % mol y  $Si = \sim 3.2$  a 3.5 % mol respectivamente (Tabla 5.4).

Las isopleetas calculadas para cada pseudosección se intersectan en varios puntos:

Para los esquistos azules de roca total: La muestra Ix-233BC presenta isopleetas que se intersectan entre los  $\sim 550$ - $600$  °C y en  $\sim 14$ - $16$  kbar (elipses amarillas, Fig. 5.10 y y Tabla 5.4); las isopleetas de la muestras Ix-58BC se intersectan entre los  $\sim 550$ - $600$  °C y en  $\sim 14$ - $16$  kbar (elipses amarillas, Fig. 5.10, a y Tabla 5.4), para PL-05BC tienen intersección entre los  $\sim 550$ - $580$  °C y en  $\sim 13$ - $14$  kbar (elipses amarillas, Fig. 5.11, b y Tabla 5.4).

Para los esquistos azules de roca efectiva: Las muestras Ix-184EBC y MIM-Z10EBC exhiben isopleetas que se cruzan entre los  $\sim 475$ - $550$  °C y  $\sim 450$ - $480$  °C respectivamente y ambos en  $16$ - $17$  kbar (elipses amarillas, Fig. 5.12 a y b; Tabla 5.4).



Tabla 5.4: Intervalo de isopletras representadas en las pseudosecciones que se muestran en las figuras 5.10 a 5.12. Las intersecciones entre isopletras están señaladas en cursiva. También se muestran las paragénesis y condiciones P-T deducidas por las intersecciones.

Intersección Isopletras						
Pseudosección	Loc.	Isopletras		Campo de estabilidad	Condiciones P-T	
		Si [a.p.f.u]	X <sub>mg</sub> [%mol]	Paragenesis	P (kbar)	T (°C)
BC	lx-233	IX	3.32-3.54 <i>3.38</i>	1.70-1.83 <i>1.79</i>	Gln Ep Chl Ph Amp Ttn	~15 ~560
	lx-58	IX	3.32-3.54 <i>3.38 Y 3.32</i>	1.74-2 <i>1.88 Y 1.90</i>	Gln Ep Chl Ph Amp Ttn Ilm Gln Ep Chl Ph Amp Pl Ilm	~15.5 ~575 ~14 ~585
	PL-05	MIM	3.32-3.46 <i>3.37</i>	1.48-1.78 <i>1.48</i>	Gln Ep Chl Ph Amp Ttn Qz	~13.8 ~550
EBC	lx-184	IX	3.26-3.46 <i>3.38</i>	0.92-1.06 <i>0.96</i>	Gln Ep Chl Ph Cpx Ilm	~15 ~490
	MIM-Z10	MIM	3.30-3.36 <i>3.22</i>	1.06-1.14 <i>1.07</i>	Gln Ep Chl Ph Cpx Qx Rt	~14.8 ~480

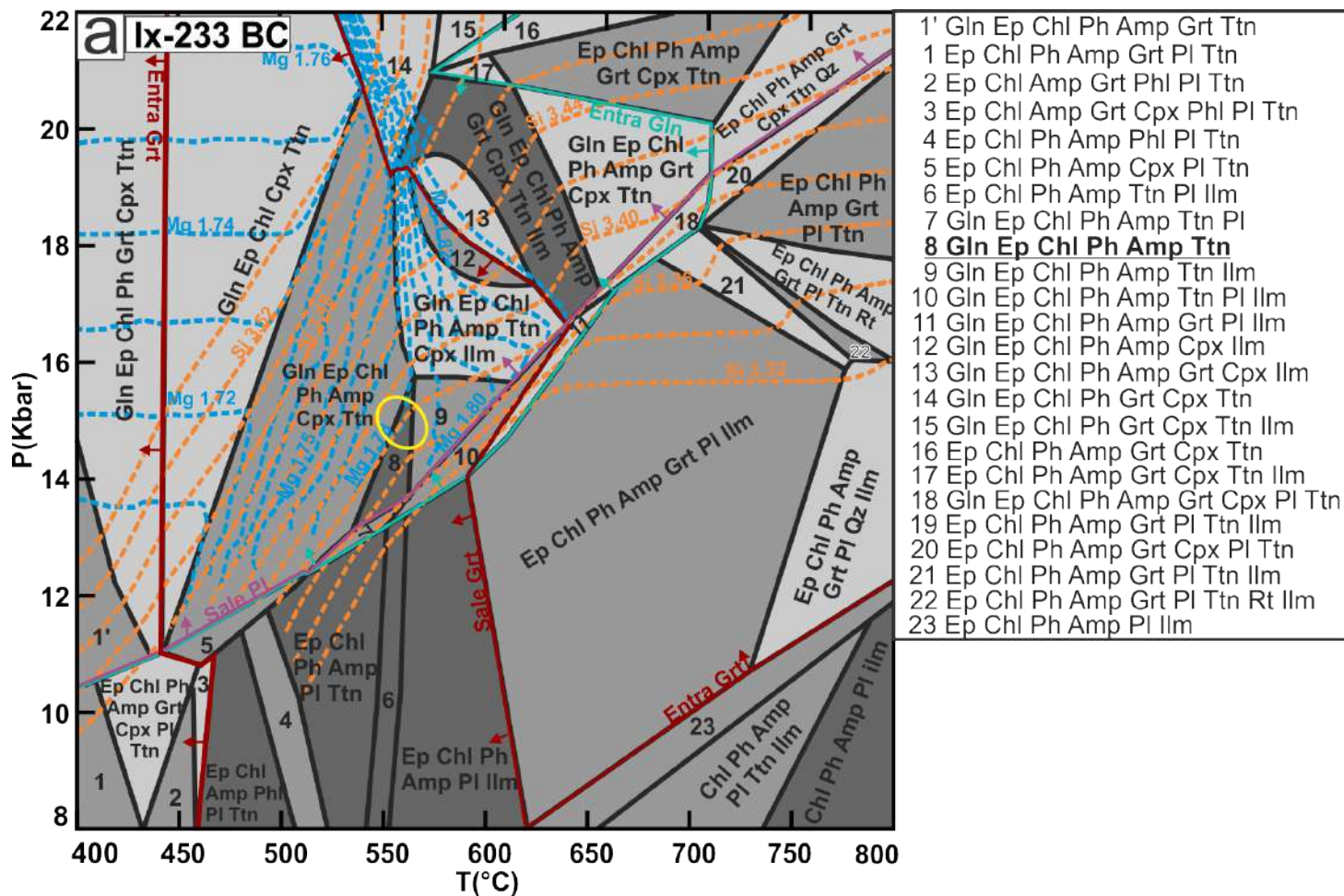


Figura 5.10: Pseudosección P-T calculada para la composición de roca total BC (%wt) para un esquistos azul en un sistema cerrado *MnNCFMASHT*. Isopletas calculadas para el anfíbol (X<sub>mg</sub>-azul), para la fengita (Si a.p.u.f.-naranja). Las líneas solidas indican las fronteras de entrada y salida en la formación de una fase mineral (Grt-rojo, Gln-verde, Pl-Lila). Las elipses en amarillo indican las áreas de equilibrio P-T con base en las isopletas y en las observaciones petrográficas. Abreviaturas: Gln = glaucofano; Ep = epidota; Amp = anfíbol; Chl= clorita; Ph = fengita; Pl = plagioclasa; Cpx = piroxeno; Grt = granate; Ilm = ilmenita; Ttn = titanita; Rt = rutilo; Qz = cuarzo.

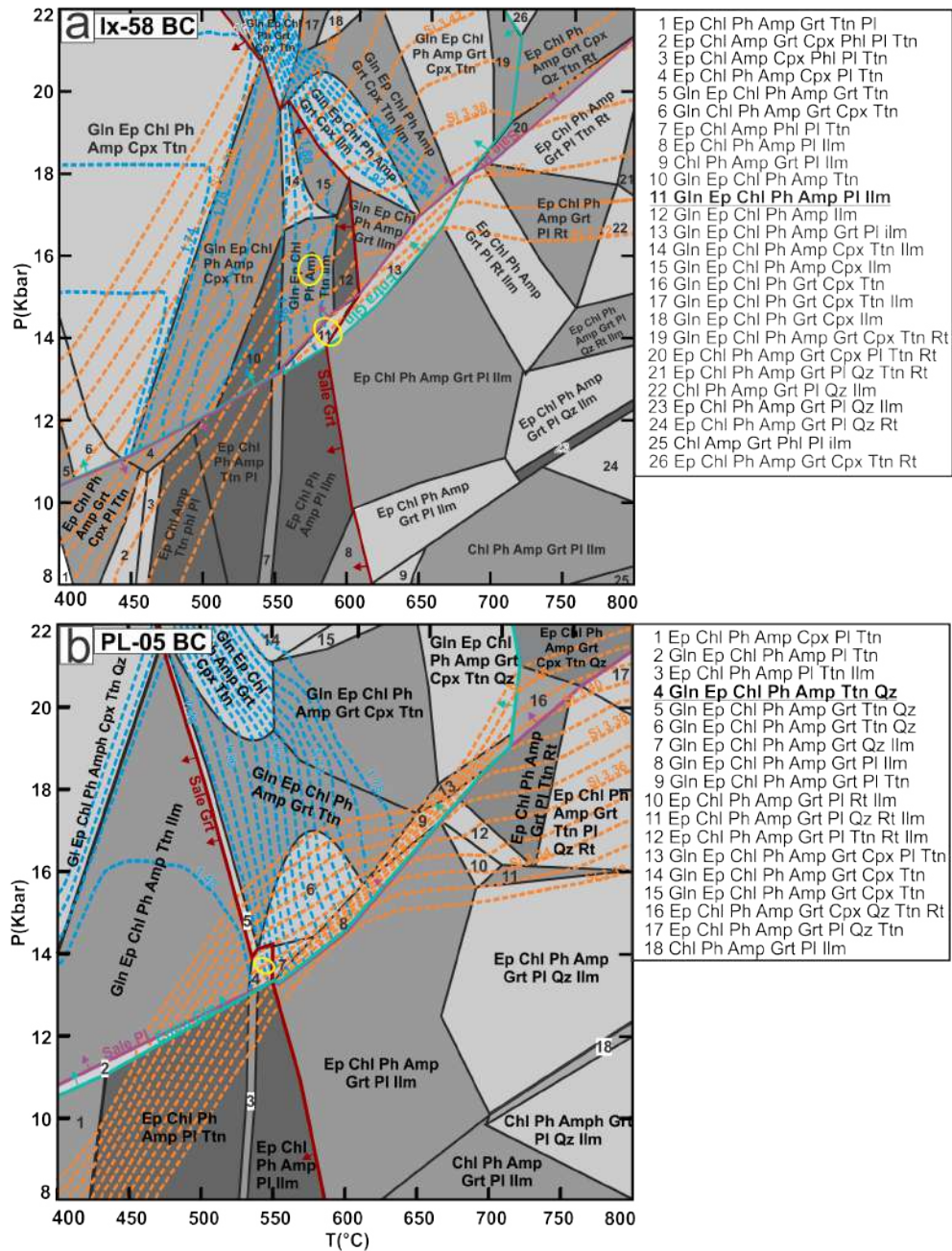


Figura 5.11: a) Ix-58 muestra perteneciente al área de Ixcamilpa y b) PL-05 muestra del área de Mimilulco (análisis tomado de Pérez-López, tesis de Licenciatura, 2014). Pseudosecciones P-T calculadas para la composición de roca total BC (%wt) para esquistos azules en un sistema cerrado  $MnNCFMASHT$ . Isopleetas calculadas para el anfíbol (Xmg-azul), y para la fengita (Si a.p.u.f.-naranja). Las líneas solidas indican las fronteras de entrada y salida en la formación de una fase mineral (Grt-rojo, Gln-verde, Pl-Lila). Las elipses en amarillo indican las áreas de equilibrio P-T con base en las isopleetas y en las observaciones petrográficas. Abreviaturas: Gln = glaucofano; Ep = epidota; Amp = anfíbol; Chl = clorita; Ph = fengita; Pl = plagioclasa; Cpx = piroxeno; Grt = granate; Ilm = ilmenita; Ttn = titanita; Rt = rutilo; Qz = cuarzo.



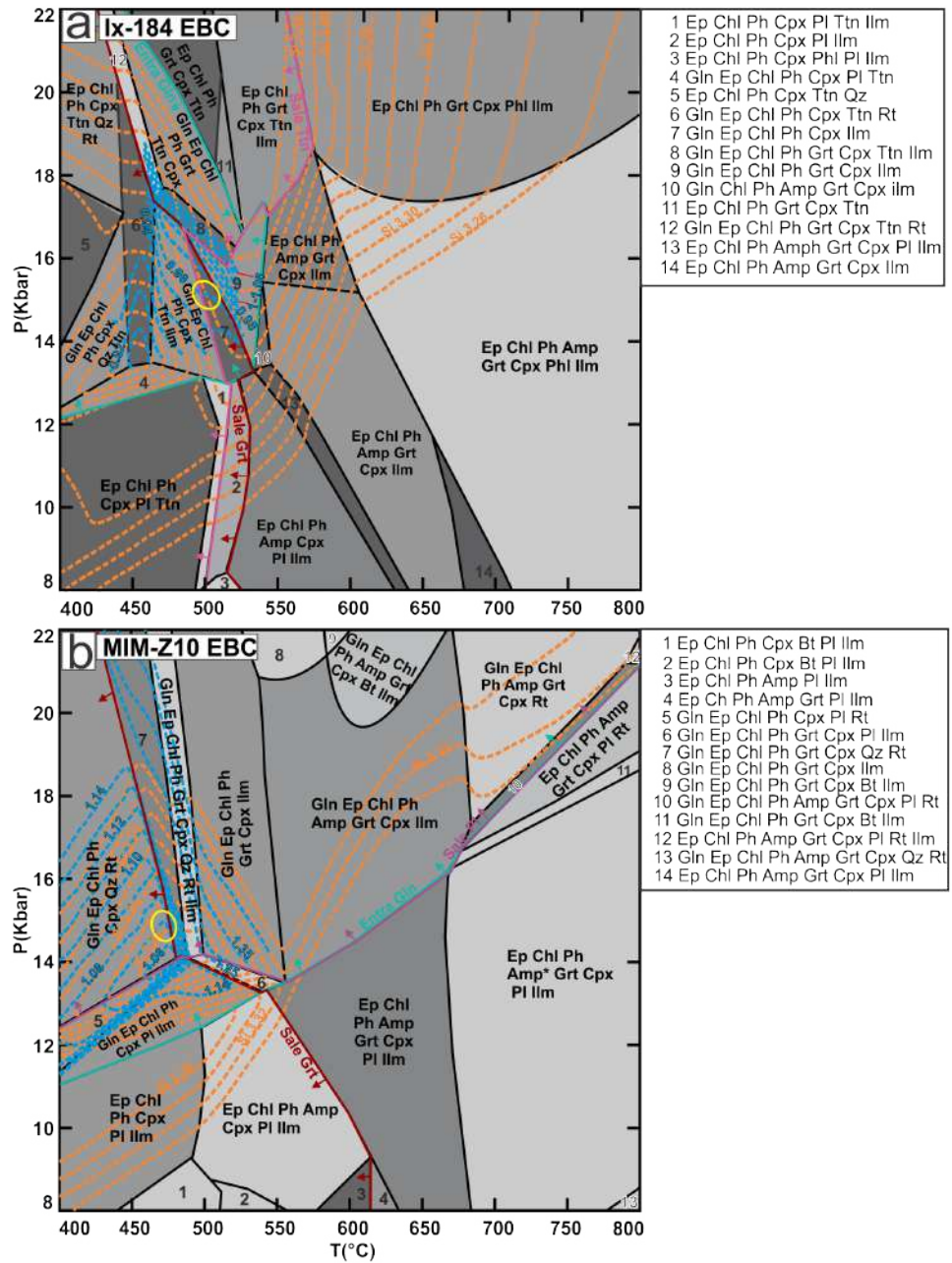


Figura 5.12: a) *Ix-184* muestra perteneciente al área de Ixcamilpa y b) *MIM-Z10* muestra del área de Mimilulco. Pseudosecciones  $P-T$  calculadas para la composición de roca efectiva EBC para esquistos azules en un sistema cerrado  $MnNCFMASHT$ . Isopletas calculadas para el anfíbol ( $X_{Mg}$ -azul), y para la fengita (*Si a.p.u.f.*-naranja). Las líneas sólidas indican las fronteras de entrada y salida en la formación de una fase mineral (*Grt*-rojo, *Gln*-verde, *Pl*-Lila y *Ttn*-rosa). Las elipses en amarillo indican las áreas de equilibrio  $P-T$  con base en las isopletas y en las observaciones petrográficas. Abreviaturas: *Gln* = glaucofano; *Ep* = epidota; *Amp* = anfíbol; *Chl* = clorita; *Ph* = fengita; *Phl* = flogopita; *Pl* = plagioclasa; *Cpx* = piroxeno; *Grt* = granate; *Ilm* = ilmenita; *Ttn* = titanita; *Rt* = rutilo; *Qz* = cuarzo. *Amp\** = Anfíbol Na-Ca y Ca.

## Capítulo 6

# Discusión y Conclusiones

La presente disertación de tesis ha compilado y utilizado estudios previos y nuevos, combinando datos termodinámicos y termobarométricos, permitiendo generar pseudo-secciones para un mejor entendimiento de los procesos y las trayectorias metamórficas de las rocas de alto grado que conforman el Ensemble Piaxtla y a su vez, permite poder ubicarlas en el modelo tectónico de canal de subducción propuesto por otros autores (Ramos-Arias and Keppie, 2010, 2011; Ramos-Arias et al., 2012a; Keppie et al., 2012).

Por otro lado, los análisis químicos realizados con la microsonda electrónica (EMPA) y fluorescencia de rayos-X, inclusive en distintos laboratorios y diferentes autores (Meza-Figueroa, 1998; Meza-Figueroa et al., 2003; Murphy et al., 2006; Ramos-Arias and Keppie, 2011; Pérez-López, 2014; Estrada-Carmona et al., 2016) señalan que no hay diferencias químicas significativas entre las rocas y los minerales de la misma especie que se observan en las distintas muestras a lo largo del cinturón de alta presión del Ensemble Piaxtla. Es el caso de las rocas máficas de Ixcamilpa y Mimilulco que tiene una firma geoquímica toleítica, de tipo MORB (Murphy et al., 2006), lo que sugiere un origen de piso oceánico. Esto reafirma un origen similar de las rocas de alto grado (litologías máficas) que conforman el Ensemble Piaxtla.

### 6.1. Retrogresión en el cinturón de alta presión en el Ensemble Piaxtla

A lo largo del cinturón de alta presión, los grados metamórficos se ven modificados por los fenómenos de retrogresión hasta facies de esquisto verde, a su vez, asociados a los grados de deformación por cizalla, es decir, existen zonas donde la cizalla es más intensa y otras en las cuales es posible distinguir lentes que preservan la alta presión,

ocasionado por la partición de la deformación en distintas litologías.

En el presente trabajo, fue posible distinguir dos trayectorias de retrogresión significativa.

En los esquistos azules, es posible observar al menos dos generaciones de cristales de anfíbol, la primera generación está representada por el núcleo de anfíbol sódico (Glaucofano-Ferroglaucofano), y sobrecreciendo coronas de anfíboles sódico-cálcico (Winchita-Barriosita).

En eclogitas y anfibolitas, se distinguen dos generaciones de cristales de granate, la segunda generación no presenta perfiles de zonificación mientras que en la primera generación se observan cristales de mayor tamaño y algunos con zoneamiento, sin embargo, ambos casos ostentan una composición almandínica casi constante. A su vez, en las anfibolitas se observan cristales de barroisita y hornblenda con bordes cloritizados.

La paragénesis ideal de una eclogita se conforma por minerales anhidros, por lo tanto, la aparición de fases hidratadas (anfíboles y micas) da lugar a una nueva asociación mineral generada por la adición de fluidos <sup>1</sup> en el sistema, los cuales posiblemente provienen de la deshidratación de las rocas sedimentarias que entran a la subducción, originando el metamorfismo de retrogresión (Oh and Liou, 1998). Por lo tanto, la retrogresión en las eclogitas está marcada con la aparición de minerales hidratados, las micas (fengita) en la foliación externa y las cloritas (clinocloro y charmosita) que están en proximidad a los clinopiroxenos y/o tomando elementos de los anfíboles (pargasita, hornblenda, barroisite, Fe-winchita, catoforita, Fe-glaucofano y glaucofano). Esta aparición de minerales conforman paulatinamente las nuevas facies minerales pertenecientes a anfibolitas y esquistos azules.

Por tales razones, los parámetros petrográficos que indican y explican los procesos de retrogresión para cada facie son:

### 6.1.1. Trayectoria Eclogita-Esquisto azul-Esquisto verde

La transición en alta  $P$  y baja  $T$  donde se reposiciona un reequilibrio en condiciones de facies de esquisto azul, inferida por la observación de texturas relictas, representadas por pseudomorfos de granate sustituidos enteramente por clorita (clinocloro), se deduce de la forma poligonal (semicircular con ángulos en los lados, Fig. 6.1, a y b), así como en otros trabajos previos (Pérez-López, 2014), Fig. 6.1, c), por lo cual, es factible considerar que los esquistos azules están representando una etapa de retrogresión.

Además, estos pseudomorfos de granate coexisten con la paragénesis de  $Gln + Amp +$

<sup>1</sup>Se refiere únicamente a  $H_2O$ , excluyendo a todos los otros posibles fluidos que pudieran tener interacción con el sistema (p. Ej.,  $CO_2$ , etc.).

*Ep*, Fig. 6.1, a y b) y supone un posible estadio metamórfico previo en dónde la asociación mineral *Grt* + *Gln* coexistían (Fig. 6.1, c).

A su vez, los pseudomorfos pueden estar representando una alteración progresiva, es decir, procesos más complicados que pueden depender de reacciones químicas provocadas por la interacción con fluidos (e.g. metasomatismo).

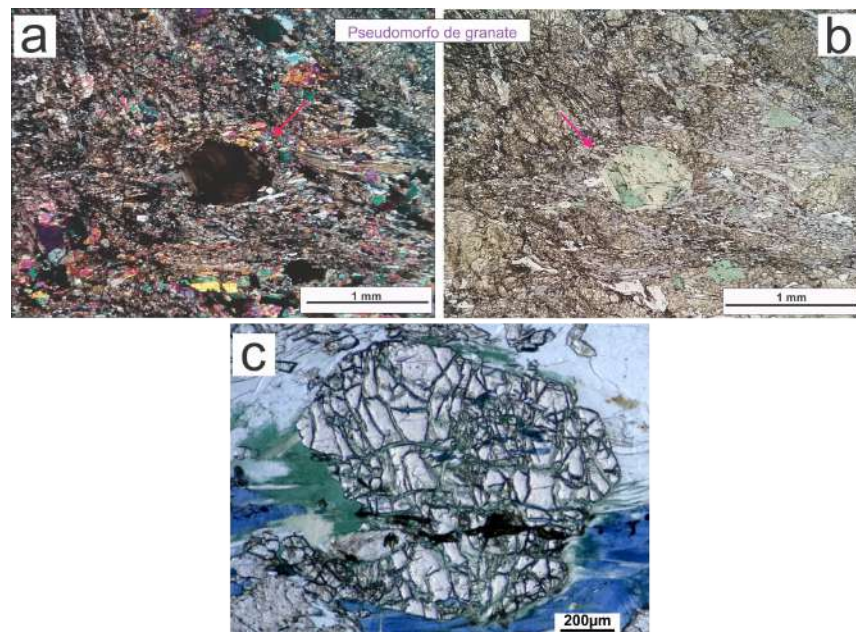


Figura 6.1: Pseudomorfo de clorita sin mineral relicto de granate, en esquisto azul (MIM-Z10), a) nícoles cruzados y b) nícoles paralelos; c) granate remplazado por clorita y rodeado por gln-rbk (micrografía tomada de Pérez-López.,2014)

Por otro lado, se tiene que considerar que a escala de observación petrográfica es difícil visualizar una retrogresión o progresión secuencial de ciertos minerales (e.g anfiboles, etc), sin embargo, debe considerarse que sí este fuese el caso, los pseudomorfos tendrían que estar acompañados por minerales que generen una paragénesis prógrada coherente (p.ej. desarrollo de clinopiroxenos), o bien podrían observarse minerales relictos de una facies de menor grado metamórfico, sin embargo, están ausentes en la sección delgada.

Con el modelado de pseudosecciones, se estiman posibles condiciones P-T de  $\sim 13.8$ - $15.5$  kbar y  $\sim 480$ - $580$  °C (Tab.5.4). Dentro de estos parámetros se establece el equilibrio de la paragénesis representativa de los esquistos azules  $Gln + Ep + Ph \pm Pl \pm Qz \pm Amp(Ca, Ca - Na) \pm Chl$ , asociación presente en las muestras estudiadas y en las pseudosecciones.

Asimismo, se observa que la aparición de minerales representativos de la retrogresión desde facies de eclogita hasta esquisto verde siguen un tren de reacciones como las propuestas por Li et al. (2017),  $Cpx(Omp) + Grt + Qz + H_2O = Gln + Ep$  ;  $Ep + Gln + Qz + H_2O = Tr + Chl + Ab$ . Se observa actinolita sustituyendo a otros anfíboles como la winchita y barroisita, minerales que se forman a partir del glaucófano mediante reacciones retrogradadas (Bucher and Grapes, 2011).

### 6.1.2. Trayectoria Eclogita-Afibolita-Esquisto verde

Las anfibolitas granatíferas evidencian la retrogresión de las eclogitas más claramente, en primer lugar, porque las rocas eclogíticas se han encontrado en lentes dentro de las unidades de anfibolita, y en segunda instancia, porque la paragénesis de  $Amp + Pl$  en texturas simplectíticas se encuentra sustituyendo a los clinopiroxenos. Otras texturas que evidencian la retrogresión son los clinopiroxenos anhedrales con bordes de alteración inmersos en la textura nematoblástica.

Y ya en facies de anfibolita se observa una paragénesis mineral típica de anfibolita, donde el granate relicto de la eclogita cohabita con el anfíbol(horblenda y barroisita), la plagioclasas (albita), micas (fengita) y epidota principalmente en una paragénesis estable posiblemente resultado de una reacción del tipo  $Grt + Omp + Qz + H_2O = Amp(Ca) + Ep + Pl$  (Takasu, 1984) con poca presencia de clorita (clinocloro) que incipientemente comienza a sustituir a los anfíboles.

La transición de eclogita a anfibolita es inferida por la petrografía y por el modelado de pseudosecciones en condiciones P- T de  $\sim 10.9-14.2$  kbar y  $\sim 460-600$  °C, (Tab.5.3). Es una etapa descompresiva que condujo a un estadio metamórfico caracterizado por un conjunto de minerales estables de:  $Amp + Grt + Pl \pm Ph \pm Ep \pm Qz \pm Chl \pm Ttn \pm Rt$ .

La última etapa está caracterizada por un metamorfismo retrógrado, representado por la aparición de minerales típicos (e.g. actinolita) desarrollados en facies de esquisto verde.

Mediante las observaciones petrográficas se infiere la posibilidad de que se tengan otros reequilibrios metamórficos durante el recorrido de la exhumación, posiblemente borrados por la sobreimpresión y la heterogeneidad mineral presente en las muestras estudiadas.



### 6.1.3. Trayectorias de retrogresión metamórficas para las rocas de alta presión el Ensamble Piaxtla

Las distintas curvas  $P-T$  construidas por distintos autores para el Ensamble Piaxtla definen trayectorias similares en las áreas de Ixcamilpa con pico metamórfico en  $\sim 9.2-16.7$  kbar y  $\sim 440-550$  °C (Ramos-Arias et al., 2012a). Mimilulco, con pico metamórfico en  $\sim 11-15$  kbar y  $\sim 565 \pm 37$  °C (Meza-Figueroa et al., 2003). En Las Minas, con pico metamórfico en  $\sim 13-13.5$  kbar y  $\sim 550 \pm 10$  °C (Elías-Herrera et al., 2006; Keppie et al., 2010). Y en San Francisco de Asís, con pico metamórfico en  $\sim 14-30$  kbar y  $\sim 650-750$  °C (Middleton et al., 2007),  $\sim 12-13$  kbar y  $491-609$  °C (Vega-Granillo et al., 2007). Y en Piaxtla,  $\sim 22$  kbar y  $\sim 690$  °C (Hernández-Uribe et al., 2019) y los Granitoides Esperanza (Reyes-Salas, 2003) definen picos metamórficos en  $\sim 16$  kbar y  $\sim 720$  °C. Todas ellas con posterior retrogresión hacia presiones de  $\sim 8-12$  kbar y temperaturas entre  $\sim 500-450$  °C.

Los rangos de presión y temperatura encontrados en este trabajo para las eclogitas de Piaxtla son de  $\sim 15-21.8$  kbar y  $\sim 600-725$  °C. Mientras que las condiciones termobarométricas para las eclogitas de Asís son de  $\sim 16.5-21.8$  kbar y  $\sim 600-720$  °C. Dichas rocas experimentaron condiciones de alta presión y temperatura en facies de eclogita, con pico metamórfico, marcado por la paragénesis  $Grt + Omp \pm Qz + Rt$ .

Éste pico metamórfico se sitúa en las pseudosecciones en los intervalos máximos de  $P - T$  de  $\sim 19-21.5$  kbar y  $\sim 640-725$  °C para las eclogitas de Piaxtla y Asís, y puntualmente se tienen condiciones máximas de  $\sim 22$  kbar y  $\sim 710.4$  °C obtenidas mediante la isopleta generada por el termómetro de Zr en rutilo para las eclogitas de Asís. A su vez, los intervalos de  $\sim 21-22$  kbar y  $\sim 678.9-707.4$  °C obtenidos con el geotermómetro de Nakamura (2009) para el par  $Grt - Omp$ , para las eclogitas de Piaxtla y Asís (Fig.6.2).

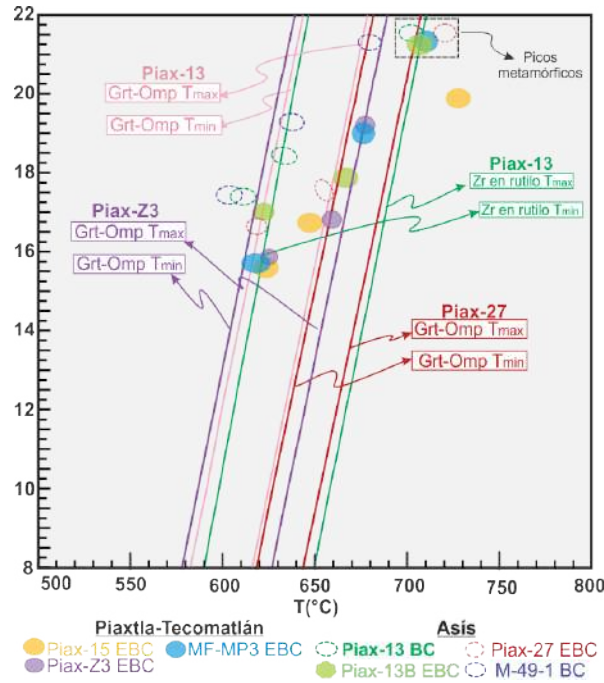


Figura 6.2: Isopletas generadas con geotermómetros, usando el Zr en rutilo y el par Grt-Omp con el geotermómetro de Nakamura (2009), para las muestras de eclogitas en el Ensamble Piaxtla.

Los rangos obtenidos en comparación con los datos descritos en el primer párrafo de esta sección, están por encima, es decir, los valores son de mayor magnitud tanto los valores de temperatura como de presión, sin embargo, las condiciones de temperatura para las eclogitas de Asís son similares a las descritas por Middleton (2007), y las eclogitas de Piaxtla son similares a las modeladas por Hernández-Uribe (2019). Además, estos picos metamórficos, indican que posiblemente las rocas subducidas alcanzaron profundidades por alrededor de los  $\sim 65$  km profundidad mayor a la propuesta por Keppie et al., 2011, en dónde propone profundidades alcanzadas de  $\sim 40$  km o que las isothermas de  $\sim 700$  °C estuvieran "plegadas" para así generar eclogitas a niveles corticales de  $\sim 40$  km, interface en la cual el contraste de temperatura genera una curva en la estructura térmica (Peacock, 1996; Wada et al., 2015).

En la figura 6.3; se representan los estadios metamórficos y las posibles trayectorias P-T generadas con la sobreposición de las elipses de cada pseudosección, cabe recalcar que las elipses indican el sitio de la intersección de isopletas que representan al equilibrio mineral más probable dentro de un campo de estabilidad dentro de una pseudosección.

A su vez, se han podido estimar las profundidades máximas mediante el modelo termodinámico aplicado a las muestras de Mimilulco, Piaxtla e Ixcamilpa, permitiendo limitar satisfactoriamente las condiciones P-T en equilibrio para la paragenésis

mineral, en el pico metamórfico dentro del campo de estabilidad de las eclogitas, y la hidratación en las muestras pertenecientes a Ixcamilpa y Mimilulco. El modelado multi-equilibrio también ayudó a revisar las trayectorias de evolución retrógrada en dos distintos caminos metamórficos de recristalización (Fig. 6.4), durante el enfriamiento y la descompresión.

En la figura 6.4, se observa la sobreposición de las trayectorias previamente construidas por otros autores y las generadas para este trabajo, en comparación: i) los otros autores han propuesto distintas trayectorias para distintas unidades que conforman en Ensamble Piaxtla, ii) la trayectoria prógradas propuestas en este trabajo se hace en términos de sólo las litologías sin hacer distinción de unidades; la premisa es suponer como primer estadio las facies de eclogita. Sin embargo, se observa que las trayectorias deducidas son similares a las ya propuestas previamente.

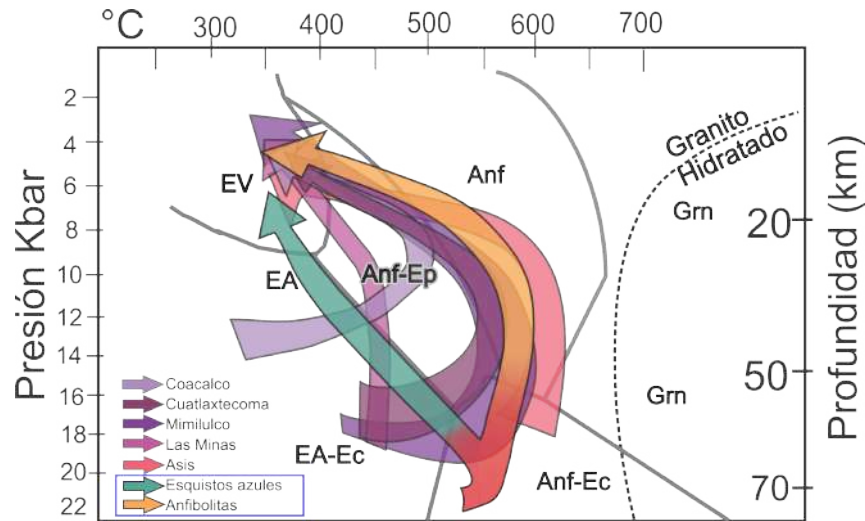


Figura 6.4: Trayectorias  $P-T$ , En verde turquesa y amarillo se observan las trayectorias propuestas en este trabajo en comparación con las trayectorias previamente propuestas por otros autores: Mimilulco por Meza-Figueroa et al., (2003); Las Minas por Keppie et al., (2010); Asís por Middleton et al., (2007); Coacalco y Cuatlatzecoma por Ramos-Arias et al., (2012).

Si bien, las condiciones  $P-T$  calculadas en este trabajo para las eclogitas, esquistos azules y anfibolitas son variables para las diferentes localidades, es probable que puntualmente cada muestra pudo alcanzar distintos estadios de formación a lo largo del segmento de la subducción. A su vez, que recristalizaron a diferentes profundidades en distintos tiempos, esto concuerda con la estructura de canal de subducción, donde se tienen distintos bloques exhumándose a diferentes velocidades, es decir, desacoplamientos dentro de las partes superior e inferior del canal y mezclándose a su vez con rocas de bajo grado (Guillot et al., 2009).

Dicho lo anterior, se desprende el hecho de contar con registros ligeramente distin-

tos de condiciones P-T para el pico de metamorfismo en las eclogitas presentes en el Ensamble Piaxtla. Además, de que las condiciones máximas para el pico metamórfico se encuentran por encima de las antes ya calculadas por otros autores (excepto por Hernández-Urbe (2019)).

Por otro lado, cabe recalcar que se tiene un *gap*, en el cual, no se tiene la etapa de metamorfismo donde posiblemente estuvieron coexistiendo el granate y la onfacita junto con el glaucófano, esta paragénesis es previa a los pseudomorfos de granate. Esta etapa intermedia podría esclarecer el problema petrológico de la transición de eclogita a esquistos azules. A su vez, es posible que existan rocas en puntos intermedios de los transectos estudiados que exhiban dicha coexistencia. Sin embargo, la falta de trabajo de campo y mapeo en zonas aledañas a los puntos de muestreo, hace difícil analizar y verificar la coexistencia de fases que ayuden a predecir una mejor trayectoria metamórfica prógrada o retrograda para los esquistos azules.

Las pseudosecciones también poseen limitaciones metodológicas<sup>2</sup>, lo que implica que una sola pseudosección no necesariamente refleja toda la historia termodinámica de una roca y o de todo un cinturón. Y es bien sabido que las pseudosecciones y los geotermobarómetros generan aproximaciones, y por lo tanto, rangos dentro de los cuales los datos expuestos tienen validez, dentro de los márgenes de error generados por cada uno de los métodos de extracción de los datos analizados.

Dentro de las limitaciones en este trabajo, fue la falta de construcción de pseudosecciones en donde se realizara una variación de contenido de  $H_2O$ . Es decir, partir de las pseudosecciones de eclogita, hidratarla e ir modificando el porcentaje de agua hasta obtener pseudosecciones equivalentes a las pseudosecciones de anfíbolita y esquistos azules modeladas en este trabajo.

Algo que también debe considerarse, es lo difícil que es representar los dominios de equilibrio en eventos de descompresión y/o enfriamiento porque generalmente no son sistemas termodinámicos cerrados, y se puede tener interacción con otros elementos como los fluidos dentro de la subducción a medida que esta va evolucionando.

## 6.2. Tasas de exhumación para las rocas de alta presión del Ensamble Piaxtla

Para la estimación de la tasa de exhumación del Ensamble Piaxtla se han considerado varios parámetros: La imbricación de varias piezas bajo condiciones metamórficas

---

<sup>2</sup>p. ej. cuando hay elementos de interés localizados en el núcleo de minerales zonados, como las inclusiones en granates, o la diferencia significativa de composición entre la roca total y la composición de roca efectiva

de entre  $\sim 600^{\circ}\text{C}$  a  $\sim 350^{\circ}\text{C}$ , fue interpretada como una deformación progresiva durante el desarrollo la foliación y plegamiento (Ramos-Arias and Keppie, 2011); en la cual, las unidades en facies de eclogita se desplazaron dúctil y progresivamente hasta posicionarse al mismo nivel estructural donde se desarrollaron las facies de esquisto azul.

La profundidad ( $\sim 17\text{-}20\text{ km}$ ) y edad ( $310 \pm 3\text{ Ma}$ ) de emplazamiento en la corteza superior, donde el frente del canal de extrusión cabalga a la unidad Zumpango, produciendo en conjunto las últimas fábricas de retrogresión en facies de esquisto verde (Ramos-Arias and Keppie, 2011), son tomadas como parámetros que representan el cese de la exhumación, o bien, el registro de la última transferencia a corteza somera.

De manera conjunta, también, deberá considerarse el tipo de subducción presente; en las zonas de subducción frías, con gradientes geotérmicos muy bajos ( $\leq 5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ), los minerales como la lawsonita pueden transportar agua a grandes profundidades ( $\leq 300\text{ km}$ ), mientras que en las zonas de subducción caliente, el gradiente geotérmico es alto ( $> 25^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ), la placa en subducción se deshidrata significativamente a profundidades someras y puede fundirse parcialmente hacia los  $< 80\text{ km}$  generando un fraccionamiento félsico (Zheng et al., 2016).

Las tasas de exhumación calculadas en promedio son  $\sim 1.07\text{ km}/\text{Ma}$  y  $\sim 1.32\text{ km}/\text{Ma}$  (Tabla 6.1). No obstante, debe de tenerse en cuenta el ángulo de subducción, suponiendo que la placa subducida pudo presentar una inclinación entre los  $30^{\circ}$  y los  $60^{\circ}$  a profundidades entre los  $50$  y  $75\text{ km}$  se tendría una tasa de exhumación de  $\sim 2.40\text{-}1.38\text{ km}/\text{Ma}$  (Anexo C, Tablas C1 y C2).

Las tasas de exhumación obtenidas son similares a las ya previamente calculadas por otros autores como Ramos-Arias et al., (en revisión) que obtiene una tasa de  $\sim 1.1\text{-}1.3\text{ km}/\text{Ma}$ ; Estrada-Carmona et al. (2016) sugiere una tasa de  $\sim 2\text{ km}/\text{Ma}$ , un poco más baja a la de  $\sim 2.4\text{ km}/\text{Ma}$  calculada previamente por Keppie et al. (2012).

Por otro lado, también han sido calculadas tasas más grandes como la de Hernández-Uribe et al. (2019) en  $3.4\text{ km}/\text{Ma}$ , esta tasa implicaría una exhumación en un lapso de tiempo corto, ocurriría en la cuña del manto y no tendría un arreglo estructural generando un *melange* tectónico, es decir, una mezcla de bloques inmersos en una matriz de material de grano fino (sedimentos y/o serpentinitas) Guillot et al. (2009).

Para Guillot et al. (2009), Las tasas de exhumación de entre  $1\text{-}5\text{ km}/\text{Ma}$ , se consideran lentas. Una exhumación lenta permite el desarrollo de un canal de subducción cohesivo y coherente, es decir, una matriz suave/blanda que permite a bloques rígidos exhumarse en paralelo al plano de subducción (Cloos, 1982). A su vez, estas observaciones concuerdan con lo señalado por Burov et al. (2001), con la existencia de dos niveles de circulación distintos entre los  $0\text{-}30\text{ km}$  y entre  $30\text{-}70\text{ km}$ , con tasas de exhumación más lentas para el nivel superior.

Tabla 6.1: Parámetros y valores calculados para la estimación de la tasa de exhumación de las rocas de alta presión del Ensamble Piaxtla.

Facies	Referencias	Mineral	Método	Edad (T <sub>i</sub> ) [Ma]	Profundidad máx(D <sub>máx</sub> ) [km]	Edad ΔT [Ma]	ΔD <sub>1</sub> [km]	ΔD <sub>2</sub> [km]	T <sub>E</sub> =ΔD <sub>1</sub> /ΔT [km/Ma]	T <sub>E</sub> =ΔD <sub>2</sub> /ΔT [km/Ma]
Eclogita	Ramos-Arias et al., 2011	-	-	345*	40	35	20	23	0.57	1.15
Eclogita	Middleton et al., 2007	Zrn	U-Pb	346±3	76.5	36	56.5	59.5	1.57	1.05
Eclogita	Estrada-Carmona et al., 2016	Grt	Lu-Hf	352.5±1.6	76.5	42.5	56.5	59.5	1.33	1.05
Eclogita	Elías-Herrera et al., 2007	Zrn	U-Pb	353±1	76.5	43	56.5	59.5	1.31	1.05
Promedios									1.2	1.08
Esquisto azul	Elías-Herrera et al., 2007	Gln	Ar-Ar	342±1	51.8	32	31.8	34.8	0.99	1.09
Esquisto azul	Elías-Herrera et al., 2007	Gln	Ar-Ar	342±1	62.8	32	42.4	45.4	1.32	1.07
Promedios									1.18	1.08
Promedio total									1.13	

\*valor promedio T<sub>E</sub> - Tasa de exhumación Gln-glaucófano Grt-granate Zrn-circón

Profundidad min (D<sub>min</sub>)[km] - 20 y 17 Emplazamiento en la corteza superior D1 y D2 =D<sub>máx</sub>-D<sub>min</sub>

Edad(T<sub>i</sub>)[Ma] - 310±3 Edad mínima de depósito de la unidad Zumpango (Ramos-Arias et al., 2011)

### 6.3. Modelo tectónico para el Ensamble Piaxtla

Los modelos tectónicos existentes para el Complejo de Acatlán han sugerido que el cinturón de rocas de alta presión fue exhumado como un sistema de cabalgaduras, conformando una sutura oceánica (Ortega-Gutiérrez et al., 1999; Vega-Granillo et al., 2009). El modelo de una gran cabalgadura implica la exhumación de un cuerpo “rígido” a manera de una obducción en una colisión tipo continental.

En contraste, la interpretación tectónica de un margen activo tipo-Pacífico como se expone en Liou (2004), considera que, el ascenso de estas rocas es a lo largo de un remanente de un canal de subducción, limitado por una zona de falla lítrica dúctil con cinemática hacia el este y en un arreglo de napas cabalgando hacia el oeste.

La deformación dúctil, expresada en las rocas del cinturón de alta presión del Ensamble Piaxtla, ocurre simultáneamente durante el Misisípico. La disposición estructural simplificada para rocas de alta presión en el Ensamble Piaxtla se compone de varias piezas con grados metamórficos de medio a alto como facies de esquistos azules, eclogitas y anfibolitas, ubicados dentro de la secuencia de napas orientadas al oeste, cabalgando a los litodemas de Zumpango y Cosoltepec, estos últimos con un metamorfismo que únicamente alcanzan facies de esquisto verde (bajo grado metamórfico).

En el límite oriental del cinturón central (Piaxtla-Mimilulco), es descrita una zona de cizallas lítricas orientadas norte-sur, con cima hacia el este (Fig.1.1, secciones f y g; Capítulo 1), además, hay registro de una zona de cizalla dextral pérmica (Fig.1.1, sección g), documentada a lo largo de todo el Complejo Acatlán y en su cobertura (Barley, 2006; Ramos-Arias et al., 2008, 2012a).

Para este caso, se cumplen las características de un canal de subducción, como un material plástico en la interfase de las placas con partición de la deformación interna.

El modelo de canal de subducción puede ser de una estructura de interfase muy estrecha, de varios cientos de metros de ancho. En los niveles de la corteza basal se cree que el canal se amplía progresivamente a una anchura de varios kilómetros, según algunas observaciones naturales y el modelado numérico de los prismas de acreción profundos (Gerya et al., 2002; Yamato et al., 2007; Guillot et al., 2009).

El canal de subducción puede variar en grosor debido a la rugosidad de la placa oceánica subducida (e.g., Contreras-Reyes and Carrizo, 2011) y la propagación lateral de la deformación (e.g., Bachmann et al., 2009). Por lo tanto, su edad y el estado térmico influirán en la inmersión de la placa y la cantidad de sedimentos subducidos, que es significativamente diferente entre los márgenes continentales y oceánicos activos (Vannucchi and Remitti, 2007; Hebert et al., 2009; Vannucchi et al., 2012).

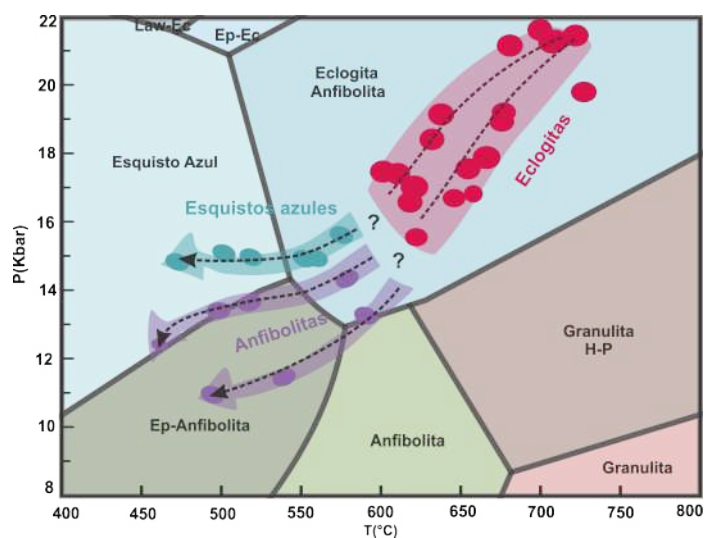


Figura 6.3: Estadios metamórficos y las posibles trayectorias P-T, generadas con la sobreposición de las elipses que representan la intersección de las isopleetas en cada pseudosección (Cap 5). Las elipses generadas se observan en azul, morado y rojo para los esquistos azules, las anfibolitas y las eclogitas respectivamente. Law-Ec: Lawsonita-Eclogita; Ep-Ec: Epidota-Eclogita. Diagrama de facies metamórficas modificado de (Palin and Dyck, 2018).



## Conclusiones

De acuerdo con la observación petrográfica y el modelado de pseudosecciones, se tiene distintas etapas en el metamorfismo:

1) Un primer evento en donde las rocas máficas (basaltos) de Piaxtla-Tecomatlán y de Asís experimentaron un evento metamórfico de alta presión y temperatura en facies de eclogita, marcado por la paragénesis  $Grt + Omp \pm Qz + Rt$  presumiblemente en picos metamórficos, los cuales, se sitúa en los intervalos máximos de  $P - T$  de  $\sim 19-21.5$  *kbar* y  $\sim 640-725$   $^{\circ}C$  obtenidos por las pseudosecciones (Tab. 5.2 y Fig. 6.2, rectángulo punteado).

Además, se tienen condiciones máximas (picos metamórficos) de  $\sim 22$  *kbar* y  $\sim 710.4$   $^{\circ}C$  obtenidas mediante la isopleta generada por el termómetro de *Zr* en rutilo. A su vez, es posible ajustar las condiciones  $P - T$  obtenidas con el geotermómetro de Nakamura (2009) para el par Grt-Omp, en intervalos de  $\sim 21-21.5$  *kbar* y  $\sim 690-710$   $^{\circ}C$  para Piaxtla-Tecomatlán; y de  $\sim 21-22$  *kbar* y  $\sim 700-725$   $^{\circ}C$  para Asís.

2) Un segundo evento está marcado por el inicio de la exhumación/extrusión con distintos grados de retrogresión el cual pudo desarrollarse en dos posibles etapas y/o caminos:

- Transición de eclogita a anfibolita granatíferas, etapa descompresiva e hidratada en la que posiblemente mediante las reacciones  $Grt + Omp + H_2O = Amp(Ca) + Ep + Pl$  y  $Omp + Pg + Grt + Rt = Pl + Ep + Amp + Ttn$  (Cap.2 ecu. 2.34 y ecu. 2.35) condujo a un estadio metamórfico caracterizado por un conjunto de minerales estables constituido por  $Amp + Grt + Pl \pm Ph \pm Ep \pm Cpx \pm Chl \pm Ttn \pm Rt \pm Qz$ , paragénesis observadas en la pseudosecciones y en lámina delgada. En condiciones P-T de  $\sim 10.9-14.2$  *kbar* y  $\sim 490-575$   $^{\circ}C$ , intervalos obtenidos de las pseudosecciones (Ver trayectorias moradas en Fig. 6.3).
- Transición en alta  $P$  y baja  $T$  donde se reposiciona un reequilibrio en condiciones de facies de esquisto azul, con un posible estadio metamórfico previo en donde la asociación mineral y textural  $Grt + Gln$  coexisten (Fig. 6.1, c), esto se infiere por

la observación de texturas relictas (pseudomorfos de granate) coexistiendo en la paragénesis de  $Gln + Amp + Ep \pm Ph \pm Pl$ .

Este reequilibrio en facies de esquistos azul tiene condiciones  $P - T$  en  $\sim 13.8-15.5$  *kbar* y  $\sim 480-585$   $^{\circ}C$ , estimadas con la modelización de pseudosecciones (Ver trayectoria azul en Fig. 6.3). Dentro de estas condiciones se establece la paragénesis representativa de los esquistos azules:  $Gln + Ep + Ph + Chl \pm Amp(Ca, Ca - Na) \pm Cpx \pm Pl \pm Ttn \pm Qz$ , paragénesis obtenida de la pseudosecciones y observada en lámina delgada.

3) Un tercer evento: última etapa caracterizada por un metamorfismo retrógrado, representado por la aparición de minerales de actinolita + clorita + muscovita + cuarzo, desarrollados en facies de esquistos verde.

Con todo lo mencionado previamente, se puede decir que las eclogitas tuvieron dos caminos de retrogresión con distintos estadios metamórficos, en los cuales, la presencia de fluidos posiblemente liberados dentro del canal de subducción por la desintegración de las fases hidratadas o por reacciones metamórficas progresivas.

Además, la influencia directa de parámetros como la temperatura y la presión que se fueron modificando durante su trayecto en el canal de subducción, generaron que una parte de las eclogitas primero sufrió una disminución de presión y posteriormente de temperatura (Fig. 6.5, a) Ec1 ). Y otra parte de las eclogitas, sufrió una disminución de temperatura y posteriormente de presión (Fig. 6.5, a) Ec2).

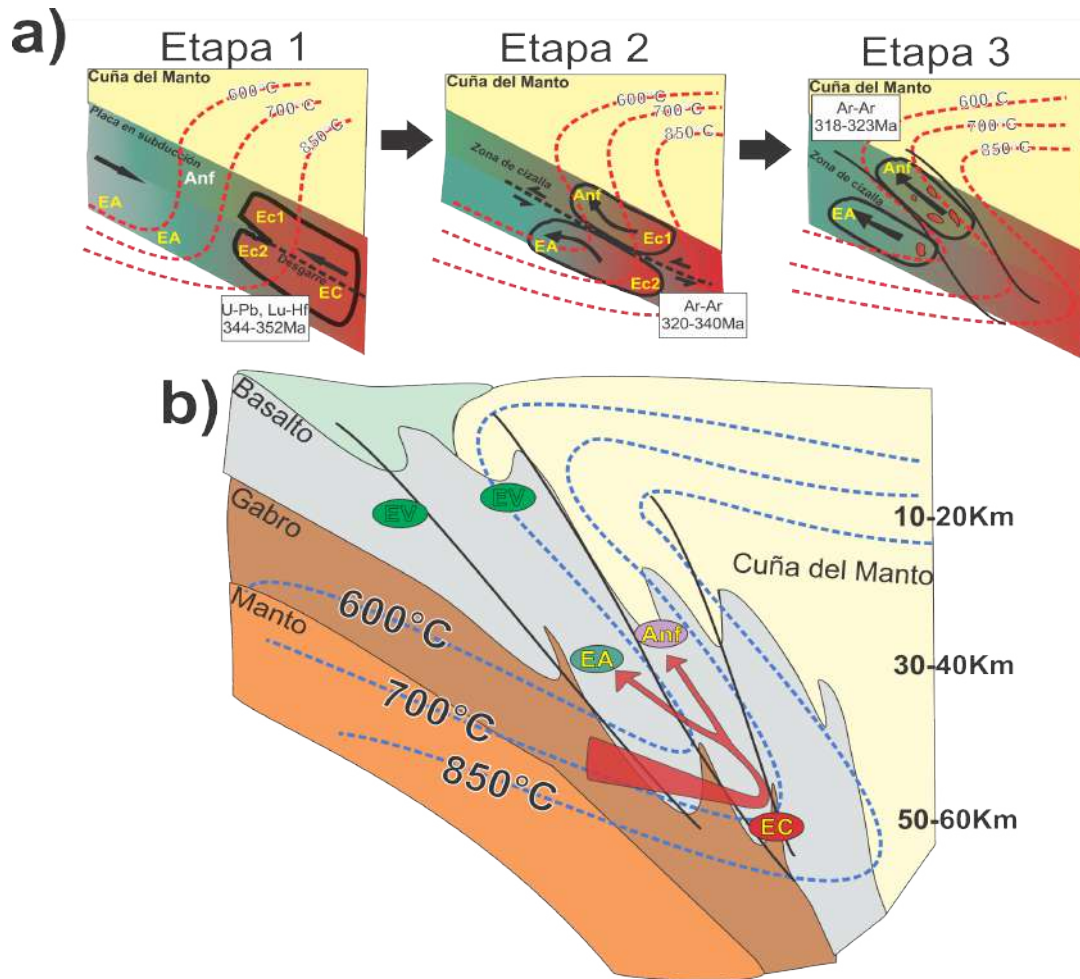


Figura 6.5: a) Diagrama de las posibles etapas de retrogresión metamórfica para las eclogitas del Ensemble Piactla; b) Modelo conceptual de la estructura y trayectoria metamórfica dentro del canal de subducción para las rocas alta presión del Ensemble Piactla.

El canal de subducción es un modelo conceptual que a la luz de estos nuevos datos puede explicar la petrogénesis de eclogitas y esquistos azules y la exhumación, prediciendo su recorrido hacia posiciones más someras (Fig.6.5, b).

Además, se hace hincapié en el hecho de que debido a distintas velocidades para los distintos paquetes de roca (napas) las condiciones P-T no pueden generalizarse a todo el conjunto de rocas. Es decir, distintas velocidades en el canal de subducción se traduce a distintas velocidades de recristalización dinámica y reequilibrios en las transformaciones metamórficas, generando la diversidad de facies en el Ensemble Piactla.

# Referencias

- Aguilera, J. and Ordóñez, E. (1896). Bosquejo geológico de México: Instituto geológico de México. *Boletín*, pages 4–6.
- Bachmann, R., Oncken, O., Glodny, J., Seifert, W., Georgieva, V., and Sudo, M. (2009). Exposed plate interface in the European Alps reveals fabric styles and gradients related to an ancient seismogenic coupling zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114(B5).
- Barley, B. J. (2006). *Polyphase deformation in San Miguel Las Minas, Northern Acatlán Complex, Southern México*. PhD thesis, Ohio University.
- Bucher, K. and Frey, M. (2002). *Petrogenesis of metamorphic rocks*. Springer Science & Business Media.
- Bucher, K. and Grapes, R. (2011). *Petrogenesis of metamorphic rocks*. Springer Science & Business Media.
- Burov, E., Jolivet, L., Pourhiet, L. L., and Poliakov, A. (2001). A thermomechanical model of exhumation of high pressure (hp) and ultra-high pressure (uhp) metamorphic rocks in alpine-type collision belts. *Tectonophysics*, 342(1):113 – 136. Exhumation of high-pressure rocks: kinetic, thermal and mechanical constraints.
- Carlson, W. D. (1989). The significance of intergranular diffusion to the mechanisms and kinetics of porphyroblast crystallization. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 103(1):1–24.
- Carmichael, D. M. (1969). On the mechanism of prograde metamorphic reactions in quartz-bearing pelitic rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 20(3):244–267.
- Carson, C. (2000). Hydration of eclogite, Pam Peninsula, New Caledonia. *J. Metamor. Geol.*, 18:79–90.

- Castro, A. E. and Spear, F. S. (2017). Reaction overstepping and re-evaluation of peak p–t conditions of the blueschist unit in Sifnos, Greece: implications for the Cyclades subduction zone. *International Geology Review*, 59(5-6):548–562.
- Chemenda, A. I., Mattauer, M., and Bokun, A. N. (1996). Continental subduction and a mechanism for exhumation of high-pressure metamorphic rocks: new modelling and field data from Oman. *Earth and Planetary Science Letters*, 143(1-4):173–182.
- Cloos, M. (1982). Flow melanges: Numerical modeling and geologic constraints on their origin in the Franciscan subduction complex, California. *GSA Bulletin*, 93(4):330–345.
- Connolly, J. (1990). Multivariable phase diagrams; an algorithm based on generalized thermodynamics. *American Journal of Science*, 290(6):666–718.
- Connolly, J. (2009). The geodynamic equation of state: what and how. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10(10).
- Connolly, J. A. (2005). Computation of phase equilibria by linear programming: a tool for geodynamic modeling and its application to subduction zone decarbonation. *Earth and Planetary Science Letters*, 236(1-2):524–541.
- Connolly, J. A. (2017). A primer in Gibbs energy minimization for geophysicists. *Petrology*, 25(5):526–534.
- Contreras-Reyes, E. and Carrizo, D. (2011). Control of high oceanic features and subduction channel on earthquake ruptures along the Chile–Peru subduction zone. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 186(1-2):49–58.
- Dale, J., Holland, T., and Powell, R. (2000). Hornblende–garnet–plagioclase thermobarometry: a natural assemblage calibration of the thermodynamics of hornblende. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 140(3):353–362.
- Droop, G. (1990). Formation and distribution of eclogite facies rocks in the Alps. *Eclogite facies rocks*, pages 225–259.
- Elías-Herre, M., Macías-Romo, C., Ortega-Gutiérrez, F., Sánchez-Zavala, J., Iriondo, A., and Ortega-Rivera, A. (2007). Conflicting stratigraphic and geochronologic data from the Acatlán complex: “Ordovician” granites intrude metamorphic and sedimentary rocks of Devonian–Permian age. In *AGU Spring Meeting Abstracts*, volume 2007, pages T41A–12.
- Elías-Herrera, M., Ortega-Gutiérrez, F., Macías-Romo, C., Reyes-Salas, M., Sánchez-Zavala, J., and Aparicio-Aparicio, D. (2006). Blueschist in the Acatlán complex, southern Mexico: new insights and tectonothermal implications. *Geos*, 26(1):190.

## Referencias

---

- Ernst, W. and Liou, J. (2008). High-and ultrahigh-pressure metamorphism: Past results and future prospects. *American Mineralogist*, 93(11-12):1771–1786.
- Ernst, W. and Liu, J. (1998). Experimental phase-equilibrium study of al-and ti-contents of calcic amphibole in morb—a semiquantitative thermobarometer. *American mineralogist*, 83(9-10):952–969.
- Eskola, P. (1939). Die metamorphen gesteine. In *Die Entstehung der Gesteine*, pages 263–407. Springer.
- Estrada-Carmona, J., Weber, B., Scherer, E. E., Martens, U., and Elías-Herrera, M. (2016). Lu-hf geochronology of mississippian high-pressure metamorphism in the acatlán complex, southern méxico. *Gondwana Research*, 34:174 – 186.
- Evans, B. W. (1990). Phase relations of epidote-blueschists. *Lithos*, 25(1-3):3–23.
- Evans, T. (2004). A method for calculating effective bulk composition modification due to crystal fractionation in garnet-bearing schist: Implications for isopleth thermobarometry. *Journal of Metamorphic Geology*, 22(6):547–557.
- Franz, G. and Liebscher, A. (2004). Physical and chemical properties of the epidote minerals—an introduction–. *Reviews in mineralogy and geochemistry*, 56(1):1–81.
- Fries Jr, C. and Rincón-Orta, C. (1965). Nuevas aportaciones geocronológicas y técnicas empleadas en el laboratorio de geocronometría: Universidad nacional autónoma de méxico. *Instituto de Geología, Boletín*, 73:57–133.
- Galaz, G., Keppie, J. D., Lee, J. K., and Ortega-Rivera, A. (2013). A high-pressure folded klippe at tehuitzingo on the western margin of an extrusion zone, acatlán complex, southern méxico. *Gondwana Research*, 23(2):641–660.
- Gao, J. and Klemd, R. (2001). Primary fluids entrapped at blueschist to eclogite transition: evidence from the tianshan meta-subduction complex in northwestern china. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 142(1):1–14.
- George, F. and Gaidies, F. (2017). Characterisation of a garnet population from the sikkim himalaya: insights into the rates and mechanisms of porphyroblast crystallisation. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 172(7):57.
- Gerya, T. V., Stöckhert, B., and Perchuk, A. L. (2002). Exhumation of high-pressure metamorphic rocks in a subduction channel: A numerical simulation. *Tectonics*, 21(6):6–1.

- Godin, L., Grujic, D., Law, R., and Searle, M. (2006). Channel flow, ductile extrusion and exhumation in continental collision zones: an introduction. *Geological Society, London, Special Publications*, 268(1):1–23.
- Guillot, S., Hattori, K., Agard, P., Schwartz, S., and Vidal, O. (2009). Exhumation processes in oceanic and continental subduction contexts: A review. In Lallemand, S. and Funiciello, F., editors, *Subduction Zone Geodynamics*, pages 175–205, Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg.
- Hebert, L. B., Antoshechkina, P., Asimow, P., and Gurnis, M. (2009). Emergence of a low-viscosity channel in subduction zones through the coupling of mantle flow and thermodynamics. *Earth and Planetary Science Letters*, 278(3-4):243–256.
- Hernández-Urbe, D., Gutiérrez-Aguilar, F., Mattinson, C. G., Palin, R. M., and Neill, O. K. (2019). A new record of deeper and colder subduction in the acatlán complex, Mexico: Evidence from phase equilibrium modelling and Zr-in-rutile thermometry. *Lithos*, 324:551–568.
- Holland, T. (1979). Experimental determination of the reaction  $\text{paragonite} = \text{jadeite} + \text{kyanite} + \text{H}_2\text{O}$ , and internally consistent thermodynamic data for part of the system  $\text{Na}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ , with applications to eclogites and blueschists. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 68(3):293–301.
- Holland, T. and Powell, R. (1998). An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest. *Journal of Metamorphic Geology*, 16(3):309–343.
- Holland, T. and Powell, R. (2006). Mineral activity–composition relations and petrological calculations involving cation equipartition in multisite minerals: a logical inconsistency. *Journal of Metamorphic Geology*, 24(9):851–861.
- Hollister, L. S. (1969). Contact Metamorphism in the Kwoiek Area of British Columbia: An End Member of the Metamorphic Process. *GSA Bulletin*, 80(12):2465–2494.
- Hynes, A. (2002). Encouraging the extrusion of deep-crustal rocks in collisional zones. *Mineralogical Magazine*, 66(1):5–24.
- Irvine, T. and Baragar, W. (1971). A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian journal of earth sciences*, 8(5):523–548.
- Jørgensen, T. R., Tinkham, D. K., Leshner, C. M., and Petrus, J. A. (2017). Decoupling of Zr-Hf during contact metamorphic anatexis of metabasalts and timing of zircon growth, Sudbury, Canada. *Geology*, 46(2):159–162.

- Keppie, J. D., Dostal, J., Miller, B. V., Ramos-Arias, M., Morales-Gómez, M., Nance, R. D., Murphy, J. B., Ortega-Rivera, A., Lee, J., and Housh (2008a). Ordovician–earliest silurian rift tholeiites in the acatlán complex, southern mexico: Evidence of rifting on the southern margin of the rheic ocean. *Tectonophysics*, 461(1-4):130–156.
- Keppie, J. D., Dostal, J., Murphy, J. B., and Nance, R. D. (2008b). Synthesis and tectonic interpretation of the westernmost paleozoic variscan orogen in southern mexico: From rifted rheic margin to active pacific margin. *Tectonophysics*, 461(1-4):277–290.
- Keppie, J. D., Nance, R., Dostal, J., Lee, J., and Ortega-Rivera, A. (2012). Constraints on the subduction erosion/extrusion cycle in the paleozoic acatlán complex of southern mexico: geochemistry and geochronology of the type piactla suite. *Gondwana Research*, 21(4):1050–1065.
- Keppie, J. D., Nance, R., Ramos-Arias, M., Lee, J., Dostal, J., Ortega-Rivera, A., and Murphy, J. (2010). Late paleozoic subduction and exhumation of cambro-ordovician passive margin and arc rocks in the northern acatlán complex, southern mexico: Geochronological constraints. *Tectonophysics*, 495(3-4):213–229.
- Keppie, J. D., Nance, R. D., Dostal, J., Ortega-Rivera, A., Miller, B. V., Fox, D., Muise, J., Powell, J., Mumma, S., and Lee, J. (2004). Mid-jurassic tectonothermal event superposed on a paleozoic geological record in the acatlán complex of southern mexico: Hotspot activity during the breakup of pangea. *Gondwana Research*, 7(1):238–260.
- Kessel, R., Schmidt, M. W., Ulmer, P., and Pettke, T. (2005). Trace element signature of subduction-zone fluids, melts and supercritical liquids at 120–180 km depth. *Nature*, 437(7059):724.
- Krogh, E. J. (1981). Compatible pt conditions for eclogites and surrounding gneisses in the kristiansund area, western norway. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 75(4):387–393.
- Lanari, P. and Engi, M. (2017). Local bulk composition effects on metamorphic mineral assemblages. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 83(1):55–102.
- Le Bas, M. L., Maitre, R. L., Streckeisen, A., Zanettin, B., and on the Systematics of Igneous Rocks, I. S. (1986). A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of petrology*, 27(3):745–750.
- Leake, B. E., Wooley, A. R., Arps, C. E., Birch, W. D., Gilbert, M. C., Grice, J. D., Hawthorne, F. C., Kato, A., Kisch, H. J., Krivovichev, V., et al. (1997). Nomenclature of amphiboles; report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association commission on new minerals and mineral names. *European Journal of Mineralogy*, 9(3):623–651.



- Li, J.-L., John, T., Gao, J., Klemd, R., and Wang, X.-S. (2017). Subduction channel fluid–rock interaction and mass transfer: Constraints from a retrograde vein in blueschist (sw tianshan, china). *Chemical Geology*, 456:28–42.
- Liou, J., Tsujimori, T., Zhang, R., Katayama, I., and Maruyama, S. (2004). Global uhp metamorphism and continental subduction/collision: the himalayan model. *International Geology Review*, 46(1):1–27.
- Maresch, W. (1977). Experimental studies on glaucophane: an analysis of present knowledge. *Tectonophysics*, 43(1-2):109–125.
- Maresch, W. and Abraham, K. (1981). Petrography, mineralogy, and metamorphic evolution of an eclogite from the island of margarita, venezuela. *Journal of Petrology*, 22(3):337–362.
- Marmo, B., Clarke, G., and Powell, R. (2002). Fractionation of bulk rock composition due to porphyroblast growth: effects on eclogite facies mineral equilibria, pam peninsula, new caledonia. *Journal of metamorphic Geology*, 20(1):151–165.
- Maruyama, S., Cho, M., and Liou, J. (1986). Experimental investigations of blueschist-greenschist transition equilibria: Pressure dependence of al<sub>2</sub>o<sub>3</sub> contents in sodic amphiboles—a new geobarometer. *Blueschists and Eclogites*, 164:1–16.
- Melka, K. (1965). Proposal of chlorite classification. *Vestnik Ustredniho Ustavu Geologie*, 40:23–29.
- Meza-Figueroa, D. (1998). *Geochemistry and characterization of intermediate temperature eclogites from the Acatlan complex, southern Mexico*, unpubl. PhD thesis, Ph. D. Thesis, University of Arizona.
- Meza-Figueroa, D., Ruiz, J., Talavera-Mendoza, O., and Ortega-Gutierrez, F. (2003). Tectonometamorphic evolution of the acatlan complex eclogites (southern mexico). *Canadian Journal of Earth Sciences*, 40(1):27–44.
- Middleton, M., Keppie, J. D., Murphy, J. B., Miller, B. V., Nance, R. D., Ortega-Rivera, A., and Lee, J. K. (2007). Ptt constraints on exhumation following subduction in the rheic ocean from eclogitic rocks in thevacatlán complex of southern méxico. *The geology of Peri-Gondwana: The Avalonian–Cadomian belt, adjoining cratons and the Rheic Ocean: Geological Society of America, Special Paper*, 423:489–509.
- Miller, B. V., Dostal, J., Keppie, J. D., Nance, R. D., Ortega-Rivera, A., and Lee, J. K. (2007). Ordovician calc-alkaline granitoids in the acatlán complex, southern méxico: Geochemical and geochronologic data and implications for the tectonics of the gondwanan margin of the rheic ocean. *Special papers-geological society of America*, 423:465.

## Referencias

---

- Molina, J. and Poli, S. (1998). Singular equilibria in paragonite blueschists, amphibolites and eclogites. *Journal of Petrology*, 39(7):1325–1346.
- Morales-Gómez, M., Duncan Keppie, J., Lee, J. K., and Ortega-Rivera, A. (2009a). Palaeozoic structures in the xayacatlán area, acatlán complex, southern Mexico: trans-tensional rift-and subduction-related deformation along the margin of Oaxaquia. *International Geology Review*, 51(4):279–303.
- Morales-Gómez, M., Keppie, J. D., and Dostal, J. (2009b). Carboniferous tholeiitic dikes in the Salada unit, acatlán complex, southern Mexico: a record of extension on the western margin of Pangea. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26(1):133–142.
- Morimoto, N. and Kitamura, M. (1983). Qj diagram for classification of pyroxenes. *Jour. Japan. Assoc. Mineral., Petro. Econ. Geol.*, 78:141.
- Murphy, J. B., Keppie, J. D., Nance, R. D., Miller, B. V., Dostal, J., Middleton, M., Fernandez-Suárez, J., Jeffries, T. E., and Storey, C. D. (2006). Geochemistry and U–Pb protolith ages of eclogitic rocks of the Asis lithodeme, Piaxtla suite, acatlán complex, southern Mexico: tectonothermal activity along the southern margin of the Rheic ocean. *Journal of the Geological Society*, 163(4):683–695.
- Nakamura, D. (2009). A new formulation of garnet–clinopyroxene geothermometer based on accumulation and statistical analysis of a large experimental data set. *Journal of Metamorphic Geology*, 27(7):495–508.
- Nakano, N., Osanai, Y., Owada, M., Nam, T. N., Tsunogae, T., Toyoshima, T., and Binh, P. (2004). Decompression process of mafic granulite from eclogite to granulite facies under ultrahigh-temperature condition in the Kontum Massif, central Vietnam. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 99(4):242–256.
- Nance, R. D. and Linnemann, U. (2008). The Rheic ocean: origin, evolution, and significance. *GSA Today*, 18(12):4–12.
- Oh, C. and Liou, J. (1998). A petrogenetic grid for eclogite and related facies under high-pressure metamorphism. *Island Arc*, 7(1-2):36–51.
- Ordóñez, E. (1905). Los Xalapazcos del Estado de Puebla: Instituto Geológico de México. *Fototipia de la Secretaría de Fomento, México*, pages 295–344.
- Ortega-Gutiérrez, F. (1974). Nota preliminar sobre las eclogitas de Acatlán, Puebla. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 35:1–6.
- Ortega-Gutiérrez, F. (1978). Estratigrafía del complejo Acatlán en la Mixteca Baja, Estados de Puebla y Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 2(2):112–131.

- Ortega-Gutiérrez, F. (1981). Metamorphic belts of southern Mexico and their tectonic significance. *Geofísica Internacional*, 20(3).
- Ortega-Gutiérrez, F. (1993). Tectonostratigraphic analysis and significance of the Paleozoic Acatlán complex of southern Mexico. In *Terrane geology of southern Mexico. First Circum-Pacific and Circum-Atlantic Terrane Conference, Guanajuato, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Guidebook of field trip B*, pages 67–84.
- Ortega-Gutiérrez, F., Elías-Herrera, M., Reyes-Salas, M., Macías-Romo, C., and López, R. (1999). Late Ordovician–early Silurian continental collisional orogeny in southern Mexico and its bearing on Gondwana-Laurentia connections. *Geology*, 27(8):719–722.
- Ortega-Obregón, C., Keppie, J., Solari, L. A., Ortega-Gutiérrez, F., Dostal, J., López, R., Ortega-Rivera, A., and Lee, J. (2003). Geochronology and geochemistry of the ~917 Ma, calc-alkaline ETLA granitoid pluton (Oaxaca, southern Mexico): Evidence of post-Grenvillian subduction along the northern margin of Amazonia. *International Geology Review*, 45(7):596–610.
- Palin, R. M. and Dyck, B. (2018). Metamorphic consequences of secular changes in oceanic crust composition and implications for uniformitarianism in the geological record. *Geoscience Frontiers*, 9(4):1009–1019.
- Peacock, S. M. (1996). Thermal and petrologic structure of subduction zones. *Subduction: top to bottom*, 96:119–133.
- Pearce, M., White, A., and Gazley, M. (2015). Tcinvestigator: automated calculation of mineral mode and composition contours for thermocalc pseudosections. *Journal of Metamorphic Geology*, 33(4):413–425.
- Pérez-López, F. (2014). Caracterización petrográfica y geoquímica de los esquistos azules de San Juan Raboso, Puebla. tesis de licenciatura. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Pirard, E. (2004). Multispectral imaging of ore minerals in optical microscopy. *Mineralogical Magazine*, 68(2):323–333.
- Poli, S. and Schmidt, M. W. (2002). Petrology of subducted slabs. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 30(1):207–235.
- Poole, F. G., Perry, William J., J., Madrid, R. J., and Amaya-Martinez, R. (2005). Tectonic synthesis of the Ouachita-Marathon-Sonora orogenic margin of southern Laurentia: Stratigraphic and structural implications for timing of deformational events and plate-tectonic model. In *The Mojave-Sonora Megashear Hypothesis: Development, Assessment, and Alternatives*. Geological Society of America.

## Referencias

---

- Powell, R. and Holland, T. (2008). On thermobarometry. *Journal of Metamorphic Geology*, 26(2):155–179.
- Proenza, J., Ortega-Gutiérrez, F., Camprubí, A., Tritlla, J., Elías-Herrera, M., and Reyes-Salas, M. (2004). Paleozoic serpentinite-enclosed chromitites from tehuitzingo (acatlán complex, southern Mexico): a petrological and mineralogical study. *Journal of South American Earth Sciences*, 16(8):649 – 666.
- Ramírez-Espinoza, J. (2001). *Tectono-magmatic evolution of the Paleozoic Acatlan-Complex in southern Mexico, and its correlation with the Appalachian system*. PhD thesis, University of Arizona.
- Ramos-Arias, M. and Keppie, J. (2010). U–pb neoproterozoic–ordovician protolith age constraints for high-to medium-pressure rocks thrust over low-grade metamorphic rocks in the ixcamilpa area, acatlán complex, southern Mexico. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 48(1):45–61.
- Ramos-Arias, M., Keppie, J., Ortega-Rivera, A., and Lee, J. (2008). Extensional late paleozoic deformation on the western margin of pangea, patlanoaya area, acatlán complex, southern Mexico. *Tectonophysics*, 448(1):60 – 76.
- Ramos-Arias, M. A. and Keppie, J. D. (2011). U–pb neoproterozoic–ordovician protolith age constraints for high- to medium-pressure rocks thrust over low-grade metamorphic rocks in the ixcamilpa area, acatlán complex, southern México. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 48(1):45–61.
- Ramos-Arias, M. A., Keppie, J. D., Lee, J. K., and Ortega-Rivera, A. (2012a). A carboniferous high-pressure klippe in the western acatlán complex of southern México: Implications for the tectonothermal development and palaeogeography of pangea. *International Geology Review*, 54(7):779–798.
- Ramos-Arias, M. A., Keppie, J. D., Lee, J. K., and Ortega-Rivera, A. (2012b). A carboniferous high-pressure klippe in the western acatlán complex of southern México: implications for the tectonothermal development and palaeogeography of pangea. *International Geology Review*, 54(7):779–798.
- Reinsch, D. (1979). Glaucophanites and eclogites from val chiusella, sesia-lanzo zone (italian alps). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 70(3):257–266.
- Reyes-Salas, A. (2003). *Mineralogía y petrología de los Granitoides Esperanza del Complejo Acatlán, sur de México: Morelos, MéXico*. PhD thesis, Ph. D. Thesis, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería.

- Ridley, J. (1984). Evidence of a temperature-dependent blueschist to eclogite transformation in high-pressure metamorphism of metabasic rocks. *Journal of Petrology*, 25(4):852–870.
- Rubatto, D. and Hermann, J. (2003). Zircon formation during fluid circulation in eclogites (monviso, western alps): implications for zr and hf budget in subduction zones. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(12):2173–2187.
- Salas, G. P. (1949). Bosquejo geológico de la cuenca sedimentaria de oxaca (in spanish), geological sketch of the oxaca sedimentary basin.
- Schliestedt, M., Altherr, R., and Matthews, A. (1987). Evolution of the cycladic crystalline complex: Petrology, isotope geochemistry and geochronology. *Chemical transport in metasomatic processes*, pages 389–428.
- Schmidt, M. W. and Poli, S. (1998). Experimentally based water budgets for dehydrating slabs and consequences for arc magma generation. *Earth and Planetary Science Letters*, 163(1-4):361–379.
- Spear, F. and Daniel, C. (1998). Three-dimensional imaging of garnet porphyroblast sizes and chemical zoning: Nucleation and growth history in the garnet zone. *Geological Materials Research*, 1.
- Spear, F., Kohn, M., Florence, F., and Menard, T. (1990). A model for garnet and plagioclase growth in pelitic schists: implications for thermobarometry and p-t path determinations. *Journal of Metamorphic Geology*, 8(6):683–696.
- Spear, F. S. (1995). Metamorphic phase equilibria and pressure-temperature-time paths.
- Sturm, R. (2002). Px-nom—an interactive spreadsheet program for the computation of pyroxene analyses derived from the electron microprobe. *Computers & Geosciences*, 28(4):473–483.
- Stüwe, K. (1997). Effective bulk composition changes due to cooling: a model predicting complexities in retrograde reaction textures. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 129(1):43–52.
- Takasu, A. (1984). Prograde and retrograde eclogites in the sambagawa metamorphic belt, besshi district, japan. *Journal of Petrology*, 25(3):619–643.
- Talavera-Mendoza, O., Ruiz, J., Gehrels, G. E., Meza-Figueroa, D. M., Vega-Granillo, R., and Campa-Uranga, M. F. (2005). U–pb geochronology of the acatlán complex and implications for the paleozoic paleogeography and tectonic evolution of southern mexico. *Earth and Planetary Science Letters*, 235(3-4):682–699.

## Referencias

---

- Thompson, J. B. (1955). The thermodynamic basis for the mineral facies concept. *American Journal of Science*, 253(2):65–103.
- Thompson, JR, J. B., Laird, J., and Thompaon, A. B. (1982). Reactions in amphibolite, greenschist and blueschist. *Journal of Petrology*, 23(1):1–27.
- Thompson Jr, J. B. (1970). Geochemical reaction and open systems. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 34(5):529–551.
- Tomkins, H., Powell, R., and Ellis, D. (2007). The pressure dependence of the zirconium-rutile thermometer. *Journal of metamorphic Geology*, 25(6):703–713.
- Tracy, R. J. (1982). *Chapter 9. COMPOSITIONAL ZONING and INCLUSIONS in METAMORPHIC MINERALS*, pages 354–398. De Gruyter, Berlin, Boston.
- Van Der Straaten, F., Schenk, V., John, T., and Gao, J. (2008). Blueschist-facies rehydration of eclogites (tian shan, nw-china): implications for fluid–rock interaction in the subduction channel. *Chemical Geology*, 255(1-2):195–219.
- Vannucchi, P. and Remitti, F. (2007). Double décollement zone bordering the subduction channel in an ancient erosive subduction complex: implications for seismogenesis. In *EGU general Assembly 2007*, volume 9, pages EGU2007–A. Copernicus Publication.
- Vannucchi, P., Sage, F., Phipps Morgan, J., Remitti, F., and Collot, J.-Y. (2012). Toward a dynamic concept of the subduction channel at erosive convergent margins with implications for interplate material transfer. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13(2).
- Vega-Granillo, R., Talavera-Mendoza, O., Meza-Figueroa, D., Ruiz, J., Gehrels, G. E., López-Martínez, M., and de la Cruz-Vargas, J. C. (2007). Pressure-temperature-time evolution of paleozoic high-pressure rocks of the acatlán complex (southern mexico): Implications for the evolution of the iapetus and rheic oceans. *Geological Society of America Bulletin*, 119(9-10):1249–1264.
- Vega-Granillo, R., Talavera-Mendoza, O., Meza-Figueroa, D., Ruiz, J., López-Martínez, M., and Gehrels, G. E. (2009). Pressure-temperature-time evolution of high-pressure rocks of the acatlán complex (southern mexico): Implications for the evolution of the iapetus and rheic oceans: Reply. *Geological Society of America Bulletin*, 121(9-10):1460–1464.
- Wada, I., He, J., Hasegawa, A., and Nakajima, J. (2015). Mantle wedge flow pattern and thermal structure in northeast japan: Effects of oblique subduction and 3-d slab geometry. *Earth and Planetary Science Letters*, 426:76 – 88.

- Watson, E. B. and Harrison, T. M. (1983). Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magma types. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(2):295–304.
- Wei, C. and Powell, R. (2003). Phase relations in high-pressure metapelites in the system kfmash (k 2 o-feo-mgo-al 2 o 3-sio 2-h 2 o) with application to natural rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 145(3):301–315.
- White, R., Powell, R., and Baldwin, J. (2008). Calculated phase equilibria involving chemical potentials to investigate the textural evolution of metamorphic rocks. *Journal of Metamorphic Geology*, 26(2):181–198.
- Whitney, D. L. and Evans, B. W. (2010). Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American mineralogist*, 95(1):185–187.
- Winchester, J. A. and Floyd, P. A. (1977). Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical geology*, 20:325–343.
- Winter, J. D. (2001). *An introduction to igneous and metamorphic petrology*, volume 697. Prentice hall New Jersey.
- Wolfe, O. M. and Spear, F. S. (2018). Determining the amount of overstepping required to nucleate garnet during barrovian regional metamorphism, connecticut valley synclinorium. *Journal of Metamorphic Geology*, 36(1):79–94.
- Yamato, P., Agard, P., Burov, E., Le Pourhiet, L., Jolivet, L., and Tiberi, C. (2007). Burial and exhumation in a subduction wedge: Mutual constraints from thermomechanical modeling and natural p-t-t data (schistes lustrés, western alps). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B7).
- Yáñez, P., Ruiz, J., Patchett, P. J., Ortega-Gutierrez, F., and Gehrels, G. E. (1991). Isotopic studies of the acatlan complex, southern mexico: Implications for paleozoic north american tectonics. *Geological Society of America Bulletin*, 103(6):817–828.
- Zheng, Y., Chen, R., Xu, Z., and Zhang, S. (2016). The transport of water in subduction zones. *Science China Earth Sciences*, 59:651–682.

# ANEXOS



## Anexo A

# Análisis químico de elementos mayores, Fluorescencia de rayos X

Tabla A.1: XRF análisis de roca total (% wt) para muestras: 4 de eclogitas y 1 de anfibolita. Abreviaturas para las áreas estudiadas: A=Asís y PT=Plaxtia-Tecomatlán.

Muestra	Tipo de Roca	Localidad	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> t	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	P x C	Total
PIAX-12	Anfibolita	A	49.83	1.78	14.75	12.7	0.22	6.45	10.4	2.79	0.69	0.18	0.35	100.17
PIAX-13	Eclogita con retrogresión	A	49.17	1.86	14.88	13.53	0.27	6.47	9.92	2.38	0.85	0.21	0.61	100.14
PIAX-15	Eclogita	PT	48.45	3.04	13.25	15.1	0.21	6.05	9.24	3.13	0.31	0.27	1.13	100.17
PIAX-28	Eclogita	PT	49.21	1.98	13.32	13.41	0.23	7.52	9.68	3.04	0.84	0.19	0.68	100.1
PIAX-29	Eclogita	PT	48.41	1.97	14.52	14.2	0.24	7.02	9.26	2.79	0.78	0.18	0.74	100.11

Tabla A.2: XRF análisis de roca total (% wt). Análisis tomados de la literatura de varios Autores. Abreviaturas para las áreas estudiadas: IX=Ixcamilpa, PT=Piactla-Tecomatlán, A=Asís y MIM=Mimilulco. La clave se uso para este trabajo.

Clave	Muestra	Tipo de Roca	Localidad	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> t	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	P x C	Total	Y	Zr	Nb	Ti*	Zr/Ti	Nb/Y	Autor
M-49-1	49-1ma	Eclogita	A	45.12	1.52	15.46	11.70	10.52	0.19	6.60	9.78	2.23	0.26	0.13	1.16	101.30	23.00	117.00	9.00	9096.82	0.39	0.01	Murphy et la., 2006*
M-49-2	49-2ma	Eclogita	A	51.05	1.57	14.91	11.62	10.44	0.27	6.82	6.35	4.62	0.26	0.19	1.37	101.16	23.00	111.00	7.00	9401.75	0.30	0.01	Murphy et la., 2006*
MF-MP3	MP3	Eclogita con retrogresión	PT	47.70	2.05	12.70	12.20	8.00	0.18	8.81	10.00	3.08	0.65	0.19	-	105.56	18.38	136.60	17.12	12289.96	0.01	0.93	Meza-Figueroa et al., 2003
MF-MP1	MP1	Eclogita con retrogresión	PT	48.80	0.71	14.50	9.45	6.00	0.14	8.81	11.20	2.03	0.23	0.06	-	101.93	16.40	58.00	2.37	4256.52	0.01	0.14	Meza-Figueroa et al., 2003
MF-PR	PR	Eclogita	PT	46.40	3.14	13.40	15.10	9.60	0.20	6.03	10.20	2.78	0.39	0.27	-	107.51	25.31	155.00	24.00	18824.61	0.01	0.95	Meza-Figueroa 1998
MF-D8814	D8814	Eclogita	PT	46.50	3.10	13.20	15.00	0.00	0.20	5.88	10.70	2.80	0.27	0.27	-	97.92	24.99	149.00	25.65	18584.81	0.01	1.03	Meza-Figueroa 1998
MF-D6814	D6814	Eclogita	PT	47.90	3.10	12.90	14.90	8.60	0.20	5.51	10.10	2.65	0.36	0.31	-	106.53	25.04	173.00	27.86	18584.81	0.01	1.11	Meza-Figueroa 1998
MF-D15814	D15814	Eclogita	PT	47.90	2.07	13.50	12.00	7.80	0.17	6.03	10.80	2.57	0.41	0.20	-	103.45	22.27	120.00	25.52	12409.86	0.01	1.15	Meza-Figueroa 1998
MF-D7813	D7813	Eclogita	PT	47.10	3.65	12.60	16.50	7.30	0.22	5.23	10.20	2.42	0.34	0.39	-	105.95	37.70	208.00	31.94	21882.12	0.01	0.85	Meza-Figueroa et al., 2003
MF-MI-13	MI-13	Eclogita	PT	50.70	1.25	15.10	10.00	5.70	0.17	5.91	8.59	4.50	0.32	0.14	-	102.38	30.00	110.00	5.82	7493.88	0.01	0.19	Meza-Figueroa et al., 2003
MF-MI-9	MI-9	Eclogita	PT	51.60	1.23	15.00	9.50	6.20	0.23	0.30	8.59	4.04	0.23	0.08	-	97.00	53.56	168.00	9.47	7373.97	0.02	0.18	Meza-Figueroa 1998
MF-M3	M3	Eclogita	PT	50.40	1.04	15.50	10.50	6.10	0.23	6.64	7.66	4.61	0.28	0.09	-	103.05	27.16	106.00	4.19	6234.90	0.02	0.15	Meza-Figueroa 1998
IX-261	LX-261	Anfibolita	IX	47.28	1.228	16.38	10.76	-	0.163	6.09	10.44	3.79	0.44	0.131	2.87	99.57	33	154.7	9.2	7361.98	0.02	0.28	Murphy et la., 2006*
IX-262	LX-262	Anfibolita	IX	45.64	1.331	13.62	10.86	-	0.165	7.88	11.06	3.98	0.2	0.207	5.22	100.16	32.4	123.7	6.4	7979.48	0.02	0.20	Murphy et la., 2006*
IX-263	LX-263	Anfibolita	IX	53.86	0.868	15.7	8.38	-	0.115	6.45	7.83	3.54	1.42	0.111	1.84	100.11	29.5	151.3	8	5203.75	0.03	0.27	Murphy et la., 2006*
IX-264	LX-264	Anfibolita	IX	48.67	1.553	16.04	10.88	-	0.177	6.37	8.39	4.48	0.58	0.216	2.9	100.26	39.8	175.1	8.4	9310.39	0.02	0.21	Murphy et la., 2006*
IX-265	LX-265	Anfibolita	IX	43.05	1.558	15.38	12	-	0.189	6.57	11.47	3.71	0.17	0.193	6.39	100.68	34.6	131.5	6.3	9340.37	0.01	0.18	Murphy et la., 2006*
IX-266	LX-266	Anfibolita	IX	46.65	3.018	12.48	16.79	-	0.226	5.8	10.84	2.38	0.49	0.308	1.47	100.45	38.7	216.2	16.6	18093.21	0.01	0.43	Murphy et la., 2006*
IX-267	LX-267	Anfibolita	IX	46.54	3.081	13.79	14.14	-	0.169	5.94	11.68	2.33	0.52	0.316	1.29	99.80	31.4	205.3	20.4	18470.90	0.01	0.65	Murphy et la., 2006*
IX-268	LX-268	Anfibolita	IX	46.47	2.682	13.82	13.91	-	0.172	6.97	9.98	3.44	0.37	0.287	1.45	99.55	27.6	171.2	17.5	16078.86	0.01	0.63	Murphy et la., 2006*
MF-MI-6	MI-6	Anfibolita	MIM	49.90	0.98	14.10	11.10	5.70	0.17	8.29	11.00	2.38	0.13	0.08	-	103.83	-	168.00	-	5875.20	0.03	-	Meza-Figueroa et al., 2003
MF-D17814	D17814	Anfibolita	PT	47.70	3.18	13.20	15.60	8.20	0.22	5.25	10.20	2.48	0.35	0.34	-	106.72	35.29	188.00	27.82	19064.42	0.01	0.79	Meza-Figueroa et al., 2003
PL-ME	Meta-eclogita	Meta-eclogita/ Anfibolita	MIM	45.80	1.32	15.63	12.18	-	0.25	7.36	9.49	0.88	0.04	0.13	6.76	99.83	-	-	-	-	-	-	Pérez-López 2014
IX-58	LX-58	Esquisto azul	IX	46.04	1.503	14.96	12	-	0.184	7.66	10.96	2.77	0.04	0.12	3.78	100.02	35.8	85.9	2.7	9010.64	0.01	0.08	Murphy et la., 2006*
IX-59	LX-59	Esquisto azul	IX	44.64	1.401	14.34	12.07	-	0.207	6.91	11.02	4.02	0.2	0.117	6.03	100.96	33.8	86.5	1.7	8399.14	0.01	0.05	Murphy et la., 2006*
IX-231	LX-231	Esquisto azul	IX	45.42	1.394	15.11	13.35	-	0.202	7.16	11.49	2.58	0.08	0.123	3	99.91	34.6	76.6	3.4	8357.17	0.01	0.10	Murphy et la., 2006*
IX-232	LX-232	Esquisto azul	IX	42.94	0.956	12.76	10.34	-	0.214	5.08	13.62	2.89	0.2	0.09	12	101.05	20.7	56.5	2.2	5731.32	0.01	0.11	Murphy et la., 2006*
IX-233	LX-233	Esquisto azul	IX	46.74	1.57	14.79	12.44	-	0.182	7.32	10.67	3.04	0.26	0.131	2.95	100.09	37	94.9	2.7	9412.31	0.01	0.07	Murphy et la., 2006*
IX-234	LX-234	Esquisto azul	IX	48.25	1.355	13.78	11.48	-	0.176	6.74	12.15	1.97	0.07	0.142	3.88	99.99	30.1	87.5	2.9	8123.36	0.01	0.10	Murphy et la., 2006*
IX-235	LX-235	Esquisto azul	IX	38.77	1.282	15.6	12.94	-	0.205	4.88	14.94	1.5	1.37	0.062	9.08	100.63	31.1	76.2	2.6	7685.72	0.01	0.08	Murphy et la., 2006*
IX-236	LX-236	Esquisto azul	IX	44.86	1.548	14.18	12.09	-	0.185	5.46	14.22	1.95	0.06	0.13	5.64	100.32	34.9	94.7	3.2	9280.41	0.01	0.09	Murphy et la., 2006*
IX-237	LX-237	Esquisto azul	IX	42.99	1.577	14.59	12.75	-	0.166	3.07	16.67	2.54	0.11	0.147	6.02	100.63	37.5	100.8	3.2	9454.27	0.01	0.09	Murphy et la., 2006*
IX-273	LX-273	Esquisto azul	IX	45.86	1.922	17.59	15.56	-	0.215	4.22	6.63	3.61	0.75	0.183	3.4	99.94	39.7	114.4	2.9	11522.58	0.01	0.07	Murphy et la., 2006*
IX-275	LX-275	Esquisto azul	IX	47.34	1.505	15.36	12.08	-	0.178	6.95	10.88	2.72	0.07	0.131	2.89	100.10	31.9	97.4	3	9022.63	0.01	0.09	Murphy et la., 2006*
IX-277	LX-277	Esquisto azul	IX	52.22	1.236	15.58	9.89	-	0.152	6.43	5.92	3.76	0.71	0.146	3.28	99.32	33.4	89.3	6	7409.94	0.01	0.18	Murphy et la., 2006*
IX-278	LX-278	Esquisto azul	IX	49	1.416	13.34	12.81	-	0.148	6.76	9.65	4.26	0.1	0.09	2.47	100.04	26.5	76.3	0.1	8489.06	0.01	0.00	Murphy et la., 2006*
PL-01B	A-VH-29-01B	Esquisto azul	MIM	45.53	1.43	18.71	12.82	-	0.24	4.25	10.05	3.22	0.66	0.12	2.83	99.84	-	-	-	-	-	-	Pérez-López 2014
PL-03	A-VH-29-03	Esquisto azul	MIM	46.38	1.55	16.82	13.18	-	0.19	4.18	10.97	1.81	0.28	0.19	4.64	100.19	-	-	-	-	-	-	Pérez-López 2014
PL-05	A-VH-29-05	Esquisto azul	MIM	45.33	1.60	16.37	12.50	-	0.27	5.42	9.83	2.54	0.52	0.13	5.29	99.80	-	-	-	-	-	-	Pérez-López 2014
PL-02	A-VH-30-02	Esquisto azul	MIM	46.00	1.98	18.62	14.13	-	0.23	3.20	9.06	2.58	1.94	0.12	2.30	100.16	-	-	-	-	-	-	Pérez-López 2014
PL-09	A-VH-30-09	Esquisto azul	MIM	41.27	1.14	17.44	11.47	-	0.22	5.41	15.16	1.60	0.72	0.15	5.35	99.94	-	-	-	-	-	-	Pérez-López 2014
PL-11	A-VH-30-11	Esquisto azul	MIM	45.83	1.39	16.55	12.60	-	0.24	7.52	8.27	3.62	0.21	0.11	3.83	100.17	-	-	-	-	-	-	Pérez-López 2014

\* Datos no publicados

## Anexo B

### Análisis de microsonda electrónica de barrido

Tabla B.1: Análisis de microsonsa para Granates (% mol).

Muestra	Piax-13A	Piax-13A	Piax-13A	Piax-13A	Piax-13A	Piax-13A	Piax-13A	Piax-13A	Piax-13A	Piax-13A	Piax-13A	Piax-13A	Piax-13A	Piax-13A	Piax-13A	Piax-13A	Piax-13A	Piax-13A	Piax-13A	Piax-13A	Piax-13A	Piax-13A	Piax-13A	
No. Análisis	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	
	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	
	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	
	borde	borde	borde	borde	borde	núcleo	núcleo	núcleo	núcleo	núcleo	núcleo	núcleo	núcleo	núcleo	núcleo	borde	borde	borde	borde	borde	borde	borde	núcleo	núcleo
SiO <sub>2</sub>	37.81	38.12	38.09	38.07	37.79	37.84	38.81	37.48	38.07	38.16	38.05	38.06	38.05	37.80	37.99	37.67	37.76	37.85	37.49	37.78	37.74	37.75	38.13	
TiO <sub>2</sub>	0.11	0.25	0.10	0.07	0.10	0.25	0.28	0.35	0.41	0.21	0.16	0.20	0.28	0.32	0.32	0.25	0.12	0.16	0.13	0.17	0.16	0.27	0.24	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22.01	21.56	21.95	21.99	21.69	21.75	21.55	21.61	21.36	21.74	21.91	21.86	21.60	21.51	21.32	21.66	22.07	21.91	21.67	21.64	21.76	21.77	21.83	
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	0.01	0.00	0.05	0.01	0.03	0.02	0.00	0.01	0.03	0.00	0.03	0.00	0.03	0.00	0.06	0.00	0.00	0.06	0.04	0.00	0.00	0.00	
FeO	23.90	23.99	23.13	24.47	24.32	23.65	22.72	23.99	23.68	23.85	23.83	23.47	23.42	23.59	23.58	23.58	23.01	24.62	24.87	23.86	23.00	23.05	22.95	
MnO	0.78	0.82	0.76	0.41	0.65	1.00	1.17	1.05	1.03	0.93	1.05	1.01	1.49	1.35	1.22	0.77	0.65	0.40	0.50	0.73	1.34	1.33	1.04	
MgO	3.71	3.38	3.68	3.94	2.63	3.11	3.51	3.75	3.74	3.72	3.73	3.77	3.38	3.23	3.26	3.13	3.74	4.09	2.60	2.60	2.83	3.44	3.69	
CaO	11.67	11.70	12.13	10.95	12.75	12.36	11.62	11.61	11.54	11.24	11.22	11.52	11.66	12.04	12.20	12.86	12.60	10.88	12.68	13.06	13.01	12.30	11.91	
Na <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
K <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Total	100.00	99.84	99.86	99.96	99.94	99.99	99.68	99.85	99.84	99.90	99.96	99.92	99.89	99.85	99.89	99.99	99.95	99.91	100.00	99.89	99.84	99.91	99.80	
Número de Iones con base en :																								
12 O*																								
Si	5.92	5.98	5.95	5.95	5.95	5.93	6.05	5.89	5.97	5.97	5.95	5.95	5.96	5.94	5.97	5.91	5.90	5.92	5.91	5.94	5.93	5.92	5.96	
Al <sup>IV</sup>	0.08	0.02	0.05	0.05	0.05	0.07	0.00	0.11	0.03	0.03	0.05	0.05	0.04	0.06	0.03	0.09	0.10	0.08	0.09	0.06	0.07	0.08	0.04	
suma Z:	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.05	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	
Al <sup>VI</sup>	3.97	3.96	3.99	4.00	3.97	3.95	3.96	3.90	3.91	3.98	3.99	3.98	3.96	3.92	3.91	3.92	3.96	3.96	3.94	3.96	3.96	3.94	3.98	
Ti	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	0.03	0.03	0.04	0.05	0.03	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	0.03	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	
Fe <sup>3+</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
suma Y:	3.99	3.99	4.00	4.01	3.98	3.99	4.00	3.94	3.96	4.01	4.01	4.00	3.99	3.97	3.95	3.96	3.98	3.98	3.96	3.98	3.98	3.97	4.01	
Mg	0.86	0.79	0.86	0.92	0.62	0.73	0.82	0.88	0.87	0.87	0.87	0.88	0.79	0.76	0.76	0.73	0.87	0.95	0.61	0.61	0.66	0.81	0.86	
Fe <sup>2+</sup>	3.13	3.14	3.02	3.20	3.20	3.10	2.96	3.15	3.10	3.12	3.12	3.07	3.10	3.10	3.10	3.10	3.01	3.22	3.28	3.14	3.02	3.02	3.00	
Mn	0.10	0.11	0.10	0.05	0.09	0.13	0.16	0.14	0.14	0.12	0.14	0.13	0.20	0.18	0.16	0.10	0.09	0.05	0.07	0.10	0.18	0.18	0.14	
Ca	1.96	1.97	2.03	1.83	2.15	2.08	1.94	1.95	1.94	1.88	1.88	1.93	1.96	2.03	2.05	2.16	2.11	1.83	2.14	2.20	2.19	2.07	1.99	
suma X:	6.05	6.01	6.01	6.00	6.05	6.04	5.88	6.13	6.05	5.99	6.01	6.01	6.02	6.06	6.07	6.09	6.07	6.05	6.10	6.05	6.05	6.07	5.99	
Total	16.04	16.00	16.02	16.01	16.03	16.02	15.93	16.06	16.01	16.00	16.01	16.01	16.01	16.03	16.02	16.05	16.05	16.04	16.06	16.03	16.03	16.04	16.00	
% Mol miembros extremos																								
Prp	14.29	13.15	14.27	15.28	10.18	12.04	13.90	14.36	14.46	14.47	14.49	14.63	13.14	12.47	12.57	12.00	14.33	15.75	10.04	10.09	10.97	13.27	14.34	
Alm	51.67	52.32	50.27	53.28	52.88	51.37	50.43	51.46	51.28	52.04	51.89	51.06	51.02	51.13	50.99	50.81	49.51	53.22	53.75	51.91	49.91	49.79	50.07	
Sps	1.71	1.82	1.68	0.89	1.44	2.19	2.64	2.28	2.26	2.06	2.32	2.22	3.30	2.96	2.66	1.69	1.42	0.88	1.09	1.60	2.95	2.90	2.31	
Uv	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.06	0.00	0.03	0.11	0.00	0.11	0.00	0.08	0.00	0.20	0.00	0.00	0.19	0.13	0.00	0.00	0.00	
And	2.10	0.58	1.22	1.28	1.36	1.64	0.00	2.74	0.86	0.77	1.24	1.28	0.88	1.50	0.86	2.18	2.50	1.92	2.27	1.42	1.73	2.09	1.01	
Grs	31.05	32.06	33.02	29.80	34.67	33.11	32.55	30.00	30.94	30.62	30.44	31.04	31.68	32.14	32.87	33.84	33.31	28.95	33.59	35.31	35.07	32.59	32.43	

O\* Oxigenos

Piax-13A	Piax-13A	Piax-13A	Piax-13A	Piax-13A	Piax-13A	Piax-13A	Piax-13A	Piax-13A	Piax-13A	Piax-13A	Piax-13A	Piax-13A	Piax-13A	Piax-13A	Piax-13A	Piax-13A	Piax-13A	Piax-13A	Piax-13B	Piax-13B	Piax-13B	Piax-13B	Piax-13B	Piax-13B	Piax-13B
86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	129	130	131	132	133	134	135	
Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt
Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm
núcleo	núcleo	núcleo	núcleo	núcleo	núcleo	borde	borde	borde	borde	borde	borde	borde	borde	borde	borde	borde	borde	borde	núcleo	borde	núcleo	borde	núcleo	-	
37.82	37.90	38.02	38.37	37.97	37.90	37.96	37.62	37.92	37.87	37.64	37.71	37.61	37.84	37.81	37.87	37.88	38.10	38.12	38.04	37.96	38.25	38.08	38.11	38.10	
0.23	0.27	0.19	0.12	0.18	0.08	0.07	0.10	0.08	0.11	0.14	0.24	0.24	0.21	0.09	0.16	0.07	0.15	0.12	0.20	0.13	0.21	0.11	0.10	0.06	
21.98	21.69	21.89	21.80	21.83	22.05	21.98	21.97	21.97	21.86	21.84	21.74	21.86	21.72	21.92	22.00	22.00	21.98	20.94	20.99	21.11	20.99	21.04	20.97	21.17	
0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.03	0.00	0.03	0.01	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.04	0.02	0.06	0.03	0.00	0.06	0.04	0.03	0.03	0.01	
23.46	22.55	23.52	22.71	22.86	23.09	23.66	24.06	24.56	23.63	24.15	23.28	23.99	24.54	23.64	24.15	24.58	24.31	24.41	24.61	23.63	24.55	25.10	24.72	23.73	
0.93	1.39	0.97	1.10	1.00	0.89	0.78	0.79	0.83	0.63	0.58	0.90	0.99	0.83	0.53	0.66	0.58	0.40	0.54	1.14	0.53	0.99	0.56	0.60	0.52	
3.68	3.38	3.71	3.55	3.57	3.47	3.71	3.87	3.58	3.22	2.49	3.22	2.70	2.32	3.04	4.05	4.05	4.68	3.18	4.32	3.58	4.17	3.70	3.85	3.82	
11.79	12.66	11.67	12.07	12.46	12.45	11.83	11.55	11.04	12.64	13.04	12.84	12.54	12.49	12.78	10.96	10.72	10.28	12.66	10.69	12.97	10.74	11.36	11.59	12.54	
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
99.89	99.84	99.97	99.73	99.87	99.96	99.99	99.99	99.99	99.95	99.91	99.93	99.93	99.96	99.83	99.89	99.90	99.95	100.00	99.99	99.96	99.94	99.97	99.98	99.95	

5.92	5.94	5.94	5.99	5.94	5.93	5.93	5.89	5.94	5.93	5.92	5.91	5.92	5.96	5.93	5.92	5.93	5.94	5.98	5.95	5.93	5.99	5.97	5.96	5.95
0.08	0.06	0.06	0.01	0.06	0.07	0.07	0.11	0.06	0.07	0.08	0.09	0.08	0.04	0.07	0.08	0.07	0.06	0.02	0.05	0.07	0.01	0.03	0.04	0.05
6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00
3.97	3.94	3.98	4.01	3.96	3.99	3.98	3.95	4.00	3.97	3.97	3.93	3.97	3.99	3.99	3.98	3.99	3.97	3.84	3.81	3.82	3.86	3.85	3.83	3.84
0.03	0.03	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.03	0.03	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.18	0.20	0.10	0.15	0.17	0.18
4.00	3.98	4.00	4.02	3.98	4.00	3.99	3.97	4.01	3.98	3.99	3.96	4.00	4.01	4.00	4.00	4.00	4.00	4.01	4.02	4.04	3.99	4.02	4.02	4.04
0.86	0.79	0.86	0.83	0.83	0.81	0.86	0.90	0.84	0.75	0.58	0.75	0.63	0.55	0.71	0.95	0.95	1.09	0.74	1.01	0.83	0.97	0.86	0.90	0.89
3.07	2.95	3.07	2.97	2.99	3.02	3.09	3.15	3.22	3.10	3.18	3.05	3.16	3.23	3.10	3.16	3.22	3.17	3.06	3.03	2.89	3.11	3.14	3.06	2.91
0.12	0.18	0.13	0.15	0.13	0.12	0.10	0.10	0.11	0.08	0.08	0.12	0.13	0.11	0.07	0.09	0.08	0.05	0.07	0.15	0.07	0.13	0.07	0.08	0.07
1.98	2.13	1.95	2.02	2.09	2.09	1.98	1.94	1.85	2.12	2.20	2.16	2.11	2.11	2.15	1.84	1.80	1.72	2.13	1.79	2.17	1.80	1.91	1.94	2.10
6.03	6.05	6.02	5.96	6.04	6.03	6.04	6.10	6.02	6.05	6.04	6.08	6.03	5.99	6.03	6.03	6.04	6.03	6.00	5.98	5.96	6.01	5.99	5.99	5.97
16.03	16.03	16.02	15.98	16.03	16.03	16.03	16.06	16.02	16.04	16.03	16.05	16.03	16.00	16.03	16.03	16.03	16.02	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00
14.23	13.03	14.35	13.88	13.79	13.41	14.31	14.83	13.91	12.42	9.68	12.38	10.48	9.11	11.79	15.68	15.67	18.06	12.39	16.82	13.97	16.16	14.44	15.02	14.90
50.94	48.81	51.06	49.79	49.47	50.06	51.18	51.67	53.48	51.14	52.63	50.19	52.32	53.91	51.41	52.40	53.29	52.58	50.96	50.71	48.44	51.71	52.46	51.18	48.80
2.04	3.04	2.13	2.43	2.19	1.96	1.72	1.72	1.82	1.37	1.28	1.97	2.18	1.84	1.17	1.46	1.27	0.89	1.20	2.53	1.18	2.19	1.24	1.33	1.15
0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.08	0.00	0.09	0.02	0.00	0.06	0.02	0.02	0.04	0.06	0.12	0.07	0.17	0.09	0.00	0.18	0.13	0.08	0.09	0.02
2.03	1.55	1.43	0.14	1.53	1.84	1.65	2.68	1.48	1.68	1.92	2.15	2.11	1.11	1.69	1.93	1.79	1.55	4.17	5.87	6.62	2.94	4.53	5.18	5.88
31.44	33.94	31.46	33.61	33.52	33.46	31.86	30.20	29.91	34.06	35.18	34.01	33.60	34.24	34.59	29.15	28.69	27.31	31.31	24.44	30.26	26.75	27.51	27.50	29.80

Piax-13B	Piax-13B	Piax-13B	Piax-13B	Piax-13B	Piax-13B	Piax-13B	Piax-13B	Piax-13B	Piax-13B	Piax-13B	Piax-13B	Piax-13B	Piax-13B	Piax-13B	Piax-13B	Piax-27	Piax-27	Piax-27	Piax-27	Piax-27	Piax-27	Piax-27	Piax-27	Piax-27	
136	137	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203
Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grn	Grn	Grn	Grn	Grn	Grn	Grn	Grn	Grn	Grn
Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm
núcleo	borde	borde	borde	borde	nucleo	nucleo	nucleo	nucleo	nucleo	nucleo	nucleo	nucleo	borde	borde	borde	borde	borde	borde	borde	núcleo	núcleo	núcleo	núcleo	núcleo	núcleo
38.10	38.14	37.89	37.94	37.84	37.76	37.84	37.66	37.77	37.84	37.91	37.72	37.94	37.81	37.63	37.95	38.12	37.24	36.69	37.22	37.88	39.15	38.15	38.07	37.01	38.06
0.28	0.03	0.09	0.09	0.14	0.16	0.25	0.28	0.22	0.13	0.29	0.24	0.21	0.14	0.16	0.07	0.16	0.20	0.20	0.22	0.15	0.08	0.10	0.12	0.15	0.17
20.83	21.41	21.76	21.78	21.63	21.66	21.59	21.52	21.60	21.73	21.62	21.71	21.47	21.57	21.60	21.97	22.38	21.90	21.05	21.67	22.20	21.92	22.15	22.14	21.42	22.10
0.15	0.03	0.05	0.02	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00
25.78	24.56	25.05	24.89	25.14	24.86	25.52	25.84	26.08	25.85	25.49	25.02	24.77	24.90	25.24	24.53	23.48	23.10	23.30	23.49	23.76	23.17	23.76	23.22	22.98	23.42
0.75	0.50	0.71	0.67	0.91	1.29	1.33	1.17	1.08	1.09	1.12	1.28	1.14	0.87	0.69	1.05	1.07	1.33	1.68	1.95	1.34	1.36	1.37	1.41	1.25	
4.64	4.43	4.39	3.94	3.67	3.99	4.56	4.70	4.46	4.60	4.63	4.42	4.01	3.80	3.74	4.04	3.48	2.87	2.56	2.93	3.60	3.37	3.55	3.44	3.03	2.98
9.36	10.88	10.06	10.68	10.65	10.02	8.88	8.81	8.67	8.70	8.87	9.59	10.32	10.53	10.73	10.69	12.49	13.21	12.85	12.56	10.78	9.99	12.25	12.82	12.75	13.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.13	0.03	0.02	0.11	0.47	0.06	0.00	0.01	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.08	0.02	0.00	0.01	0.00
99.89	99.99	100.00	100.00	99.98	99.75	99.96	99.98	99.88	99.94	99.90	99.82	100.00	99.89	99.99	99.94	101.19	99.73	98.01	99.81	100.44	99.56	101.42	101.19	98.78	100.98
5.97	5.95	5.93	5.94	5.94	5.94	5.94	5.91	5.94	5.94	5.94	5.92	5.95	5.94	5.92	5.94	5.90	5.87	5.91	5.88	5.92	6.12	5.90	5.90	5.89	5.91
0.03	0.05	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.09	0.06	0.06	0.06	0.08	0.05	0.06	0.08	0.06	0.10	0.13	0.09	0.12	0.08	0.00	0.10	0.10	0.11	0.09
6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.12	6.00	6.00	6.00	6.00
3.82	3.88	3.94	3.96	3.95	3.95	3.93	3.90	3.94	3.95	3.94	3.94	3.92	3.94	3.92	3.99	3.98	3.94	3.90	3.91	4.00	4.04	3.94	3.94	3.91	3.96
0.03	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.13	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.99	4.04	3.96	3.97	3.96	3.97	3.96	3.93	3.96	3.97	3.97	3.96	3.95	3.96	3.94	4.00	4.00	3.97	3.92	3.94	4.02	4.05	3.96	3.96	3.93	3.98
1.08	1.03	1.03	0.92	0.86	0.93	1.07	1.10	1.04	1.08	1.08	1.03	0.94	0.89	0.88	0.94	0.80	0.67	0.62	0.69	0.84	0.79	0.82	0.79	0.72	0.69
3.25	3.05	3.28	3.26	3.30	3.27	3.35	3.39	3.43	3.39	3.34	3.28	3.25	3.27	3.32	3.21	3.04	3.05	3.14	3.10	3.10	3.03	3.08	3.01	3.06	3.04
0.10	0.07	0.09	0.09	0.12	0.17	0.18	0.16	0.14	0.14	0.14	0.15	0.17	0.15	0.12	0.09	0.14	0.14	0.18	0.22	0.26	0.18	0.18	0.18	0.19	0.16
1.57	1.82	1.69	1.79	1.79	1.69	1.49	1.48	1.46	1.46	1.49	1.61	1.73	1.77	1.81	1.79	2.07	2.23	2.22	2.12	1.80	1.67	2.03	2.13	2.17	2.16
6.01	5.96	6.09	6.06	6.07	6.06	6.08	6.13	6.08	6.07	6.06	6.08	6.09	6.09	6.12	6.03	6.05	6.10	6.15	6.14	6.00	5.67	6.11	6.11	6.14	6.06
16.00	16.00	16.05	16.04	16.04	16.04	16.04	16.06	16.04	16.04	16.03	16.04	16.04	16.04	16.06	16.03	16.04	16.07	16.07	16.08	16.02	15.85	16.06	16.07	16.08	16.04
18.03	17.26	16.85	15.19	14.16	15.41	17.52	17.95	17.19	17.72	17.87	17.00	15.38	14.63	14.32	15.60	13.27	11.06	10.00	11.22	13.97	13.86	13.43	12.99	11.72	11.40
54.14	51.13	53.88	53.78	54.36	53.91	55.04	55.35	56.41	55.82	55.15	54.01	53.35	53.76	54.24	53.18	50.21	49.97	51.00	50.52	51.69	53.48	50.37	49.25	49.80	50.20
1.67	1.11	1.55	1.47	1.98	2.84	2.90	2.54	2.38	2.38	2.38	2.46	2.78	2.49	1.89	1.52	2.28	2.35	2.96	3.66	4.30	3.14	2.92	2.95	3.10	2.71
0.46	0.09	0.14	0.05	0.00	0.07	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.06	0.00	0.00	0.03	0.00	0.05	0.00
3.89	5.16	1.74	1.46	1.42	1.58	1.62	2.19	1.63	1.61	1.45	2.00	1.20	1.44	2.08	1.57	2.57	3.18	2.39	3.10	2.08	0.00	2.43	2.56	2.71	2.18
21.78	25.86	26.57	28.65	28.57	26.75	23.36	22.64	22.86	23.08	23.45	25.15	27.57	28.18	28.19	28.82	32.72	34.71	34.54	32.65	28.79	29.42	31.89	33.36	33.75	34.34

Piax-27	Piax-27	Piax-27	Piax-27	Piax-27	Piax-27	Piax-27	Piax-27	Piax-27	Piax-27	Piax-27	Piax-27	Piax-27	Piax-15	Piax-15	Piax-15	Piax-15	Piax-15	Piax-15	Piax-15	Piax-15	Piax-15	Piax-15	Piax-15	Piax-15	Piax-15	Piax-15	
204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
Grn	Grn	Grn	Grn	Grn	Grn	Grn	Grn	Grn	Grn	Grn	Grn	Grn	Grn	Grn	Grn	Grn	Grn	Grn	Grn	Grn	Grn	Grn	Grn	Grn	Grn	Grn	Grn
Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm
borde	borde	borde	borde																								
37.75	33.72	36.42	38.04	38.00	38.11	38.78	38.04	38.10	38.09	38.27	38.04	37.52	38.07	37.45	37.79	37.92	37.69	37.75	37.83	37.97	37.84	33.91	37.86	37.79	37.67	37.78	36.36
0.13	0.09	0.18	0.08	0.12	0.21	0.15	0.21	0.12	0.23	0.15	0.14	0.08	0.08	0.13	0.23	0.24	0.36	0.37	0.33	0.35	0.32	1.57	0.38	0.27	0.30	0.15	0.20
21.79	19.05	20.82	22.23	21.99	22.16	22.54	22.14	21.86	21.78	22.27	22.32	21.76	21.06	21.09	20.87	21.02	20.73	20.76	20.74	20.80	20.86	19.37	20.92	20.78	20.69	20.94	20.65
0.16	0.02	0.07	0.00	0.01	0.02	0.04	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.03	0.00	0.00	0.00	0.05	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00
24.19	23.65	23.80	25.15	24.41	22.93	23.00	23.21	24.39	24.23	22.74	22.86	23.94	27.86	28.44	27.95	27.74	25.92	25.20	25.53	26.35	26.49	27.10	26.31	26.92	26.67	28.36	29.00
0.90	0.97	0.71	1.10	1.36	1.19	1.00	1.13	1.26	1.16	1.17	1.05	1.10	0.26	0.35	0.45	0.69	1.77	2.06	1.85	1.51	1.47	0.99	1.11	1.07	1.12	0.79	0.61
2.43	2.00	4.11	3.83	2.97	3.49	3.61	3.63	3.19	3.29	3.74	3.57	3.45	2.86	2.75	2.56	2.50	2.18	1.97	2.09	2.24	2.23	3.91	2.31	2.32	2.18	2.46	3.00
13.14	11.06	11.06	10.58	12.00	12.71	12.67	12.17	11.44	11.55	12.17	12.68	12.08	10.06	9.96	10.05	10.52	11.19	11.55	11.41	10.97	11.16	9.11	11.14	10.64	11.13	9.78	9.11
0.01	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.02	0.00	0.05	0.02	0.00	0.00	0.07	0.00	0.06	0.03	0.06	0.06	0.06	0.04	0.06	0.06	0.04	0.07	0.04	0.05	0.00	0.05
0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00
100.52	90.59	97.17	101.01	100.92	100.82	101.81	100.54	100.44	100.35	100.51	100.67	100.09	100.26	100.27	99.94	100.69	99.90	99.77	99.81	100.26	100.43	96.02	100.09	99.85	99.80	100.28	98.98

5.92	5.92	5.89	5.91	5.93	5.91	5.94	5.91	5.96	5.95	5.94	5.90	5.89	6.00	5.92	5.99	5.97	5.98	6.00	6.01	6.01	5.97	5.61	5.99	6.00	5.99	5.98	5.83
0.08	0.08	0.11	0.09	0.07	0.09	0.06	0.09	0.04	0.05	0.06	0.10	0.11	0.00	0.08	0.01	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.03	0.39	0.01	0.00	0.01	0.02	0.17
6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.01	6.01	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00
3.94	3.86	3.85	3.98	3.97	3.96	4.01	3.97	3.98	3.96	4.01	3.98	3.92	3.91	3.85	3.89	3.87	3.86	3.89	3.88	3.88	3.86	3.38	3.89	3.89	3.86	3.89	3.73
0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.20	0.04	0.03	0.04	0.02	0.02
0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.19	0.06	0.10	0.07	0.02	0.03	0.03	0.09	0.55	0.03	0.04	0.08	0.10	0.36
3.98	3.88	3.88	3.99	3.98	3.99	4.03	4.00	4.00	3.99	4.02	4.00	3.94	3.99	4.06	3.98	4.00	3.97	3.96	3.95	3.95	3.99	4.13	3.96	3.97	3.98	4.00	4.12
0.57	0.52	0.99	0.89	0.69	0.81	0.83	0.84	0.74	0.77	0.86	0.83	0.81	0.67	0.65	0.61	0.59	0.51	0.47	0.49	0.53	0.53	0.96	0.54	0.55	0.52	0.58	0.72
3.17	3.47	3.22	3.27	3.18	2.97	2.95	3.02	3.19	3.17	2.95	2.97	3.15	3.61	3.56	3.65	3.55	3.37	3.33	3.36	3.46	3.41	3.19	3.45	3.53	3.46	3.66	3.53
0.12	0.14	0.10	0.14	0.18	0.16	0.13	0.15	0.17	0.15	0.15	0.14	0.15	0.04	0.05	0.06	0.09	0.24	0.28	0.25	0.20	0.20	0.14	0.15	0.14	0.15	0.11	0.08
2.21	2.08	1.91	1.76	2.00	2.11	2.08	2.03	1.92	1.93	2.02	2.11	2.03	1.70	1.69	1.71	1.77	1.90	1.97	1.94	1.86	1.89	1.61	1.89	1.81	1.89	1.66	1.56
6.07	6.22	6.22	6.06	6.06	6.05	5.98	6.04	6.02	6.02	5.99	6.04	6.13	6.01	5.95	6.02	6.00	6.03	6.04	6.05	6.05	6.01	5.91	6.04	6.03	6.02	6.00	5.90
16.04	16.10	16.10	16.05	16.04	16.04	16.01	16.03	16.02	16.01	16.01	16.04	16.08	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.04	16.00	16.00	16.00	16.00	16.01
9.37	8.43	15.92	14.63	11.41	13.35	13.80	13.95	12.38	12.74	14.43	13.69	13.18	11.16	10.89	10.05	9.78	8.54	7.74	8.17	8.73	8.73	16.32	9.03	9.09	8.56	9.67	12.19
52.28	55.82	51.73	53.93	52.53	49.14	49.27	49.99	53.00	52.60	49.25	49.11	51.28	60.01	59.95	60.60	59.13	55.92	55.12	55.62	57.18	56.61	54.02	57.20	58.52	57.49	60.93	59.86
1.98	2.31	1.56	2.38	2.97	2.59	2.16	2.47	2.78	2.55	2.57	2.28	2.39	0.58	0.79	1.00	1.53	3.96	4.59	4.11	3.35	3.28	2.34	2.47	2.38	2.50	1.77	1.41
0.51	0.08	0.24	0.00	0.03	0.05	0.11	0.00	0.02	0.04	0.00	0.00	0.24	0.04	0.10	0.00	0.00	0.00	0.17	0.02	0.00	0.00	0.03	0.00	0.10	0.01	0.00	0.00
2.08	2.10	2.91	2.28	1.86	2.24	1.51	2.13	1.08	1.18	1.61	2.41	2.67	1.62	6.79	1.60	3.34	2.19	0.45	0.66	0.68	2.96	22.99	0.97	1.11	2.40	2.94	12.84
34.63	32.15	28.81	27.81	31.96	33.44	33.69	32.21	31.11	31.15	32.73	33.50	31.45	26.47	22.30	26.49	26.25	29.06	31.38	30.93	29.54	28.27	6.72	29.89	28.40	28.77	24.72	15.46

Piax-15	Piax-15	Piax-15	Piax-15	Piax-15	Piax-15	Piax-15	Piax-15	Piax-15	Piax-15	Piax-15	Piax-15	Piax-15	Piax-15	Piax-15	Piax-15	Piax-15	Piax-15	Piax-15	Piax-15	Piax-15	Piax-15	Piax-15	Piax-Z1	Piax-Z1	Piax-Z1	Piax-Z1	Piax-Z3	Piax-Z3
61	62	63	64	65	66	67	68	81	86	87	88	117	124	125	93	94	95	96	102	103	106	320	321	322	323	271	272	
Grn	Grn	Grn	Grn	Grn	Grn	Grn	Grn	Grn	Grn	Grn	grn	Grt	Grt	Grt	Grn	Grn	Grn	Grn	Grn	Grt	Grn	Grn	Grn	Grn	Grn	Grn	Grn	Grn
Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Grs	Grs	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Grs	Grs	Grs	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm
36.98	37.81	37.98	37.95	37.97	37.80	37.50	38.23	39.62	37.82	37.92	37.88	38.45	37.68	37.63	37.87	37.88	37.85	37.55	37.97	39.63	38.11	37.90	37.78	37.59	37.47	38.17	37.95	
0.25	0.26	0.13	0.15	0.11	0.05	0.09	0.06	0.05	0.27	0.04	0.10	0.01	0.15	0.05	0.07	0.23	0.22	0.41	0.09	0.10	0.18	0.34	0.37	0.21	0.16	0.26	0.20	
20.83	20.74	20.91	21.03	20.95	21.34	21.15	21.07	20.29	20.77	24.97	23.76	20.80	20.95	21.12	21.20	20.60	20.74	20.49	24.20	19.44	26.35	21.02	21.02	20.95	20.92	21.06	21.17	
0.03	0.01	0.00	0.05	0.04	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.03	0.01	0.04	0.01	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.05	0.00	0.04	0.02	0.00	
28.46	28.44	29.03	28.63	28.72	28.13	29.14	29.42	26.03	27.07	10.25	11.49	28.54	28.98	29.06	27.75	27.95	27.06	25.22	10.84	15.19	9.03	27.07	26.60	27.38	28.15	23.46	23.13	
0.50	0.40	0.29	0.24	0.19	0.24	0.66	0.59	1.34	0.90	0.04	0.04	0.57	0.17	0.54	0.28	0.49	1.87	2.77	0.05	0.11	0.31	1.14	1.16	1.00	0.48	1.64	1.68	
2.96	2.48	2.54	2.56	2.61	2.84	2.94	3.03	2.27	2.40	0.00	0.19	3.64	2.47	3.11	2.94	2.44	2.22	2.04	0.00	2.68	0.15	2.97	2.93	2.68	2.86	4.12	4.07	
9.39	10.01	9.43	9.51	9.90	9.53	8.60	8.59	10.52	10.79	23.76	23.18	8.62	9.44	8.31	10.13	10.23	10.36	10.97	23.40	18.86	22.54	9.89	10.07	9.82	9.74	11.14	11.21	
0.01	0.05	0.01	0.01	0.02	0.04	0.00	0.00	0.02	0.05	0.00	0.00	0.28	0.05	0.02	0.03	0.05	0.04	0.04	0.04	0.20	0.00	0.05	0.05	0.04	0.07	0.07	0.00	
0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	0.03	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	
99.43	100.20	100.33	100.14	100.50	100.02	100.08	101.00	100.15	100.06	96.98	96.66	101.04	99.90	99.89	100.27	99.88	100.37	99.48	96.61	96.32	96.67	100.42	100.03	99.67	99.90	99.94	99.42	
5.89	5.99	6.01	6.01	5.99	5.98	5.94	6.00	6.22	5.83	5.91	5.95	6.03	5.99	5.97	5.96	6.02	5.99	5.99	5.95	6.31	5.89	5.98	5.98	5.98	5.96	5.99	5.97	
0.11	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	0.06	0.00	0.00	0.17	0.09	0.05	0.00	0.01	0.03	0.04	0.00	0.01	0.01	0.05	0.00	0.11	0.02	0.02	0.02	0.04	0.01	0.03	
6.00	6.00	6.01	6.01	6.00	6.00	6.00	6.00	6.22	6.00	6.00	6.00	6.03	6.00	6.00	6.00	6.02	6.00	6.00	6.00	6.31	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00
3.81	3.86	3.90	3.93	3.88	3.96	3.89	3.90	3.76	3.60	4.49	4.35	3.85	3.91	3.92	3.90	3.86	3.86	3.85	4.43	3.65	4.69	3.89	3.90	3.91	3.88	3.88	3.90	
0.03	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.00	0.01	0.00	0.02	0.01	0.01	0.03	0.03	0.05	0.01	0.01	0.02	0.04	0.04	0.03	0.02	0.03	0.02	
0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	
0.23	0.08	0.05	0.01	0.10	0.05	0.14	0.08	0.00	0.08	0.00	0.00	0.08	0.06	0.10	0.11	0.05	0.09	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
4.07	3.98	3.97	3.96	4.00	4.01	4.05	3.99	3.76	3.71	4.49	4.37	3.93	3.99	4.02	4.02	3.94	3.98	3.96	4.44	3.66	4.71	3.93	3.95	3.94	3.91	3.91	3.93	
0.70	0.59	0.60	0.60	0.61	0.67	0.69	0.71	0.53	0.55	0.00	0.04	0.85	0.59	0.74	0.69	0.58	0.52	0.49	0.00	0.64	0.03	0.70	0.69	0.63	0.68	0.96	0.96	
3.57	3.68	3.79	3.78	3.69	3.67	3.71	3.78	3.42	3.41	1.33	1.51	3.66	3.79	3.75	3.54	3.66	3.49	3.31	1.42	2.02	1.17	3.57	3.52	3.64	3.74	3.08	3.04	
0.07	0.05	0.04	0.03	0.03	0.03	0.09	0.08	0.18	0.12	0.01	0.01	0.08	0.02	0.07	0.04	0.07	0.25	0.37	0.01	0.02	0.04	0.15	0.15	0.14	0.06	0.22	0.22	
1.60	1.70	1.60	1.61	1.67	1.61	1.46	1.44	1.77	1.78	3.96	3.90	1.45	1.61	1.41	1.71	1.74	1.76	1.88	3.93	3.22	3.73	1.67	1.71	1.67	1.66	1.87	1.89	
5.94	6.02	6.02	6.03	6.00	5.99	5.96	6.01	5.90	5.86	5.30	5.46	6.03	6.01	5.98	5.98	6.05	6.02	6.04	5.36	5.89	4.97	6.10	6.07	6.09	6.15	6.13	6.11	
16.01	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	15.89	15.56	15.80	15.83	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	15.80	15.86	15.69	16.02	16.02	16.03	16.06	16.04	16.04	
11.85	9.73	9.95	10.01	10.21	11.17	11.65	11.81	9.01	9.41	0.00	0.80	14.11	9.76	12.32	11.56	9.57	8.69	8.05	0.00	10.79	0.68	11.47	11.38	10.43	11.02	15.73	15.62	
60.03	61.17	62.86	62.69	61.49	61.33	62.36	62.86	57.96	58.19	25.16	27.65	60.63	63.11	62.82	59.22	60.53	57.96	54.72	26.51	34.33	23.46	58.60	57.96	59.85	60.92	50.19	49.79	
1.13	0.89	0.65	0.53	0.42	0.53	1.48	1.30	3.03	2.00	0.10	0.10	1.25	0.38	1.21	0.62	1.10	4.17	6.19	0.13	0.26	0.82	2.50	2.55	2.22	1.05	3.55	3.67	
0.10	0.04	0.00	0.16	0.12	0.09	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.10	0.02	0.13	0.02	0.00	0.07	0.00	0.04	0.03	0.00	0.00	0.17	0.00	0.12	0.06	0.00	
8.22	2.34	1.32	0.28	2.69	1.76	5.06	2.07	0.00	6.81	2.09	1.06	2.14	1.79	3.25	3.72	1.37	2.57	1.64	1.02	0.00	2.31	0.49	0.58	0.42	0.97	0.38	0.67	
19.63	25.56	25.01	26.10	25.05	25.30	20.01	21.88	29.91	25.52	73.64	70.72	21.75	24.86	20.59	25.18	27.07	26.33	28.86	72.69	54.43	73.67	26.66	27.09	26.97	26.15	29.90	30.28	



Piax-Z3	Piax-Z3	Piax-Z3	Piax-Z3	Piax-Z3	Piax-Z3	Piax-Z3	Piax-Z3	Piax-Z3	Piax-Z3	Piax-Z3
273	274	275	276	277	278	279	280	290	302	303
Grn	Grn	Grn	Grn	Grn	Grn	Grn	Grn	Grn	Grn	Grn
Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm	Alm
38.07	38.07	38.22	38.40	38.25	38.53	38.35	38.09	38.97	38.24	38.15
0.22	0.13	0.11	0.02	0.11	0.07	0.14	0.17	0.21	0.06	0.10
21.10	21.21	21.52	21.48	21.41	21.57	21.35	21.23	19.78	21.22	21.16
0.00	0.02	0.00	0.06	0.05	0.00	0.07	0.04	0.02	0.02	0.02
23.03	24.31	22.78	23.93	23.52	24.39	24.35	23.76	21.71	24.83	24.28
1.92	0.43	1.16	0.87	0.85	0.88	0.57	0.77	0.96	0.50	0.61
3.76	4.57	3.46	4.37	4.48	4.38	4.23	4.35	5.62	3.80	4.54
11.56	10.43	12.80	11.09	11.16	10.87	11.19	11.16	11.36	11.23	10.43
0.03	0.03	0.00	0.03	0.04	0.05	0.06	0.06	0.06	0.01	0.07
0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.27	0.00	0.00
99.69	99.20	100.05	100.26	99.86	100.75	100.33	99.67	98.96	99.91	99.37

5.99	5.99	5.97	5.98	5.98	5.98	5.98	5.98	6.12	6.00	6.00
0.01	0.01	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00
6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.12	6.00	6.00
3.90	3.92	3.94	3.93	3.92	3.93	3.91	3.90	3.66	3.92	3.92
0.03	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.01	0.01
0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.92	3.94	3.95	3.94	3.94	3.94	3.93	3.93	3.69	3.93	3.93
0.88	1.07	0.81	1.02	1.04	1.01	0.98	1.02	1.32	0.89	1.07
3.03	3.20	2.98	3.12	3.07	3.17	3.18	3.12	2.85	3.26	3.19
0.26	0.06	0.15	0.12	0.11	0.12	0.08	0.10	0.13	0.07	0.08
1.95	1.76	2.14	1.85	1.87	1.81	1.87	1.88	1.91	1.89	1.76
6.11	6.08	6.08	6.10	6.10	6.10	6.11	6.11	6.21	6.10	6.09
16.03	16.03	16.03	16.04	16.04	16.04	16.04	16.04	16.02	16.03	16.03
14.41	17.61	13.27	16.65	17.10	16.61	16.12	16.66	21.19	14.58	17.48
49.54	52.56	48.96	51.11	50.40	51.87	52.01	50.99	45.94	53.40	52.37
4.19	0.94	2.52	1.89	1.84	1.90	1.24	1.68	2.07	1.08	1.33
0.02	0.08	0.00	0.18	0.15	0.01	0.23	0.14	0.07	0.05	0.07
0.35	0.25	0.66	0.40	0.56	0.48	0.49	0.63	0.00	0.03	0.06
31.34	28.49	34.76	29.93	30.06	29.27	29.95	29.97	30.40	30.78	28.57

Tabla B.2: Análisis de microsonda para piroxenos (%mol).

Muestra	Piax-15	Piax-15	Piax-15	Piax-Z3	Piax-Z3	Piax-Z3	Piax-Z3	Piax-Z3	Piax-Z3	Piax-Z3	Piax-Z3	Piax-Z3	Piax-Z3	Piax-13	Piax-13	Piax-13	Piax-13	Piax-13	Piax-13	Piax-13	Piax-27
No. Análisis	105	92	101	298	300	301	307	306	314	315	318	319	113	114	115	134	135	136	137	218	
	Fs	Aug	Aug	Omp	Omp	Omp	Omp	Omp	Omp	Omp	Omp	Omp	Omp	Omp	Omp	Omp	Omp	Omp	Omp	Omp	Di
SiO2	47.66	48.60	59.60	54.05	55.09	54.43	53.88	54.10	54.24	54.08	54.53	54.43	54.37	54.15	53.81	53.19	52.98	52.99	52.97	55.13	
TiO2	0.01	0.14	0.08	0.27	0.19	0.25	0.23	0.22	0.16	0.17	0.18	0.18	0.19	0.20	0.19	0.24	0.21	0.21	0.18	0.08	
Al2O3	7.62	4.43	1.00	8.86	10.17	9.15	9.13	9.54	9.10	8.85	9.52	8.74	10.03	9.04	9.74	9.52	9.65	9.66	8.75	1.37	
Cr2O3	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.00	0.04	0.07	0.07	0.16	0.03	0.00	0.06	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00	0.01	0.05	
FeO	30.53	26.78	18.74	5.44	4.94	5.37	5.67	5.33	5.52	5.39	5.49	5.49	5.23	5.70	5.46	7.38	7.20	7.25	7.85	9.15	
MnO	0.25	0.22	0.18	0.00	0.03	0.02	0.04	0.02	0.04	0.03	0.04	0.04	0.01	0.08	0.03	0.07	0.08	0.03	0.09	0.24	
MgO	4.40	6.34	8.25	9.47	8.76	9.38	9.40	9.20	9.33	9.34	9.16	9.62	8.56	9.25	8.72	7.89	7.77	7.80	7.74	10.94	
CaO	0.35	11.05	9.57	16.36	15.15	16.32	16.44	15.97	16.51	16.47	16.14	16.65	15.03	16.17	15.66	14.33	14.51	14.31	14.05	21.52	
Na2O	0.92	1.01	0.20	4.86	5.48	5.10	4.82	4.93	4.92	4.94	5.02	4.77	5.41	4.85	5.01	5.56	5.75	5.82	5.83	0.72	
K2O	1.76	0.15	0.01	0.00	0.05	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	0.02	
Total	93.50	98.71	97.65	99.33	99.88	100.03	99.67	99.37	99.88	99.42	100.13	99.92	98.89	99.43	98.62	98.22	98.19	98.08	97.46	99.22	
Número de Iones con base en :																					
O*																					
Si	2.04	1.95	2.39	1.96	1.98	1.96	1.95	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96	1.97	1.96	1.97	1.96	1.95	1.95	1.96	2.09	
Ti	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	
Al (T)	0.00	0.05	0.00	0.04	0.02	0.04	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.03	0.04	0.05	0.05	0.04	0.00	
Al (M1)	0.38	0.15	0.05	0.34	0.41	0.34	0.34	0.37	0.34	0.34	0.36	0.33	0.40	0.35	0.38	0.37	0.36	0.36	0.34	0.06	
Fe3+ (T)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Fe3+ (M1)	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.04	0.04	0.00	0.04	0.04	0.02	0.03	0.00	0.02	0.00	0.06	0.09	0.09	0.10	0.00	
Fe2+	1.09	0.90	0.63	0.14	0.15	0.12	0.13	0.16	0.13	0.13	0.15	0.14	0.16	0.16	0.17	0.17	0.13	0.13	0.14	0.29	
Mn	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	
Mg	0.28	0.38	0.49	0.51	0.47	0.50	0.51	0.50	0.50	0.50	0.49	0.52	0.46	0.50	0.47	0.43	0.43	0.43	0.43	0.62	
Ca	0.02	0.47	0.41	0.64	0.58	0.63	0.64	0.62	0.64	0.64	0.62	0.64	0.59	0.63	0.61	0.56	0.57	0.56	0.56	0.87	
K	0.10	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Na	0.08	0.08	0.02	0.34	0.38	0.36	0.34	0.35	0.34	0.35	0.35	0.33	0.38	0.34	0.35	0.40	0.41	0.41	0.42	0.05	
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Total	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	
<b>% Mol miembros extremos</b>																					
Group	Quad	Quad	Quad	Ca-Na	Ca-Na	Ca-Na	Ca-Na	Ca-Na	Ca-Na	Ca-Na	Ca-Na	Ca-Na	Ca-Na	Ca-Na	Ca-Na	Ca-Na	Ca-Na	Ca-Na	Ca-Na	Quad	
En	20.06	21.53	32.05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	34.54	
Fs	78.80	51.47	41.23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16.64	
Wo	1.14	26.99	26.72	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	48.83	
Jd	-	-	-	32.03	38.85	32.36	31.04	34.78	31.87	31.79	34.19	31.41	38.67	33.09	36.11	35.01	33.77	33.96	32.95	-	
Aeg	-	-	-	2.71	0.00	3.87	3.59	0.43	3.28	3.56	1.48	2.50	0.00	1.62	0.00	5.47	8.29	8.57	9.71	-	
Quad	-	-	-	65.26	61.15	63.76	65.37	64.79	64.85	64.65	64.33	66.09	61.33	65.28	63.89	59.52	57.94	57.47	57.34	-	

O\* Oxigenos

Piax-27	Piax-27	Piax-27	Piax-27	Piax-27	Piax-27	Piax-27	Piax-27	Piax-27
219	220	221	222	223	227	228	229	224
Omp	Omp	Omp	Omp	Omp	Omp	Di	Wo	Aug
53.16	49.44	52.56	53.44	54.05	54.65	55.03	51.34	48.76
0.20	0.22	0.17	0.18	0.21	0.22	0.08	0.07	0.49
9.72	8.09	8.56	8.94	9.73	7.89	5.77	3.84	7.26
0.00	0.04	0.03	0.05	0.01	0.01	0.05	0.10	0.05
5.76	6.13	6.46	6.21	5.87	9.62	6.51	6.12	12.94
0.05	0.04	0.08	0.06	0.06	0.16	0.12	0.12	0.25
8.83	9.28	9.32	9.19	8.84	12.24	11.42	11.00	13.41
16.18	14.87	15.75	16.31	16.00	10.62	17.32	20.72	12.36
5.00	4.96	4.53	4.69	5.04	3.03	2.23	1.78	1.39
0.04	0.03	0.01	0.00	0.00	0.16	0.04	0.02	0.32
98.94	93.10	97.48	99.07	99.80	98.60	98.57	95.12	97.24
1.94	1.91	1.95	1.95	1.95	2.02	2.05	1.99	1.86
0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01
0.06	0.09	0.05	0.05	0.05	0.00	0.00	0.01	0.14
0.35	0.27	0.32	0.33	0.37	0.34	0.25	0.16	0.18
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.06	0.18	0.04	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00	0.05
0.12	0.02	0.16	0.15	0.15	0.30	0.20	0.20	0.36
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01
0.48	0.53	0.52	0.50	0.48	0.68	0.63	0.64	0.76
0.63	0.61	0.63	0.64	0.62	0.42	0.69	0.86	0.50
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02
0.35	0.37	0.33	0.33	0.35	0.22	0.16	0.13	0.10
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
Ca-Na	Ca-Na	Ca-Na	Ca-Na	Ca-Na	Ca-Na	Quad	Quad	Quad
-	-	-	-	-	-	41.40	37.43	45.15
-	-	-	-	-	-	13.48	11.91	24.94
-	-	-	-	-	-	45.11	50.66	29.92
31.46	23.48	29.51	30.48	34.00	23.78	-	-	-
5.03	15.41	3.87	3.53	2.13	0.00	-	-	-
63.50	61.11	66.61	65.99	63.88	76.22	-	-	-







lx-287	lx-287	lx-287	lx-287	lx-287	lx-287	lx-287	lx-287	lx-287	lx-287	lx-287	lx-287	lx-287	lx-287	lx-287	lx-287	lx-287	lx-287	lx-287	lx-287	lx-287	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	
c2-15	c2-16	c2-17	c3-1	c3-2	c3-3	c3-4	c3-5	c3-6	c3-7	c3-8	c3-9	c4-12	c4-13	c4-14	c4-15	c4-16	c4-17	c4-18	c4-19	c5-1	c2-1	c2-2	c2-4	c6-1	c6-2	c6-3	
Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	núcleo	núcleo	borde	borde	matriz	matriz	
Fe-Wnc	Fe-Wnc	Fe-Wnc	Wnc	Wnc	Wnc	Brs	Brs	Brs	Wnc	Brs	Brs	Brs	Brs	Brs	Brs	Brs	Brs	Brs	Brs	Brs	Wnc	Fe-Gln	Fe-Gln	Fe-Gln	Fe-Gln	Fe-Gln	Fe-Gln
56.82	56.74	56.32	53.42	52.48	53.20	50.71	50.45	50.61	52.57	51.33	51.12	50.70	50.90	50.99	51.12	50.80	51.20	50.54	50.50	56.14	55.04	55.15	54.68	55.52	55.60	55.52	
0.00	0.00	0.00	0.03	0.03	0.08	0.05	0.07	0.09	0.04	0.04	0.07	0.08	0.06	0.02	0.05	0.09	0.06	0.10	0.07	0.03	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
7.40	7.37	7.23	4.70	5.65	4.89	6.87	7.04	7.21	5.76	6.53	6.66	6.30	6.91	6.79	6.64	7.18	6.65	7.16	7.03	7.06	9.51	9.69	10.32	9.51	9.50	9.69	
0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
18.20	18.41	18.51	18.59	17.75	17.32	17.51	17.88	18.32	18.60	18.00	17.91	19.45	18.63	18.19	17.91	18.50	18.11	18.50	18.14	17.56	19.92	19.65	19.75	18.24	18.13	16.81	
0.09	0.10	0.06	0.19	0.25	0.27	0.22	0.23	0.27	0.26	0.23	0.25	0.27	0.26	0.25	0.27	0.22	0.23	0.24	0.28	0.13	0.21	0.13	0.17	0.15	0.11	0.13	
8.40	8.40	8.45	11.10	11.33	11.67	10.87	10.86	10.93	10.85	11.32	11.36	10.71	10.79	11.08	11.16	10.83	11.07	10.96	11.08	9.24	6.31	6.07	5.76	6.75	6.96	7.50	
0.83	0.89	0.86	5.25	6.80	6.74	7.60	7.57	7.56	6.84	7.31	7.46	7.32	7.21	7.52	7.36	7.49	7.49	7.86	7.86	1.39	0.43	0.37	0.63	0.50	0.49	0.61	
4.94	4.93	4.81	3.17	2.58	2.69	2.47	2.63	2.49	2.73	2.71	2.66	2.51	2.64	2.46	2.55	2.67	2.55	2.52	2.48	4.48	6.29	6.08	6.20	6.07	6.01	6.02	
0.02	0.02	0.03	0.08	0.13	0.09	0.21	0.21	0.21	0.13	0.15	0.16	0.19	0.20	0.19	0.16	0.19	0.18	0.19	0.20	0.04	0.01	0.03	0.04	0.02	0.02	0.02	
96.69	96.85	96.26	96.54	96.99	96.96	96.49	96.93	97.67	97.78	97.60	97.66	97.52	97.63	97.49	97.22	97.97	97.53	98.05	97.64	96.06	97.75	97.16	97.53	96.75	96.81	96.30	
8.10	8.09	8.09	7.82	7.66	7.75	7.45	7.39	7.37	7.63	7.45	7.42	7.43	7.42	7.43	7.46	7.37	7.45	7.34	7.36	8.08	7.89	7.95	7.86	7.98	7.98	7.97	
0.00	0.00	0.00	0.18	0.34	0.25	0.55	0.61	0.63	0.37	0.55	0.58	0.57	0.58	0.57	0.54	0.63	0.55	0.66	0.64	0.00	0.11	0.05	0.14	0.02	0.02	0.03	
8.10	8.09	8.09	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.08	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	
1.24	1.24	1.22	0.63	0.63	0.58	0.64	0.61	0.61	0.62	0.57	0.56	0.52	0.60	0.60	0.60	0.60	0.59	0.56	0.56	1.20	1.49	1.59	1.60	1.60	1.59	1.61	
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
0.29	0.28	0.27	0.26	0.25	0.24	0.33	0.42	0.40	0.29	0.42	0.43	0.43	0.40	0.38	0.37	0.43	0.38	0.45	0.44	0.17	0.21	0.09	0.16	0.07	0.06	0.05	
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
1.79	1.79	1.81	2.42	2.46	2.53	2.38	2.37	2.37	2.35	2.45	2.46	2.34	2.34	2.41	2.43	2.34	2.40	2.37	2.41	1.98	1.35	1.30	1.23	1.45	1.49	1.60	
1.68	1.70	1.70	1.68	1.66	1.64	1.63	1.60	1.61	1.74	1.55	1.54	1.71	1.64	1.62	1.59	1.61	1.62	1.60	1.59	1.65	1.94	2.01	2.01	1.89	1.86	1.73	
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
0.20	0.22	0.26	0.34	0.26	0.23	0.18	0.18	0.22	0.23	0.21	0.20	0.25	0.23	0.22	0.22	0.20	0.21	0.19	0.18	0.30	0.23	0.26	0.21	0.24	0.26	0.23	
0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	
0.13	0.14	0.13	0.82	1.06	1.05	1.20	1.19	1.18	1.06	1.14	1.16	1.15	1.13	1.17	1.15	1.17	1.17	1.22	1.23	0.21	0.07	0.06	0.10	0.08	0.07	0.09	
1.37	1.36	1.34	0.82	0.65	0.68	0.59	0.61	0.57	0.67	0.62	0.61	0.57	0.61	0.57	0.60	0.61	0.59	0.56	0.55	1.25	1.68	1.67	1.67	1.67	1.65	1.66	
1.70	1.73	1.74	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	1.77	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	
0.00	0.00	0.00	0.08	0.08	0.08	0.11	0.14	0.13	0.10	0.14	0.14	0.13	0.12	0.12	0.12	0.14	0.12	0.15	0.15	0.00	0.07	0.03	0.05	0.02	0.02	0.02	
0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.04	0.04	0.04	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	
0.00	0.00	0.00	0.10	0.11	0.10	0.15	0.18	0.17	0.12	0.17	0.17	0.18	0.17	0.16	0.15	0.18	0.16	0.19	0.18	0.01	0.07	0.04	0.06	0.02	0.02	0.02	
14.81	14.83	14.83	15.10	15.11	15.10	15.15	15.18	15.17	15.12	15.17	15.17	15.18	15.17	15.16	15.15	15.18	15.16	15.19	15.18	14.86	15.07	15.04	15.06	15.02	15.02	15.02	
0.49	0.48	0.48	0.55	0.56	0.58	0.57	0.57	0.56	0.54	0.58	0.59	0.54	0.56	0.57	0.57	0.56	0.57	0.57	0.58	0.51	0.38	0.36	0.36	0.40	0.41	0.45	
0.81	0.82	0.82	0.76	0.80	0.78	0.78	0.74	0.75	0.77	0.73	0.72	0.72	0.75	0.76	0.75	0.74	0.75	0.73	0.73	0.87	0.88	0.95	0.92	0.96	0.97	0.97	
NaCa	NaCa	NaCa	NaCa	NaCa	NaCa	NaCa	NaCa	NaCa	NaCa	NaCa	NaCa	NaCa	NaCa	NaCa	NaCa	NaCa	NaCa	NaCa	NaCa	NaCa	Na	Na	Na	Na	Na	Na	Na

lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	
c6-4	c6-5	c6-6	c6-7	c6-8	c6-9	c6-10	c6-11	c6-12	c6-13	c6-14	c6-15	c6-16	c6-17	c6-18	c6-19	c6-20	c7-7	c7-8	c7-9	c7-10	c7-11	c7-12	c7-13	
Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	
borde	borde	borde	borde	borde	borde	borde	núcleo	núcleo	núcleo	núcleo	núcleo	núcleo	núcleo	núcleo	núcleo	inclusión	inclusión	inclusión	inclusión					
Fe-Gln	Fe-Gln	Fe-Gln	Fe-Gln	Fe-Gln	Fe-Gln	Fe-Gln	Fe-Wnc	Fe-Wnc	Fe-Gln	Fe-Gln	Fe-Gln	Fe-Gln	Fe-Gln	Fe-Gln	Fe-Gln	Fe-Gln	Fe-Gln	Fe-Gln	Fe-Wnc	Fe-Wnc	Fe-Gln	Fe-Gln	Fe-Gln	Fe-Wnc
55.58	55.48	55.16	55.25	55.21	55.15	55.14	54.24	54.30	55.83	55.42	56.01	55.85	55.87	55.56	55.84	54.78	53.29	52.37	53.58	53.92	54.39	53.56	52.23	
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.06	0.07	0.05	0.03	0.00	0.05	0.01	
9.35	8.55	8.82	8.66	8.85	9.51	9.06	9.16	9.31	8.96	8.24	9.16	8.93	8.67	8.37	8.56	9.62	9.14	9.20	9.18	9.54	9.44	9.59	9.94	
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
17.24	17.85	17.65	17.86	17.39	19.31	17.69	19.91	20.04	17.42	18.16	17.24	16.98	17.45	17.60	17.27	18.89	19.71	21.17	20.92	20.17	19.13	20.60	21.14	
0.16	0.14	0.26	0.17	0.16	0.16	0.11	0.18	0.15	0.13	0.17	0.17	0.10	0.19	0.14	0.16	0.21	0.23	0.24	0.24	0.21	0.21	0.20	0.26	
7.50	7.72	7.71	7.68	7.45	6.24	7.59	6.46	6.49	7.70	7.81	7.60	7.65	7.80	7.87	7.80	6.53	6.21	6.85	6.27	6.31	6.80	6.19	6.11	
0.52	0.54	0.60	0.68	0.36	0.64	0.69	1.07	1.09	0.48	0.61	0.46	0.40	0.60	0.50	0.49	0.97	1.51	1.81	1.48	1.20	1.03	1.43	2.07	
5.92	6.04	6.17	5.99	6.04	5.95	5.88	5.81	5.37	6.15	5.94	6.22	6.21	5.89	6.15	5.83	5.91	5.78	5.71	5.63	5.89	5.70	5.73	5.81	
0.01	0.00	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.05	0.05	0.07	0.03	0.05	0.04	0.07	0.07	
96.29	96.32	96.39	96.31	95.46	96.98	96.17	96.88	96.81	96.69	96.38	96.88	96.14	96.50	96.21	95.97	96.97	95.98	97.51	97.37	97.31	96.72	97.41	97.64	
7.99	7.99	7.94	7.97	8.00	7.96	7.96	7.87	7.89	7.99	7.99	7.99	8.01	8.01	7.99	8.03	7.90	7.81	7.61	7.78	7.79	7.87	7.76	7.59	
0.01	0.01	0.06	0.03	0.00	0.04	0.04	0.13	0.11	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.10	0.19	0.39	0.22	0.21	0.13	0.24	0.41	
8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.01	8.01	8.00	8.03	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
1.58	1.44	1.44	1.44	1.51	1.57	1.50	1.43	1.48	1.50	1.39	1.53	1.51	1.46	1.41	1.45	1.53	1.39	1.18	1.35	1.42	1.48	1.39	1.29	
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	
0.05	0.21	0.20	0.16	0.18	0.08	0.11	0.20	0.08	0.17	0.23	0.16	0.22	0.18	0.27	0.22	0.13	0.25	0.45	0.27	0.25	0.14	0.26	0.39	
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
1.61	1.66	1.66	1.65	1.61	1.34	1.63	1.40	1.41	1.64	1.68	1.62	1.63	1.67	1.69	1.67	1.40	1.36	1.48	1.36	1.36	1.47	1.34	1.32	
1.76	1.70	1.70	1.75	1.70	2.01	1.76	1.97	2.03	1.69	1.71	1.69	1.63	1.69	1.63	1.66	1.94	1.99	1.87	2.02	1.96	1.91	2.00	1.99	
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
0.26	0.24	0.22	0.25	0.23	0.24	0.27	0.24	0.32	0.23	0.25	0.20	0.18	0.22	0.21	0.20	0.21	0.17	0.25	0.25	0.22	0.26	0.23	0.18	
0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	
0.08	0.08	0.09	0.11	0.06	0.10	0.11	0.17	0.17	0.07	0.09	0.07	0.06	0.09	0.08	0.08	0.15	0.24	0.28	0.23	0.19	0.16	0.22	0.32	
1.64	1.66	1.66	1.62	1.70	1.64	1.61	1.57	1.49	1.68	1.63	1.70	1.73	1.64	1.70	1.63	1.61	1.56	1.44	1.50	1.57	1.55	1.52	1.46	
2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	1.98	1.98	2.00	1.92	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	
0.01	0.03	0.07	0.05	0.00	0.03	0.04	0.06	0.03	0.02	0.03	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00	0.04	0.08	0.17	0.09	0.08	0.05	0.09	0.17	
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	
0.01	0.03	0.07	0.05	0.00	0.03	0.04	0.07	0.03	0.03	0.03	0.02	0.01	0.00	0.02	0.00	0.05	0.09	0.18	0.09	0.09	0.05	0.10	0.19	
15.01	15.03	15.07	15.05	15.00	15.03	15.04	15.07	15.03	15.03	15.03	15.02	14.99	14.99	15.02	14.95	15.05	15.09	15.18	15.09	15.09	15.05	15.10	15.19	
0.44	0.46	0.46	0.45	0.46	0.37	0.45	0.39	0.37	0.46	0.46	0.46	0.47	0.47	0.48	0.47	0.39	0.39	0.41	0.37	0.38	0.40	0.37	0.38	
0.97	0.87	0.88	0.90	0.89	0.95	0.94	0.89	0.95	0.90	0.86	0.90	0.87	0.89	0.84	0.87	0.93	0.86	0.78	0.85	0.87	0.92	0.86	0.81	
Na	Na	Na	Na	Na	Na	Na	Na	NaCa	Na	Na	Na	Na	Na	Na	Na	Na	Na	NaCa	NaCa	Na	Na	Na	NaCa	





Piax-13	Piax-13	Piax-13	Piax-13	Piax-13	Piax-13	Piax-13	Piax-13	Piax-13	Piax-15	Piax-15	Piax-15	Piax-15	Piax-Z1	Piax-Z1	Piax-Z1	Piax-Z1	Piax-Z1	Piax-Z1	Piax-Z1	Piax-Z1	Piax-Z1	Piax-Z1	Piax-Z3
117	118	119	149	150	151	152	154	162	116	120	121	122	326	324	329	339	346	349	350	351	352	353	285
Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp
Prg	Prg	Prg	Prg	Ts	Prg	Prg	Prg	Ed	Fe-Ts	Act	Wnc	Hbl	Fe-Ed	Fe-Ed	Prg	Wnc	Prg	Brs	Brs	Brs	Brs	Brs	Prg
43.65	43.05	43.25	44.05	41.76	43.57	43.66	43.36	51.68	42.37	53.45	53.87	50.29	43.30	43.54	42.10	53.51	41.90	47.71	48.37	48.68	49.28	48.77	44.13
0.88	0.78	0.70	0.91	0.63	0.79	0.90	0.98	0.15	0.08	0.21	0.10	0.18	0.16	0.05	0.44	0.40	0.90	0.56	0.30	0.35	0.35	0.36	0.77
15.20	15.03	15.46	14.27	12.91	14.69	14.58	14.46	5.49	13.08	5.10	8.50	5.66	11.57	11.96	14.10	15.66	13.97	11.81	9.88	10.18	10.14	10.71	14.74
0.05	0.04	0.00	0.07	0.04	0.09	0.05	0.03	0.02	0.03	0.00	0.01	0.04	0.05	0.00	0.02	0.12	0.04	0.00	0.00	0.02	0.05	0.00	0.03
12.37	11.91	12.77	11.71	15.29	12.44	12.14	12.06	8.64	25.03	12.45	12.46	13.01	19.19	20.03	17.38	8.66	15.94	12.50	13.34	12.69	11.88	13.17	11.33
0.06	0.00	0.10	0.04	0.05	0.06	0.00	0.05	0.09	0.33	0.14	0.14	0.15	0.16	0.10	0.07	0.00	0.07	0.02	0.06	0.03	0.04	0.02	0.05
10.49	10.73	10.33	11.49	13.08	10.87	11.03	11.06	10.71	5.43	14.37	9.31	14.26	8.28	8.07	9.14	4.95	9.70	11.72	12.34	12.34	12.26	11.83	11.51
9.62	9.37	9.61	9.60	7.06	9.62	9.68	9.67	15.32	10.82	12.05	8.81	11.99	11.41	11.25	10.11	6.72	11.57	8.55	8.85	8.28	7.84	8.33	9.77
3.38	3.27	3.26	3.43	1.76	3.35	3.15	3.29	1.95	0.67	1.53	2.68	1.26	2.14	2.20	3.06	6.75	2.54	3.40	2.82	3.30	3.81	3.23	3.37
1.00	0.95	0.98	0.98	0.80	1.17	1.15	1.17	0.19	0.46	0.10	0.11	0.11	0.19	0.17	0.24	0.14	0.21	0.49	0.32	0.34	0.43	0.48	1.02
96.70	95.14	96.45	96.55	93.37	96.65	96.34	96.13	94.26	98.30	99.39	95.99	96.96	96.43	97.37	96.68	96.91	96.85	96.76	96.28	96.21	96.08	96.91	96.71
6.44	6.42	6.40	6.48	6.33	6.44	6.45	6.43	7.95	6.39	7.57	7.85	7.33	6.60	6.58	6.32	7.75	6.29	6.92	7.05	7.08	7.16	7.06	6.47
1.56	1.58	1.60	1.52	1.67	1.56	1.55	1.57	0.05	1.61	0.43	0.15	0.67	1.40	1.42	1.68	0.25	1.71	1.08	0.95	0.92	0.84	0.94	1.53
8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
1.08	1.07	1.09	0.96	0.63	0.99	0.99	0.96	0.95	0.72	0.43	1.31	0.31	0.68	0.71	0.82	2.43	0.76	0.94	0.75	0.82	0.90	0.88	1.02
0.10	0.09	0.08	0.10	0.07	0.09	0.10	0.11	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.05	0.04	0.10	0.06	0.03	0.04	0.04	0.04	0.08
0.06	0.13	0.13	0.11	0.71	0.10	0.10	0.09	0.00	0.78	0.00	0.00	0.12	0.18	0.25	0.36	0.00	0.16	0.20	0.33	0.29	0.17	0.26	0.07
0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00
2.31	2.39	2.28	2.52	2.95	2.39	2.43	2.45	2.46	1.22	3.04	2.02	3.10	1.88	1.82	2.05	1.07	2.17	2.53	2.68	2.67	2.66	2.55	2.52
1.45	1.32	1.43	1.31	0.62	1.41	1.37	1.39	1.11	2.27	1.47	1.52	1.45	2.24	2.22	1.72	1.05	1.81	1.27	1.21	1.18	1.24	1.27	1.30
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	4.55	5.00	4.98	4.87	5.00	5.00	5.00	5.00	4.60	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.01	0.04	0.02	0.03	0.60	0.02	0.03	0.02	0.00	0.11	0.00	0.00	0.02	0.03	0.06	0.10	0.00	0.04	0.05	0.09	0.08	0.04	0.07	0.01
0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.04	0.00	0.00	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01
1.52	1.50	1.52	1.51	1.15	1.52	1.53	1.54	2.52	1.75	1.83	1.37	1.87	1.86	1.82	1.63	1.04	1.86	1.33	1.38	1.29	1.22	1.29	1.53
0.46	0.47	0.44	0.46	0.25	0.45	0.44	0.44	0.00	0.10	0.17	0.63	0.09	0.09	0.11	0.27	0.96	0.10	0.61	0.52	0.63	0.73	0.64	0.44
2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.52	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
0.50	0.48	0.49	0.52	0.27	0.51	0.47	0.51	0.58	0.10	0.25	0.13	0.27	0.55	0.53	0.62	0.94	0.64	0.34	0.27	0.30	0.34	0.27	0.51
0.19	0.18	0.18	0.18	0.15	0.22	0.22	0.22	0.04	0.09	0.02	0.02	0.02	0.04	0.03	0.05	0.03	0.04	0.09	0.06	0.06	0.08	0.09	0.19
0.69	0.66	0.68	0.70	0.42	0.73	0.68	0.73	0.62	0.19	0.27	0.15	0.29	0.58	0.57	0.67	0.97	0.68	0.43	0.33	0.36	0.42	0.36	0.70
15.69	15.66	15.68	15.70	15.42	15.73	15.68	15.73	15.70	15.19	15.24	15.03	15.29	15.58	15.57	15.67	15.57	15.68	15.43	15.33	15.36	15.42	15.36	15.70
0.61	0.64	0.61	0.65	0.71	0.63	0.63	0.63	0.69	0.34	0.67	0.57	0.68	0.45	0.44	0.53	0.50	0.54	0.66	0.67	0.68	0.68	0.66	0.66
0.98	0.95	0.96	0.96	0.76	0.96	0.96	0.97	1.00	0.75	1.00	1.00	0.89	0.92	0.90	0.87	1.00	0.94	0.91	0.84	0.86	0.91	0.88	0.97
Ca	Ca	Ca	Ca	Ca	Ca	Ca	Ca	Ca	Ca	Ca	NaCa	Ca	Ca	Ca	Ca	NaCa	Ca	NaCa	NaCa	NaCa	NaCa	NaCa	Ca

Piax-Z3	Piax-Z3	Piax-Z3	Piax-Z3	Piax-Z3	Piax-Z3	Piax-Z3	MIM-Z2	MIM-Z2	MIM-Z2	MIM-Z2	MIM-Z2	MIM-Z2	MIM-Z2	MIM-Z2	MIM-Z2	MIM-Z2	MIM-Z2	MIM-Z2	MIM-Z2	MIM-Z2	MIM-Z8	MIM-Z8	MIM-Z8	
286	287	296	297	304	305	308	138	139	140	141	143	144	145	146	147	148	149	150	151	155	224	225	226	
Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	
Prg	Prg	Prg	Prg	Prg	Prg	Fe-Prg	Gln	Gln	Gln	Gln	Gln	Gln	Gln	Gln	Gln	Gln	Gln	Gln	Gln	Gln	Wnc	Fe-Gln	Fe-Gln	Fe-Gln
44.38	43.95	43.32	43.47	43.75	43.47	41.36	56.25	55.28	54.99	55.84	56.42	55.75	55.13	55.83	55.81	56.39	55.97	55.29	55.64	51.38	55.10	55.14	55.70	
0.95	0.84	0.83	0.80	0.83	0.83	0.15	0.04	0.06	0.03	0.02	0.00	0.02	0.05	0.06	0.03	0.01	0.05	0.07	0.00	0.03	0.06	0.04	0.01	
14.57	15.10	14.78	14.73	14.35	14.78	16.47	10.29	10.98	10.29	10.09	10.72	10.03	11.55	10.13	7.85	9.75	10.35	10.64	7.72	9.84	9.78	7.23	8.57	
0.05	0.00	0.06	0.02	0.00	0.07	0.02	0.03	0.03	0.05	0.04	0.03	0.00	0.03	0.02	0.03	0.03	0.09	0.05	0.02	0.04	0.04	0.01	0.01	
11.36	11.40	11.84	11.79	11.38	12.07	15.70	13.08	12.91	13.18	13.45	12.76	13.95	12.25	13.69	15.74	14.17	13.16	13.46	16.10	15.65	16.85	18.84	17.44	
0.04	0.07	0.07	0.08	0.03	0.01	0.11	0.06	0.07	0.08	0.08	0.08	0.07	0.03	0.10	0.10	0.08	0.06	0.05	0.11	0.13	0.10	0.07	0.02	
11.51	11.37	10.96	10.76	11.31	10.99	8.24	8.58	8.60	8.47	8.39	8.56	8.54	8.47	8.24	8.89	8.46	8.53	8.67	8.72	9.52	6.92	7.39	7.16	
9.63	9.69	9.90	9.74	9.96	9.89	11.44	0.34	0.96	0.88	0.30	0.23	0.64	0.94	0.68	0.87	0.55	0.58	1.13	0.69	0.75	0.76	0.82	0.37	
3.33	3.35	3.36	3.28	3.25	3.36	2.67	6.91	6.66	6.53	6.94	6.86	6.72	6.60	6.61	6.70	6.75	6.80	6.43	6.03	5.66	6.29	6.17	6.30	
0.92	1.10	1.10	1.11	1.10	1.04	0.50	0.02	0.04	0.05	0.00	0.01	0.03	0.02	0.01	0.04	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	
96.73	96.87	96.21	95.77	95.97	96.52	96.66	95.60	95.59	94.56	95.15	95.68	95.74	95.08	95.36	96.07	96.21	95.61	95.82	95.05	93.02	95.92	95.75	95.61	
6.50	6.44	6.43	6.47	6.49	6.43	6.23	7.98	7.86	7.92	7.97	7.99	7.94	7.85	7.98	7.97	7.99	7.95	7.86	8.02	7.62	7.95	8.00	8.03	
1.50	1.56	1.57	1.53	1.51	1.57	1.77	0.02	0.14	0.08	0.03	0.01	0.06	0.15	0.02	0.03	0.01	0.05	0.14	0.00	0.38	0.05	0.00	0.00	
8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.02	8.00	8.00	8.00	8.03	
1.01	1.04	1.01	1.05	1.00	1.00	1.15	1.70	1.69	1.66	1.67	1.77	1.62	1.79	1.68	1.29	1.61	1.69	1.64	1.31	1.33	1.61	1.24	1.46	
0.10	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	
0.09	0.09	0.03	0.02	0.01	0.06	0.02	0.13	0.16	0.13	0.17	0.07	0.17	0.09	0.09	0.46	0.19	0.13	0.15	0.41	0.37	0.11	0.48	0.35	
0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
2.51	2.48	2.42	2.39	2.50	2.42	1.85	1.81	1.82	1.82	1.79	1.81	1.81	1.80	1.76	1.89	1.79	1.81	1.84	1.87	2.10	1.49	1.60	1.54	
1.28	1.30	1.43	1.44	1.40	1.42	1.96	1.34	1.32	1.38	1.37	1.34	1.39	1.30	1.46	1.36	1.41	1.36	1.36	1.40	1.19	1.78	1.67	1.66	
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.08	0.06	0.08	0.07	0.10	0.10	0.06	0.08	0.06	0.08	0.07	0.10	0.13	0.39	0.14	0.13	0.10	
0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	
1.51	1.52	1.57	1.55	1.58	1.57	1.84	0.05	0.15	0.14	0.05	0.03	0.10	0.14	0.10	0.13	0.08	0.09	0.17	0.11	0.12	0.12	0.13	0.06	
0.46	0.46	0.42	0.44	0.41	0.42	0.15	1.87	1.78	1.78	1.87	1.86	1.80	1.79	1.80	1.79	1.83	1.83	1.73	1.68	1.48	1.72	1.74	1.76	
2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	1.93	2.00	2.00	2.00	1.92	
0.48	0.50	0.55	0.51	0.52	0.55	0.63	0.04	0.05	0.04	0.05	0.02	0.06	0.03	0.03	0.06	0.03	0.04	0.05	0.00	0.15	0.04	0.00	0.00	
0.17	0.21	0.21	0.21	0.21	0.20	0.10	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	
0.65	0.70	0.76	0.72	0.73	0.74	0.72	0.04	0.06	0.05	0.05	0.03	0.06	0.03	0.03	0.07	0.03	0.05	0.05	0.00	0.15	0.04	0.01	0.00	
15.65	15.70	15.76	15.72	15.73	15.74	15.72	15.04	15.06	15.05	15.05	15.03	15.06	15.03	15.03	15.07	15.03	15.05	15.05	14.96	15.15	15.04	15.00	14.95	
0.66	0.65	0.63	0.62	0.64	0.63	0.49	0.56	0.57	0.56	0.55	0.56	0.55	0.57	0.53	0.57	0.55	0.56	0.56	0.55	0.57	0.44	0.47	0.47	
0.96	0.97	0.99	0.99	0.99	0.98	0.99	0.93	0.92	0.93	0.91	0.96	0.91	0.95	0.95	0.74	0.89	0.93	0.92	0.76	0.82	0.94	0.72	0.81	
Ca	Ca	Ca	Ca	Ca	Ca	Ca	Na	Na	Na	Na	Na	Na	Na	Na	Na	Na	Na	Na	Na	NaCa	Na	Na	Na	

MIM-Z8	MIM-Z8	MIM-Z8	MIM-Z8	MIM-Z8	MIM-Z8	MIM-Z8	MIM-Z8	MIM-Z8	MIM-Z8	MIM-Z8	MIM-Z8	MIM-Z8	MIM-Z8	MIM-Z8	MIM-Z8	MIM-Z10	MIM-Z10	MIM-Z10	MIM-Z10	MIM-Z10	MIM-Z10
227	228	229	232	247	249	251	253	254	255	256	257	258	259	260	268	168	174	178	179	180	198
Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp
Fe-Gln	Fe-Gln	Fe-Gln	Fe-Brs	Fe-Gln	Fe-Brs	Fe-Gln	Gln	Fe-Gln	Fe-Gln	Gln	Fe-Gln	Fe-Brs	Fe-Brs	Fe-Brs	Fe-Brs	Gln	Gln	Gln	Gln	Gln	Gln
54.50	55.74	53.23	47.01	56.08	46.70	55.59	55.61	55.64	55.29	56.17	55.54	44.85	44.27	45.49	44.45	55.95	55.05	55.51	57.83	55.35	55.72
0.08	0.05	0.12	0.17	0.00	0.18	0.00	0.05	0.02	0.04	0.04	0.04	0.27	0.25	0.27	0.58	0.01	0.03	0.00	0.03	0.05	0.06
9.33	8.63	9.28	8.62	8.64	8.33	8.56	7.66	8.49	9.58	7.77	8.34	10.75	10.28	9.91	9.59	10.04	9.23	9.30	10.38	10.35	10.11
0.12	0.03	0.09	0.05	0.02	0.00	0.02	0.13	0.12	0.02	0.05	0.03	0.05	0.10	0.02	0.10	0.04	0.01	0.02	0.02	0.01	0.03
17.35	17.65	18.31	21.69	17.32	21.24	17.55	17.30	17.91	17.03	16.64	17.56	21.62	22.71	21.12	22.92	13.37	14.78	13.94	13.54	12.89	12.96
0.04	0.05	0.06	0.13	0.06	0.13	0.04	0.04	0.06	0.07	0.01	0.05	0.16	0.13	0.13	0.11	0.05	0.11	0.08	0.08	0.05	0.10
7.14	7.07	6.88	7.63	7.26	7.71	7.08	8.21	6.94	7.07	8.65	7.21	6.43	6.58	7.26	6.41	8.78	8.90	8.71	8.81	8.82	8.58
0.96	0.32	1.59	7.05	0.27	7.31	0.31	0.31	0.69	0.67	0.23	0.30	6.98	7.43	7.56	7.66	0.71	1.30	0.34	1.14	0.96	0.53
6.19	6.31	5.97	3.87	6.10	3.63	6.20	6.39	6.26	6.32	6.32	6.34	4.24	4.03	3.78	3.78	6.64	6.19	6.48	6.17	6.57	6.69
0.03	0.00	0.11	0.30	0.01	0.30	0.00	0.00	0.04	0.03	0.01	0.00	0.37	0.42	0.37	0.40	0.03	0.03	0.03	0.05	0.02	0.00
95.73	95.85	95.62	96.52	95.77	95.54	95.36	95.70	96.17	96.12	95.88	95.40	95.73	96.18	95.90	96.01	95.61	95.63	94.41	98.05	95.06	94.79
7.90	8.02	7.78	7.10	8.05	7.13	8.04	8.00	8.01	7.96	8.02	8.03	6.87	6.80	6.94	6.85	7.96	7.90	8.00	8.02	7.91	7.98
0.10	0.00	0.22	0.90	0.00	0.87	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	1.13	1.20	1.06	1.15	0.04	0.10	0.00	0.00	0.09	0.02
8.00	8.02	8.00	8.00	8.05	8.00	8.04	8.00	8.01	8.00	8.02	8.03	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.02	8.00	8.00
1.50	1.46	1.38	0.64	1.46	0.62	1.46	1.30	1.44	1.59	1.31	1.42	0.82	0.66	0.72	0.60	1.64	1.46	1.58	1.70	1.65	1.69
0.01	0.01	0.01	0.02	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.03	0.03	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
0.18	0.33	0.28	0.47	0.32	0.44	0.34	0.46	0.30	0.12	0.47	0.39	0.39	0.47	0.39	0.42	0.13	0.22	0.22	0.00	0.15	0.10
0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.54	1.52	1.50	1.72	1.55	1.75	1.52	1.76	1.49	1.52	1.84	1.55	1.47	1.51	1.65	1.47	1.86	1.90	1.87	1.82	1.88	1.83
1.75	1.68	1.81	2.15	1.66	2.16	1.68	1.46	1.75	1.77	1.37	1.63	2.29	2.32	2.20	2.43	1.36	1.42	1.33	1.48	1.32	1.37
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.17	0.11	0.15	0.12	0.10	0.11	0.11	0.16	0.10	0.16	0.15	0.10	0.09	0.12	0.10	0.11	0.10	0.14	0.13	0.10	0.08	0.08
0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
0.15	0.05	0.25	1.14	0.04	1.19	0.05	0.05	0.11	0.10	0.03	0.05	1.15	1.22	1.23	1.27	0.11	0.20	0.05	0.17	0.15	0.08
1.68	1.76	1.60	0.72	1.70	0.68	1.74	1.78	1.75	1.73	1.75	1.77	0.74	0.64	0.65	0.61	1.79	1.65	1.81	1.66	1.77	1.82
2.00	1.93	2.00	2.00	1.85	2.00	1.90	2.00	1.96	2.00	1.93	1.93	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	1.93	2.00	2.00
0.06	0.00	0.09	0.41	0.00	0.39	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.52	0.56	0.46	0.52	0.04	0.07	0.00	0.00	0.05	0.03
0.00	0.00	0.02	0.06	0.00	0.06	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.07	0.08	0.07	0.08	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
0.07	0.00	0.11	0.47	0.00	0.45	0.00	0.00	0.01	0.04	0.00	0.00	0.59	0.64	0.54	0.59	0.05	0.08	0.01	0.01	0.05	0.03
15.07	14.96	15.11	15.47	14.90	15.45	14.93	15.00	14.98	15.04	14.96	14.95	15.59	15.64	15.54	15.59	15.05	15.08	15.01	14.97	15.05	15.03
0.45	0.46	0.43	0.43	0.47	0.44	0.46	0.52	0.45	0.44	0.55	0.47	0.38	0.38	0.42	0.37	0.56	0.55	0.56	0.54	0.57	0.56
0.90	0.82	0.85	0.76	0.82	0.77	0.81	0.74	0.83	0.93	0.74	0.79	0.83	0.80	0.82	0.81	0.93	0.88	0.88	1.00	0.92	0.94
Na	Na	Na	NaCa	Na	NaCa	Na	Na	Na	Na	Na	Na	NaCa	NaCa	NaCa	NaCa	Na	Na	Na	Na	Na	Na



Tabla B.4: Análisis de microsonda para Feldespatos (%mol).

Muestra	PiAx-15	PiAx-Z1	PiAx-Z1	PiAx-Z1	PiAx-Z1	PiAx-Z3	PiAx-Z3	PiAx-Z3	PiAx-13	PiAx-13	PiAx-13	PiAx-13	PiAx-27	PiAx-27
No. Análisis	119	336	337	340	341	312	313	317	139	143	145	147	225	226
	PI	PI	PI	PI	PI	PI	PI	PI	PI	PI	PI	PI	PI	PI
	Ab	Or	Ab	Ab	Ab	Ab	Ab	Ab	Ab	Or	Ab	Ab	Ab	Ab
SiO <sub>2</sub>	66.52	63.63	67.83	67.41	66.69	66.48	66.55	65.55	69.74	64.74	66.67	66.15	65.27	65.54
TiO <sub>2</sub>	0.04	0.02	0.00	0.05	0.05	0.04	0.02	0.00	0.01	0.06	0.01	0.07	0.03	0.72
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.32	18.48	19.15	19.69	19.74	20.31	20.22	20.76	19.80	17.79	20.19	20.14	20.66	19.31
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.05	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.03
FeO	0.99	0.47	0.25	0.24	0.30	0.02	0.12	0.40	0.45	0.44	0.34	1.13	0.40	0.29
MnO	0.00	0.02	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00
MgO	1.07	0.00	0.00	0.05	0.05	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.19	0.35	0.20
CaO	1.69	0.04	0.29	0.88	1.05	1.42	1.41	1.97	0.08	0.10	1.47	1.52	2.23	1.40
Na <sub>2</sub> O	10.76	0.24	11.67	11.46	11.54	10.83	11.08	10.57	11.59	0.26	10.81	10.63	10.09	10.70
K <sub>2</sub> O	0.05	16.61	0.04	0.01	0.00	0.02	0.02	0.05	0.11	16.71	0.03	0.08	0.02	0.03
Total	99.45	99.57	99.29	99.82	99.42	99.12	99.45	99.34	101.80	100.15	99.53	99.92	99.04	98.21

Número de Iones con base en :

8 O\*

Si	2.79	2.80	2.82	2.79	2.78	2.78	2.77	2.75	2.82	2.83	2.78	2.76	2.75	2.78
Al	0.91	0.96	0.94	0.96	0.97	1.00	0.99	1.03	0.94	0.92	0.99	0.99	1.03	0.96
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
Fe <sup>3+</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01
Fe <sup>2+</sup>	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.01	0.04	0.01	0.00
Ca	0.08	0.00	0.01	0.04	0.05	0.06	0.06	0.09	0.00	0.00	0.07	0.07	0.10	0.06
Na	0.88	0.02	0.94	0.92	0.93	0.88	0.90	0.86	0.91	0.02	0.87	0.86	0.82	0.88
K	0.00	0.93	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.93	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	4.75	4.72	4.72	4.73	4.74	4.72	4.73	4.74	4.70	4.72	4.72	4.74	4.74	4.72

% Mol miembros extremos

Ab	91.74	2.17	98.41	95.85	95.20	93.14	93.29	90.40	98.98	2.30	92.88	92.25	88.97	93.11
An	7.98	0.21	1.35	4.09	4.80	6.74	6.57	9.31	0.39	0.47	6.97	7.28	10.89	6.73
Or	0.28	97.63	0.25	0.06	0.00	0.12	0.13	0.29	0.63	97.22	0.15	0.48	0.14	0.17

O\* Oxigenos

MIM-Z8	MIM-Z8	MIM-Z10	MIM-Z10	MIM-Z10
234	235	189	214	215
PI	PI	PI	PI	PI
Ab	Ab	Ab	Ab	Ab
68.48	68.17	67.87	68.31	68.36
0.04	0.00	0.01	0.08	0.05
19.34	19.29	18.90	18.99	18.76
0.00	0.01	0.00	0.01	0.01
0.28	0.23	0.30	0.27	0.23
0.01	0.00	0.02	0.02	0.04
0.00	0.01	0.00	0.01	0.00
0.10	0.06	0.08	0.11	0.02
11.96	11.74	11.72	11.89	11.77
0.02	0.01	0.01	0.01	0.05
100.22	99.52	98.91	99.69	99.27

2.81	2.82	2.82	2.82	2.83
0.94	0.94	0.93	0.92	0.92
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.95	0.94	0.95	0.95	0.95
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.72	4.71	4.71	4.71	4.71

99.45	99.70	99.54	99.44	99.62
0.46	0.27	0.38	0.49	0.11
0.09	0.04	0.07	0.07	0.27

Tabla B.5: Análisis de microsonda para Epidotas (%mol).

Muestra	Piax-13	Piax-13	Piax-13	Piax-13	Piax-15	Piax-15	Piax-15	MIM-Z2	MIM-Z2	MIM-Z2	MIM-Z2	MIM-Z2
No. Análisis	105	107	109	111	107	113	82	159	160	161	162	163
	Ep	Ep	Ep	Ep	Ep	Ep	Ep	Ep	Ep	Ep	Ep	Ep
	Czo	Czo	Czo	Czo	Zo	Zo	Zo	Zo	Zo	Zo	Zo	Zo
SiO <sub>2</sub>	38.21	38.37	38.41	38.56	31.16	37.83	33.45	37.16	37.54	36.76	36.90	37.34
TiO <sub>2</sub>	0.16	0.19	0.20	0.04	0.40	0.07	0.20	0.06	0.04	0.08	0.09	0.16
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	28.82	29.14	28.97	29.26	20.67	18.51	21.84	24.55	24.68	21.68	21.95	25.28
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13	0.00	0.11	0.17	0.15
FeO	6.32	5.96	5.90	6.04	30.65	21.70	8.08	11.25	11.27	14.84	14.26	10.82
MnO	0.05	0.06	0.00	0.04	0.54	0.18	0.08	0.22	0.11	0.11	0.13	0.31
MgO	0.04	0.08	0.04	0.04	5.39	4.16	0.39	0.06	0.05	0.00	0.03	0.10
CaO	22.72	22.89	23.24	22.72	5.58	11.20	16.91	22.94	23.56	23.24	23.07	23.48
Na <sub>2</sub> O	0.15	0.05	0.05	0.14	0.02	2.14	0.05	0.00	0.16	0.00	0.11	0.12
K <sub>2</sub> O	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.77	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00
Total	96.48	96.76	96.82	96.84	94.41	96.55	81.01	96.36	97.42	96.82	96.72	97.77

Número de Iones con base en :

12.5 O\*

Si	2.86	2.86	2.87	2.87	2.56	3.02	3.10	2.96	2.96	2.95	2.96	2.94
Ti	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01
Al	2.55	2.56	2.55	2.57	2.00	1.74	2.39	2.31	2.29	2.05	2.08	2.34
Fe <sup>3+</sup>	0.40	0.37	0.37	0.38	2.10	1.45	0.63	0.75	0.74	1.00	0.96	0.71
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
Mg	0.00	0.01	0.00	0.00	0.66	0.49	0.05	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01
Ca	1.82	1.83	1.86	1.81	0.49	0.96	1.68	1.96	1.99	2.00	1.99	1.98
Na	0.02	0.01	0.01	0.02	0.00	0.33	0.01	0.00	0.03	0.00	0.02	0.02
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
H	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

O\* Oxigenos











Tabla B.6: Análisis de microsonda para Cloritas (%mol).

Muestra	Piax-15	Piax-15	Piax-13	MIM-Z2	MIM-Z2	MIM-Z2	MIM-Z2	MIM-Z2	MIM-Z2	MIM-Z8	MIM-Z8	MIM-Z8
No. Análisis	89	90	146	152	153	154	156	157	158	179	186	187
	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl
	Chm	Chm	Chm	Clc	Clc	Clc	Clc	Clc	Clc	Chm	Chm	Chm
SiO <sub>2</sub>	24.30	24.26	30.35	26.16	26.03	26.65	25.48	25.08	25.58	25.72	25.78	25.70
TiO <sub>2</sub>	0.06	0.07	0.00	0.06	0.04	0.04	0.00	0.02	0.02	0.02	0.01	0.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.66	19.14	17.74	19.09	19.49	18.98	19.27	19.38	19.88	16.57	16.62	16.48
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.00	0.04	0.07	0.03	0.10	0.01	0.07	0.07	0.05	0.00	0.03
FeO	34.41	33.21	28.64	22.90	22.60	22.49	22.73	23.22	23.26	30.03	31.39	30.04
MnO	0.22	0.23	0.45	0.36	0.31	0.31	0.32	0.32	0.27	0.25	0.26	0.24
MgO	9.03	9.28	11.40	15.57	15.55	16.15	16.16	15.58	16.35	11.96	11.52	11.93
CaO	0.22	0.17	2.82	0.10	0.11	0.12	0.07	0.08	0.04	0.10	0.21	0.69
Na <sub>2</sub> O	0.04	0.00	0.02	0.12	0.07	0.14	0.16	0.00	0.00	0.03	0.00	0.09
K <sub>2</sub> O	0.02	0.00	0.00	0.03	0.05	0.06	0.05	0.04	0.02	0.01	0.01	0.00
Total	86.96	86.37	91.48	84.46	84.28	85.04	84.25	83.78	85.50	84.75	85.81	85.19

Número de Iones con base en :

14 O\*

Si <sup>IV</sup>	2.73	2.73	3.11	2.83	2.82	2.85	2.77	2.75	2.74	2.90	2.89	2.89
Al <sup>IV</sup>	1.27	1.27	0.89	1.17	1.18	1.15	1.23	1.25	1.26	1.10	1.11	1.11
Al <sup>VI</sup>	1.21	1.27	1.25	1.27	1.31	1.25	1.24	1.25	1.25	1.10	1.09	1.07
Fe <sup>VI 2+</sup>	3.24	3.12	2.46	2.07	2.05	2.01	2.07	2.13	2.08	2.83	2.94	2.82
Fe <sup>VI 3+</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg <sup>VI</sup>	1.51	1.56	1.74	2.51	2.51	2.58	2.62	2.55	2.61	2.01	1.93	2.00
S oct	5.96	5.95	5.45	5.86	5.87	5.84	5.93	5.93	5.94	5.94	5.96	5.89
Ca+Na+K	0.04	0.02	0.31	0.04	0.04	0.05	0.05	0.01	0.01	0.02	0.03	0.10

O\* Oxigenos

MIM-Z8	MIM-Z8	MIM-Z8	MIM-Z8	MIM-10	MIM-10	MIM-10	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184
188	189	190	191	170	222	223	c2-10	c3-3	c3-5	c4-6	c4-7	c9-5
Chl	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl
Chm	Chm	Chm	Chm	Chm	Clc	Clc	Clc	Clc	Clc	Chm	Clc	Chm
25.50	24.28	24.48	24.36	28.38	25.67	25.60	26.61	26.98	26.93	26.75	26.52	27.10
0.01	0.05	0.07	0.06	3.57	0.09	0.06	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00	0.01
16.67	19.49	19.31	19.87	14.37	18.38	19.08	20.58	19.99	20.79	19.60	20.44	18.99
0.01	0.08	0.08	0.07	0.10	0.04	0.07	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
30.60	29.73	30.05	29.38	21.13	23.89	23.88	25.69	26.82	25.84	27.47	27.18	29.17
0.28	0.17	0.19	0.15	0.35	0.29	0.34	0.40	0.48	0.35	0.51	0.48	0.59
11.84	11.63	11.41	11.83	12.12	17.05	16.96	16.51	15.31	16.66	14.63	15.44	14.51
0.10	0.08	0.04	0.05	4.32	0.08	0.01	0.02	0.04	0.00	0.04	0.03	0.04
0.00	0.03	0.04	0.07	0.06	0.05	0.01	0.00	0.04	0.00	0.00	0.01	0.01
0.00	0.01	0.00	0.01	0.08	0.02	0.00	0.01	0.07	0.01	0.02	0.02	0.06
85.00	85.54	85.67	85.85	84.48	85.54	86.01	89.83	89.71	90.61	89.03	90.12	90.49
2.88	2.70	2.72	2.69	3.06	2.72	2.67	2.74	2.80	2.74	2.81	2.74	2.82
1.12	1.30	1.28	1.31	0.94	1.28	1.33	1.26	1.20	1.26	1.19	1.26	1.18
1.09	1.26	1.25	1.28	0.89	1.01	1.02	1.23	1.24	1.24	1.23	1.23	1.15
2.89	2.77	2.80	2.72	1.91	2.12	2.08	2.21	2.32	2.20	2.41	2.35	2.54
0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.16	0.24						
1.99	1.93	1.89	1.95	1.95	2.69	2.64	2.53	2.37	2.53	2.29	2.38	2.25
5.97	5.95	5.94	5.95	4.83	5.98	5.97	5.98	5.93	5.97	5.93	5.96	5.95
0.01	0.02	0.01	0.02	0.52	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01	0.02

lx-184	lx-184	lx-287	lx-287	lx-287	lx-287	lx-287	lx-161	lx-161	lx-161	lx-161
c9-16	c9-17	c4-4	c4-5	c4-6	c4-7	c4-8	c1-9	c1-10	c1-17	c1-18
Chl	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl
Chm	Chm	Clc	Clc	Clc	Clc	Clc	Clc	Clc	Clc	Clc
26.77	26.94	26.71	27.28	27.40	27.01	27.29	26.36	26.39	26.12	26.19
0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.03	0.05	0.03	0.00
19.82	19.54	20.98	20.48	20.24	19.79	19.58	21.93	22.03	21.41	21.68
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
28.29	28.30	22.90	24.10	23.19	23.14	24.51	25.53	25.31	25.65	25.06
0.55	0.64	0.34	0.41	0.33	0.32	0.40	0.06	0.09	0.17	0.11
14.35	14.47	18.83	18.18	17.98	18.10	17.19	16.14	16.04	16.27	16.12
0.02	0.01	0.06	0.08	0.07	0.07	0.06	0.01	0.02	0.03	0.01
0.00	0.01	0.00	0.03	0.01	0.00	0.05	0.00	0.02	0.04	0.00
0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.03	0.00	0.00	0.02	0.01
89.79	89.91	89.86	90.56	89.22	88.42	89.11	90.07	89.96	89.73	89.18
2.79	2.81	2.71	2.76	2.80	2.79	2.81	2.69	2.70	2.69	2.70
1.21	1.19	1.29	1.24	1.20	1.21	1.19	1.31	1.30	1.31	1.30
1.23	1.21	1.21	1.20	1.23	1.19	1.19	1.33	1.35	1.28	1.33
2.47	2.47	1.94	2.04	1.98	2.00	2.11	2.18	2.16	2.21	2.16
2.23	2.25	2.85	2.74	2.74	2.78	2.64	2.46	2.44	2.50	2.48
5.94	5.93	6.00	5.98	5.95	5.97	5.95	5.97	5.96	5.99	5.97
0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.00	0.01	0.01	0.00

Tabla B.7: Análisis de microsonda para Micas (%mol).

Muestra	MIM-10	MIM-10	MIM-10	MIM-10	MIM-10	MIM-10	MIM-10	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184
No. Análisis	167	171	176	194	195	196	197	c2-5	c2-6	c2-7	c2-8	c2-9	c2-11	c2-12	c2-13	c2-18
	Mica	Mica	Mica	Mica	Mica	Mica	Mica	Mica	Mica	Mica	Mica	Mica	Mica	Mica	Mica	Mica
	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms
SiO <sub>2</sub>	48.62	48.27	48.73	49.77	48.39	48.52	48.55	52.23	50.54	53.31	49.82	54.65	51.36	50.97	51.87	52.42
TiO <sub>2</sub>	0.30	0.22	0.26	0.25	0.27	0.28	0.28	0.18	0.18	0.14	0.13	0.09	0.09	0.13	0.13	0.08
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26.42	26.01	25.74	26.47	26.67	26.73	26.92	29.01	26.55	28.98	27.39	27.84	24.79	27.92	28.27	26.84
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.16	0.11	0.10	0.10	0.08	0.13	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00
FeO	5.05	5.81	5.56	3.61	5.26	5.11	4.42	5.19	5.51	5.32	5.74	5.41	7.36	5.70	6.05	5.63
MnO	0.01	0.05	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.05	0.02	0.03	0.04	0.00	0.08	0.04	0.03	0.03
MgO	2.93	3.25	3.33	3.33	2.88	3.09	3.00	2.45	2.90	2.70	2.25	3.10	2.90	2.40	2.14	2.97
CaO	0.11	0.16	0.15	0.04	0.04	0.16	0.16	0.02	0.08	0.04	0.07	0.01	0.01	0.05	0.02	0.02
Na <sub>2</sub> O	0.56	0.32	0.27	0.44	0.42	0.52	0.48	0.37	0.14	0.30	0.28	0.26	0.04	0.32	0.30	0.20
K <sub>2</sub> O	10.13	8.42	6.94	10.84	10.78	10.51	9.97	10.36	10.78	10.61	10.48	10.93	11.09	10.26	10.55	10.68
Total	94.29	92.63	91.10	94.88	94.81	95.08	93.93	99.85	96.68	101.42	96.22	102.28	97.71	97.78	99.36	98.86
Número de Iones con base en :																
11 O*																
Si	3.34	3.35	3.40	3.38	3.32	3.32	3.33	3.36	3.38	3.38	3.35	3.44	3.44	3.36	3.37	3.42
Al Tot	2.14	2.13	2.11	2.12	2.16	2.15	2.18	2.20	2.09	2.16	2.17	2.06	1.96	2.17	2.17	2.06
Al IV	0.66	0.65	0.60	0.62	0.68	0.68	0.67	0.64	0.62	0.62	0.65	0.56	0.56	0.64	0.63	0.58
Al VI	1.48	1.48	1.51	1.49	1.48	1.47	1.51	1.56	1.48	1.54	1.52	1.50	1.39	1.53	1.54	1.48
Ti	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00
Fe+2	0.29	0.34	0.32	0.20	0.30	0.29	0.25	0.28	0.31	0.28	0.32	0.28	0.41	0.31	0.33	0.31
Mg	0.30	0.34	0.35	0.34	0.29	0.32	0.31	0.23	0.29	0.25	0.23	0.29	0.29	0.24	0.21	0.29
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.07	0.04	0.04	0.06	0.06	0.07	0.06	0.05	0.02	0.04	0.04	0.03	0.00	0.04	0.04	0.03
K	0.89	0.75	0.62	0.94	0.94	0.92	0.87	0.85	0.92	0.86	0.90	0.88	0.95	0.86	0.87	0.89
total	7.06	6.97	6.86	7.05	7.09	7.09	7.03	6.98	7.03	6.98	7.02	6.98	7.06	7.00	7.00	7.00
% Mol miembros extremos																
Cel	34.01	35.09	39.59	37.76	31.91	31.53	33.22	35.93	38.32	37.69	35.21	43.50	43.78	36.20	37.18	42.02
Ms	60.34	60.45	56.02	58.41	64.07	62.92	61.43	60.69	60.15	59.58	61.92	54.48	55.93	60.64	60.15	56.26
Pg	5.10	3.51	3.37	3.63	3.83	4.72	4.53	3.28	1.15	2.57	2.52	1.97	0.27	2.91	2.56	1.62
Mrg	0.55	0.94	1.02	0.20	0.19	0.83	0.82	0.11	0.38	0.17	0.35	0.05	0.03	0.25	0.11	0.11

O\* Oxigenos



lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184
c2-20	c3-1	c3-2	c3-4	c3-6	c3-7	c3-8	c3-9	c3-10	c3-11	c3-12	c3-13	c4-1	c4-2	c4-3	c4-4	c4-5
Mica	Mica	Mica	Mica	Mica	Mica	Mica	Mica	Mica	Mica	Mica	Mica	Mica	Mica	Mica	Mica	Mica
Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms
54.26	49.62	51.09	49.66	52.24	50.04	51.87	50.25	52.15	50.41	52.30	49.58	52.14	50.76	53.21	50.51	52.74
0.07	0.19	0.16	0.11	0.15	0.16	0.18	0.13	0.13	0.15	0.17	0.14	0.14	0.11	0.10	0.11	0.12
27.08	28.39	28.63	27.93	28.65	27.98	28.50	28.17	29.07	28.50	29.20	28.20	28.64	28.17	28.97	27.88	28.52
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.46	5.46	5.73	5.33	5.89	5.81	5.86	5.60	5.45	5.38	5.43	5.51	5.74	5.56	6.06	6.05	5.53
0.00	0.03	0.01	0.03	0.02	0.03	0.09	0.00	0.02	0.04	0.04	0.03	0.03	0.01	0.03	0.01	0.02
3.24	2.21	2.32	2.17	2.75	2.46	2.58	2.36	2.38	2.34	2.47	2.32	2.51	2.24	2.31	2.14	2.39
0.02	0.00	0.01	0.05	0.00	0.02	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01
0.22	0.30	0.31	0.39	0.27	0.36	0.28	0.33	0.41	0.35	0.42	0.40	0.30	0.30	0.30	0.32	0.31
10.81	10.74	10.70	10.21	10.56	11.03	10.83	10.70	10.75	10.70	10.57	10.66	10.71	10.59	10.65	10.88	10.76
101.17	96.92	98.96	95.89	100.53	97.90	100.20	97.54	100.38	97.87	100.61	96.86	100.21	97.75	101.64	97.92	100.40
3.45	3.31	3.34	3.34	3.35	3.32	3.35	3.33	3.35	3.33	3.35	3.31	3.36	3.35	3.38	3.35	3.38
2.03	2.23	2.20	2.21	2.17	2.19	2.17	2.20	2.20	2.22	2.20	2.22	2.17	2.19	2.17	2.18	2.16
0.55	0.69	0.66	0.66	0.65	0.68	0.65	0.67	0.65	0.67	0.65	0.69	0.64	0.65	0.62	0.65	0.62
1.48	1.55	1.54	1.55	1.52	1.51	1.52	1.53	1.55	1.55	1.55	1.54	1.53	1.55	1.54	1.52	1.54
0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01
0.29	0.30	0.31	0.30	0.32	0.32	0.32	0.31	0.29	0.30	0.29	0.31	0.31	0.31	0.32	0.33	0.30
0.31	0.22	0.23	0.22	0.26	0.24	0.25	0.23	0.23	0.23	0.24	0.23	0.24	0.22	0.22	0.21	0.23
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.03	0.04	0.04	0.05	0.03	0.05	0.03	0.04	0.05	0.04	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
0.88	0.91	0.89	0.88	0.86	0.93	0.89	0.91	0.88	0.90	0.86	0.91	0.88	0.89	0.86	0.92	0.88
6.98	7.04	7.02	7.01	7.01	7.07	7.02	7.03	7.01	7.03	7.00	7.05	7.01	7.01	6.99	7.04	6.99
44.95	31.35	33.67	34.03	35.26	32.10	34.85	33.32	34.93	32.81	34.68	31.49	35.79	35.27	37.53	34.72	38.36
53.30	65.82	63.48	62.06	62.30	64.60	62.69	63.69	61.43	64.04	61.58	64.71	61.55	61.97	59.82	62.42	59.00
1.67	2.83	2.78	3.63	2.44	3.20	2.45	2.95	3.55	3.15	3.74	3.70	2.65	2.69	2.59	2.82	2.59
0.08	0.00	0.07	0.27	0.00	0.10	0.00	0.03	0.09	0.00	0.00	0.10	0.02	0.07	0.06	0.04	0.05

lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184	lx-184
c6-21	c6-22	c6-23	c6-24	c6-25	c6-26	c6-27	c6-28	c6-29	c6-30	c6-31	c6-32	c6-33	c6-34	c6-35	c7-17	c7-18	c7-19	c7-20	c8-17	c8-18	c8-19	c8-20
Mica	Mica	Mica	Mica	Mica	Mica	Mica	Mica	Mica	Mica	Mica	Mica	Mica	Mica	Mica	Mica	Mica	Mica	Mica	Mica	Mica	Mica	Mica
Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms
53.48	50.46	53.07	50.40	52.96	50.17	53.32	50.72	53.51	50.70	53.43	50.64	53.33	50.69	53.98	50.15	52.03	49.69	50.74	50.89	51.94	50.65	51.81
0.16	0.20	0.19	0.16	0.21	0.15	0.14	0.15	0.22	0.16	0.16	0.12	0.15	0.16	0.16	0.12	0.08	0.10	0.13	0.14	0.16	0.16	0.17
28.92	27.97	29.46	28.36	29.26	28.44	29.68	28.32	29.54	28.35	29.73	27.83	28.71	26.87	26.73	27.81	28.16	27.65	28.04	27.82	28.43	27.68	28.65
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.99	5.64	5.14	5.01	5.28	5.42	5.19	5.21	5.28	5.24	5.40	5.62	6.01	5.93	5.94	5.97	6.26	6.01	6.14	5.20	5.30	5.46	5.53
0.02	0.01	0.01	0.00	0.03	0.05	0.03	0.00	0.00	0.03	0.05	0.03	0.01	0.04	0.04	0.02	0.04	0.00	0.04	0.05	0.00	0.00	0.05
2.69	2.42	2.50	2.25	2.42	2.26	2.49	2.40	2.52	2.34	2.52	2.49	2.75	2.75	3.21	2.12	2.25	2.05	2.16	2.46	2.37	2.34	2.42
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.01	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01
0.28	0.32	0.43	0.38	0.36	0.41	0.38	0.40	0.40	0.42	0.32	0.37	0.35	0.22	0.09	0.32	0.35	0.31	0.29	0.37	0.24	0.30	0.32
10.87	10.65	10.37	10.46	10.40	10.28	10.35	10.59	10.37	10.59	10.61	10.85	10.82	11.15	11.06	10.57	10.47	10.40	10.33	10.47	10.38	10.55	10.55
102.43	97.66	101.16	97.02	100.92	97.18	101.58	97.80	101.84	97.83	102.21	97.94	102.13	97.81	101.21	97.09	99.66	96.23	97.89	97.41	98.84	97.15	99.51
3.37	3.34	3.36	3.34	3.37	3.33	3.36	3.34	3.37	3.34	3.36	3.35	3.37	3.37	3.44	3.35	3.37	3.34	3.35	3.37	3.38	3.37	3.36
2.15	2.18	2.20	2.22	2.19	2.22	2.21	2.20	2.19	2.20	2.20	2.17	2.14	2.10	2.01	2.19	2.15	2.19	2.18	2.17	2.18	2.17	2.19
0.63	0.66	0.64	0.66	0.63	0.67	0.64	0.66	0.63	0.66	0.64	0.65	0.63	0.63	0.56	0.65	0.63	0.66	0.65	0.63	0.62	0.63	0.64
1.52	1.53	1.56	1.56	1.56	1.55	1.57	1.55	1.56	1.55	1.56	1.52	1.51	1.47	1.45	1.53	1.53	1.54	1.53	1.54	1.55	1.53	1.54
0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
0.32	0.31	0.27	0.28	0.28	0.30	0.27	0.29	0.28	0.29	0.28	0.31	0.32	0.33	0.32	0.33	0.34	0.34	0.34	0.29	0.29	0.30	0.30
0.25	0.24	0.24	0.22	0.23	0.22	0.23	0.24	0.24	0.23	0.24	0.24	0.26	0.27	0.31	0.21	0.22	0.21	0.21	0.24	0.23	0.23	0.23
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.03	0.04	0.05	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.05	0.04	0.03	0.01	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.03	0.04	0.04
0.87	0.90	0.84	0.89	0.84	0.87	0.83	0.89	0.83	0.89	0.85	0.92	0.87	0.95	0.90	0.90	0.87	0.89	0.87	0.88	0.86	0.89	0.87
7.00	7.03	6.97	7.01	6.97	7.01	6.97	7.02	6.97	7.02	6.98	7.04	7.01	7.06	7.00	7.03	7.00	7.02	7.00	7.01	6.97	7.01	7.00
36.97	34.23	36.36	34.45	36.75	32.95	36.38	34.46	36.86	34.33	35.74	34.81	37.10	36.83	44.46	34.61	37.40	34.45	35.18	36.65	37.67	36.56	35.53
60.63	62.90	59.87	62.12	60.08	63.19	60.24	62.00	59.63	61.91	61.48	61.99	59.91	61.30	54.80	62.47	59.47	62.61	62.04	60.03	60.14	60.78	61.55
2.41	2.85	3.77	3.43	3.17	3.85	3.39	3.53	3.51	3.76	2.78	3.20	2.95	1.87	0.68	2.87	2.99	2.82	2.66	3.24	2.08	2.59	2.85
0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.06	0.04	0.15	0.12	0.13	0.08	0.12	0.07	0.07

---

lx-287	lx-287	lx-287	lx-287
c1-11	c1-12	c1-13	c1-14
Mica	Mica	Mica	Mica
Ms	Ms	Ms	Ms
51.75	49.55	52.27	50.59
0.21	0.18	0.16	0.10
27.57	26.95	27.33	27.67
0.00	0.00	0.01	0.00
6.00	5.94	5.36	4.15
0.02	0.08	0.04	0.00
2.95	2.93	2.95	2.64
0.08	0.04	0.03	0.04
0.25	0.27	0.28	0.37
10.66	10.44	10.67	10.39
99.48	96.36	99.10	95.96

---

3.37	3.34	3.40	3.38
2.11	2.14	2.09	2.18
0.63	0.66	0.60	0.62
1.48	1.48	1.49	1.56
0.01	0.01	0.01	0.01
0.33	0.33	0.29	0.23
0.29	0.29	0.29	0.26
0.00	0.00	0.00	0.00
0.01	0.00	0.00	0.00
0.03	0.03	0.03	0.05
0.88	0.90	0.89	0.89
7.03	7.05	7.00	6.99

36.60	33.66	40.00	37.89
60.83	63.66	57.60	58.75
2.19	2.48	2.26	3.17
0.37	0.21	0.14	0.19

---

Tabla B.8: Análisis de microsonda para Ilmenitas (%mol).

Muestra	Piax-Z1	Piax-Z1	Piax-Z1	MIM-Z8	MIM-Z8	MIM-Z8	MIM-Z8
No. Análisis	332	343	345	237	240	246	263
	Ilm	Ilm	Ilm	Ilm	Ilm	Ilm	Ilm
SiO <sub>2</sub>	0.03	0.00	0.01	0.06	0.00	0.06	0.03
TiO <sub>2</sub>	53.85	53.06	53.44	50.82	50.70	49.66	51.50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.04	0.00
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.02	0.03	0.07	0.03	0.06	0.05
FeO	45.29	46.38	46.01	47.13	46.95	46.87	44.79
MnO	1.56	1.07	0.96	1.21	1.61	1.58	3.75
MgO	0.03	0.04	0.06	0.11	0.07	0.07	0.03
CaO	0.07	0.21	0.18	0.68	0.23	0.38	0.16
Na <sub>2</sub> O	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01
K <sub>2</sub> O	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01
Total	100.87	100.80	100.70	100.12	99.60	98.74	100.32

Número de Iones con base en :

6 O\*

Si	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ti	2.98	2.00	2.96	2.97	2.90	2.92	2.96
<b>Fe<sup>3+</sup></b>	3.84	0.00	3.84	4.24	4.02	4.19	4.12
<b>Fe<sup>2+</sup></b>	2.79	1.94	2.84	3.06	2.98	3.07	2.86
Mg	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00
Mn	0.10	0.05	0.06	0.08	0.10	0.10	0.24
Ca	0.01	0.01	0.01	0.06	0.02	0.03	0.01
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	5.88	4.00	5.88	6.19	6.01	6.15	6.09

O\* Oxigenos

Tabla B.9: Análisis de microsonda para titanitas (%mol).

Muestra	Piax-15	Piax-Z1	Piax-Z1	Piax-Z1	Piax-Z3	Piax-13	Piax-13	Piax-13	Piax-Z8	MIM-Z8	MIM-Z8	MIM-Z8	MIM-Z8	MIM-Z8
No. Análisis	128	333	342	348	288	148	157	112	238	239	241	245	264	265
	Ttn	Ttn	Ttn	Ttn	Ttn	Ttn	Ttn	Ttn	Ttn	Ttn	Ttn	Ttn	Ttn	Ttn
SiO <sub>2</sub>	30.38	24.83	30.69	30.64	30.70	30.49	30.50	30.08	30.69	31.41	29.28	30.80	30.53	30.52
TiO <sub>2</sub>	37.05	49.72	38.86	37.99	36.80	37.44	38.21	36.87	37.87	35.65	39.14	37.68	37.87	38.13
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.85	1.00	1.04	1.29	2.31	1.66	1.54	1.65	1.28	1.69	1.11	1.28	1.44	1.17
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.01	0.08	0.05	0.00	0.03	0.02	0.02	0.12	0.12	0.12	0.02	0.03	0.00
FeO	0.57	0.39	0.45	0.43	0.29	0.91	0.29	0.28	0.90	2.62	2.26	1.58	0.90	0.76
MnO	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.04	0.01	0.00	0.06	0.01	0.08	0.00	0.03	0.04
MgO	0.02	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.69	0.00	0.31	0.01	0.00
CaO	28.22	22.44	28.37	28.14	28.77	28.10	28.72	27.99	27.99	26.37	26.70	27.46	27.95	28.07
Na <sub>2</sub> O	0.00	0.06	0.00	0.01	0.02	0.02	0.01	0.13	0.04	0.22	0.01	0.12	0.01	0.03
K <sub>2</sub> O	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.03	0.00	0.00
Total	98.13	98.46	99.52	98.57	98.91	98.74	99.34	97.05	98.97	98.81	98.69	99.29	98.77	98.72
Número de Iones con base en :														
20 O*														
Si	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
Al	0.29	0.19	0.16	0.20	0.35	0.26	0.24	0.26	0.20	0.25	0.18	0.20	0.22	0.18
Ti	3.67	6.02	3.81	3.73	3.61	3.69	3.77	3.69	3.71	3.41	4.02	3.68	3.73	3.76
Fe 3+	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
suma Triv:	3.96	6.21	3.97	3.93	3.96	3.95	4.01	3.95	3.91	3.67	4.20	3.88	3.95	3.94
Fe 2+	0.06	0.04	0.05	0.05	0.03	0.10	0.03	0.03	0.10	0.29	0.25	0.17	0.10	0.08
Mg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.14	0.00	0.06	0.00	0.00
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Ca	4.02	3.19	3.99	3.99	4.10	3.98	4.04	4.03	3.96	3.74	3.81	3.87	3.96	3.98
Na	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01	0.06	0.00	0.03	0.00	0.01
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
suma M:	4.09	3.25	4.04	4.04	4.14	4.10	4.08	4.10	4.08	4.23	4.08	4.14	4.06	4.07
Total	12.04	13.47	12.01	11.97	12.10	12.05	12.09	12.04	11.99	11.90	12.28	12.02	12.02	12.01

O\* Oxigenos

MIM-Z8	MIM-Z8	MIM-Z8	MIM-10	MIM-10	MIM-10	MIM-10	MIM-10	MIM-10	MIM-10	MIM-10
266	267	270	181	191	192	193	203	216	217	218
Ttn	Ttn	Ttn	Ttn	Ttn	Ttn	Ttn	Ttn	Ttn	Ttn	Ttn
30.26	30.26	30.46	25.66	30.13	30.21	30.35	32.70	30.86	30.44	30.52
37.90	36.31	37.11	30.70	37.29	37.99	38.30	25.70	38.61	38.05	37.37
1.36	1.11	1.72	2.63	1.64	1.55	1.18	9.49	1.15	1.33	1.61
0.00	0.01	0.00	0.04	0.02	0.01	0.06	0.09	0.00	0.02	0.00
0.96	0.68	1.03	7.51	0.51	0.65	0.55	3.35	0.71	0.75	0.71
0.06	0.02	0.04	0.21	0.03	0.07	0.02	0.01	0.06	0.04	0.04
0.01	0.00	0.00	0.22	0.01	0.01	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00
27.99	27.19	27.81	24.65	28.39	28.53	28.48	26.90	28.32	28.35	28.48
0.05	0.00	0.03	0.06	0.02	0.03	0.05	0.02	0.05	0.05	0.05
0.03	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02
98.62	95.57	98.21	91.72	98.04	99.03	99.01	98.25	99.79	99.07	98.80
4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
0.21	0.17	0.27	0.48	0.26	0.24	0.18	1.37	0.18	0.21	0.25
3.77	3.61	3.67	3.60	3.72	3.78	3.80	2.36	3.76	3.76	3.68
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.98	3.78	3.93	4.08	3.98	4.03	3.98	3.73	3.94	3.97	3.93
0.11	0.08	0.11	0.93	0.06	0.07	0.06	0.37	0.08	0.08	0.08
0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
3.98	3.97	3.96	3.90	4.05	4.03	4.03	3.78	3.97	4.01	4.03
0.01	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01
0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.11	4.05	4.09	4.93	4.12	4.12	4.11	4.15	4.07	4.11	4.13
12.09	11.83	12.02	13.01	12.10	12.15	12.09	11.89	12.01	12.08	12.06

Tabla B.10: Análisis de microsonda para rutilos (%mol).

Muestra	Piax-15	Piax-15	Piax-15	Piax-15	Piax-15	Piax-15	Piax-15	Piax-15	Piax-15	Piax-13	Piax-13	Piax-Z1
No. Análisis	109	110	111	112	126	127	123	83	85	158	159	331
	Rt	Rt	Rt	Rt	Rt	Rt	Rt	Rt	Rt	Rt	Rt	Rt
SiO <sub>2</sub>	0.05	0.04	0.02	0.37	0.02	0.03	0.01	0.00	0.10	0.01	0.00	0.00
TiO <sub>2</sub>	99.79	100.37	101.04	99.59	99.25	100.20	100.29	100.39	100.59	100.07	100.79	100.60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.05	0.03	0.05	0.01	0.01	0.01	0.02	0.04	0.03	0.02	0.03
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.07	0.06	0.04	0.03	0.07	0.06	0.12	0.00	0.03	0.09	0.03	0.06
FeO	0.68	0.65	0.42	0.81	0.53	0.21	0.24	0.50	0.34	0.45	0.37	0.48
MnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MgO	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02
CaO	0.34	0.28	0.20	0.65	0.30	0.11	0.10	0.22	0.22	0.10	0.20	0.07
Na <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00
K <sub>2</sub> O	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00
Total	100.94	101.46	101.75	101.51	100.21	100.62	100.80	101.15	101.33	100.78	101.43	101.26

Número de Iones con base en :

2 O\*

Si	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ti	0.99	0.99	1.00	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01
Al	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe <sup>2+</sup>	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.02

O\* Oxigenos

Piix-Z1	Piix-Z1	Piix-Z3	Piix-Z3	Piix-Z3	MIM-Z8
334	344	309	310	311	269
Rt	Rt	Rt	Rt	Rt	Rt
0.01	0.03	0.02	0.04	0.02	0.33
100.55	99.57	99.80	99.42	99.99	98.79
0.01	0.01	0.06	0.07	0.04	0.02
0.01	0.13	0.13	0.10	0.09	0.14
0.40	0.22	0.45	0.45	0.49	0.82
0.03	0.05	0.01	0.00	0.00	0.01
0.02	0.00	0.00	0.01	0.02	0.04
0.11	0.35	0.19	0.33	0.29	0.97
0.05	0.03	0.00	0.00	0.01	0.03
0.00	0.00	0.01	0.00	0.03	0.01
101.20	100.40	100.65	100.44	100.97	101.17
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.01	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.02	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01



## Anexo C

### Cálculo de tasas de exhumación

Tabla C1: Cálculo hipotético de la distancia de la placa subducida en términos de distintos ángulos de subducción. a) Diagrama geométrico y parámetros de la placa en subducción.

$P_{11}=17$ km	$P_f$ [km]	50	55	60	65	70	75	
$\theta$ [°]	$\text{sen}(\theta)$	$\Delta P$ [Km]						
		33	38	43	48	53	58	
30	0.500	66.0	76.0	86.0	96.0	106.0	116.0	Dp [Km]
35	0.574	57.5	66.2	75.0	83.7	92.4	101.1	
40	0.643	51.3	59.1	66.9	74.7	82.5	90.2	
45	0.707	46.7	53.7	60.8	67.9	75.0	82.0	
25	0.423	78.1	89.9	101.7	113.6	125.4	137.2	
20	0.342	96.5	111.1	125.7	140.3	154.9	169.5	
50	0.766	43.1	49.6	56.1	62.7	69.2	75.7	
55	0.819	40.3	46.4	52.5	58.6	64.7	70.8	
60	0.866	38.1	43.9	49.7	55.4	61.2	67.0	

$P_{12}=20$ km	$P_f$ [Km]	50	55	60	65	70	75	
$\theta$ [°]	$\text{sen}(\theta)$	$\Delta P$ [Km]						
		30	35	40	45	50	55	
30	0.500	60	70	80	90	100	110	Dp [Km]
35	0.574	52.3	61.0	69.7	78.5	87.2	95.9	
40	0.643	46.7	54.4	62.2	70.0	77.8	85.6	
45	0.707	42.4	49.5	56.6	63.6	70.7	77.8	
25	0.423	71.0	82.8	94.6	106.5	118.3	130.1	
20	0.342	87.7	102.3	116.9	131.5	146.2	160.8	
50	0.766	39.2	45.7	52.2	58.7	65.3	71.8	
55	0.819	36.6	42.7	48.8	54.9	61.0	67.1	
60	0.866	34.6	40.4	46.2	52.0	57.7	63.5	

\*Datos sombreados utilizados en tabla C2.

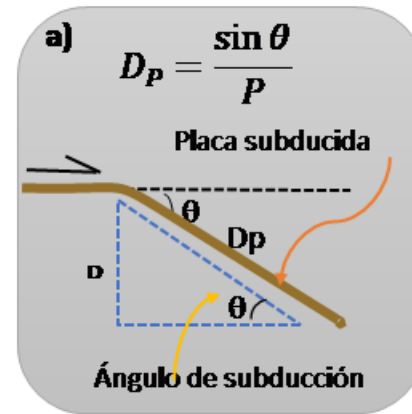


Tabla C2: Tasas de exhumación calculadas en terminos de la distancia de placa subducida ( $\Delta D_p$ ), el ángulo hipotético de subducción y el tiempo de exhumación.  
 a) ecuación para el cálculo de la tasa de exhumación.

<b><math>P_{i1} = 17 \text{ km}^*</math></b>																									
Ángulo de subducción	30°						45°						55°						60°						
	Placa subducida $D_p$ [Km]																								
Edad (T-tiempo) $\Delta T^{**}$ [Ma]	66.0	76.0	86.0	96.0	106.0	116.0	46.7	53.7	60.8	67.9	75.0	82.0	40.3	46.4	52.5	58.6	64.7	70.8	38.1	43.9	49.7	55.4	61.2	67.0	
35.0	1.89	2.17	2.46	2.74	3.03	3.31	1.33	1.54	1.74	1.94	2.14	2.34	1.15	1.33	1.50	1.67	1.85	2.02	1.09	1.25	1.42	1.58	1.75	1.91	
36.0	1.83	2.11	2.39	2.67	2.94	3.22	1.30	1.49	1.69	1.89	2.08	2.28	1.12	1.29	1.46	1.63	1.80	1.97	1.06	1.22	1.38	1.54	1.70	1.86	
42.5	1.55	1.79	2.02	2.26	2.49	2.73	1.10	1.26	1.43	1.60	1.76	1.93	0.95	1.09	1.24	1.38	1.52	1.67	0.90	1.03	1.17	1.30	1.44	1.58	
43.0	1.53	1.77	2.00	2.23	2.47	2.70	1.09	1.25	1.41	1.58	1.74	1.91	0.94	1.08	1.22	1.36	1.50	1.65	0.89	1.02	1.15	1.29	1.42	1.56	
32.0	2.06	2.38	2.69	3.00	3.31	3.63	1.46	1.68	1.90	2.12	2.34	2.56	1.26	1.45	1.64	1.83	2.02	2.21	1.19	1.37	1.55	1.73	1.91	2.09	
Promedios	1.77	2.04	2.31	2.58	2.85	3.12	1.25	1.44	1.63	1.82	2.01	2.20	1.08	1.25	1.41	1.58	1.74	1.90	1.02	1.18	1.33	1.49	1.64	1.80	
Promedio total	2.45						1.73						1.49						1.41						

<b><math>P_{i2} = 20 \text{ km}^*</math></b>																									
Ángulo de subducción	30°						45°						55°						60°						
	Placa subducida $D_p$ [Km]																								
Edad (T-tiempo) $\Delta T^{**}$ [Ma]	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0	110.0	42.4	49.5	56.6	63.6	70.7	77.8	36.6	42.7	48.8	54.9	61.0	67.1	34.6	40.4	46.2	52.0	57.7	63.5	
35.0	1.71	2.00	2.29	2.57	2.86	3.14	1.21	1.41	1.62	1.82	2.02	2.22	1.05	1.22	1.40	1.57	1.74	1.92	0.99	1.15	1.32	1.48	1.65	1.81	
36.0	1.67	1.94	2.22	2.50	2.78	3.06	1.18	1.37	1.57	1.77	1.96	2.16	1.02	1.19	1.36	1.53	1.70	1.87	0.96	1.12	1.28	1.44	1.60	1.76	
42.5	1.41	1.65	1.88	2.12	2.35	2.59	1.00	1.16	1.33	1.50	1.66	1.83	0.86	1.01	1.15	1.29	1.44	1.58	0.82	0.95	1.09	1.22	1.36	1.49	
43.0	1.40	1.63	1.86	2.09	2.33	2.56	0.99	1.15	1.32	1.48	1.64	1.81	0.85	0.99	1.14	1.28	1.42	1.56	0.81	0.94	1.07	1.21	1.34	1.48	
32.0	1.88	2.19	2.50	2.81	3.13	3.44	1.33	1.55	1.77	1.99	2.21	2.43	1.14	1.34	1.53	1.72	1.91	2.10	1.08	1.26	1.44	1.62	1.80	1.98	
32.0	1.88	2.19	2.50	2.81	3.13	3.44	1.33	1.55	1.77	1.99	2.21	2.43	1.14	1.34	1.53	1.72	1.91	2.10	1.08	1.26	1.44	1.62	1.80	1.98	
Promedio	1.66	1.93	2.21	2.48	2.76	3.04	1.17	1.37	1.56	1.76	1.95	2.15	1.01	1.18	1.35	1.52	1.69	1.85	0.96	1.12	1.28	1.43	1.59	1.75	
Promedio total	2.35						1.66						1.43						1.35						

$$T_E = \frac{\Delta D_p}{\Delta T}$$

Tasa de Exhumación  $T_E$

Tasa de Exhumación  $T_E$

\*  $P_{i(1,2)}$  = Emplazamiento en la corteza superior

\*\*  $\Delta T$ - Tomada de la tabla 6.1.

## Anexo D

# Composición de roca efectiva

Dentro de los métodos para obtener una composición representativa de roca total, se ha utilizado el cálculo ponderado que involucra proporciones de minerales presentes en una sección delgada y sus composiciones representativas individuales que se consideren en equilibrio químico, a su vez, es suponer que un volumen de roca está en equilibrio químico. Es decir, cuando las cantidades y las composiciones de las fases involucradas no cambian en el tiempo sin una influencia externa (Lanari and Engi, 2017).

El principio de equilibrio local restringe el estudio a subsistemas que son lo suficientemente pequeños como para que se pueda suponer un estado de equilibrio (Thompson, 1955; Thompson Jr, 1970). A su vez, requiere que se defina el volumen de equilibrio (Spear, 1995) que se va a estudiar, ya que, la composición de roca total relevante para los modelos de equilibrio es la composición del volumen de equilibrio en una etapa específica de la evolución de la roca de estudio, y puede excluir ciertos minerales formados antes o después de esta etapa. A esta composición del volumen de equilibrio se le conoce como composición de roca total efectiva o composición de roca total reactiva (Lanari and Engi, 2017).

El término de roca efectiva fue introducido por Tracy (1982) y se utiliza para distinguir entre la composición de roca total obtenida de una muestra y la composición del sistema químico que se considera en equilibrio en esa muestra (Stüwe, 1997).

Para construir una pseudosección, una de las tareas más difíciles es identificar esta composición y la decisión de que minerales se deben incluir en este cálculo queda determinada en función de lo que se quiera modelar. Utilizando criterios petrológicos, se pueden excluir los dominios que están fuera del volumen considerado en equilibrio. Por lo tanto, aunque algunos minerales pueden ser reproducibles en un modelo, si son parte de un dominio que está fuera del volumen de equilibrio, se excluyen de la composición de roca total, produciendo así una composición de roca total efectiva.

El objetivo de este método es predecir la composición que representa la composición de equilibrio de la roca en ciertas condiciones P-T.

El microanálisis con microsonda junto con el mapeo elemental de rayos X se pueden utilizar para definir los minerales o porciones de minerales que se incluirán en la composición de roca efectiva (Marmo et al., 2002). Las fases minerales se identifican de acuerdo con su composición característica y luego junto con las relaciones modales calculadas y las concentraciones medidas mediante microsonda (*Fe*, *Mg*, *Ca*, *Mn*, etc) para cada una de las fases, se determinan los componentes específicos de la composición total y los componentes que están fuera de equilibrio se pueden restar computacionalmente. La remoción computacional se basa en composiciones minerales y se logra mediante mapeo de composiciones y/o uso de zonificación mineral para predecir cambios en la roca total.

Para este trabajo se tomaron en cuenta varias restricciones:

El granate se trata como dos fases en caso de que presenten zonación: un borde que abarca la periferia que interactúa químicamente con la matriz de la roca y un núcleo que está químicamente aislado del resto de la roca, por lo tanto, el núcleo es de composición más primitiva que el borde y representa la composición de nucleación previa a la fraccionación. Las variaciones composicionales dentro del granate son controladas por el fraccionamiento de cristales y por lo tanto está en función de la proporción modal del granate dentro de la muestra (Evans, 2004).

Las relaciones modales se calcularon mediante procesamiento de imágenes. Entre las aplicaciones más simples del análisis de imágenes es la medición de las proporciones modales en una superficie. Sin recurrir a conceptos estadísticos complejos, es posible demostrar que las proporciones en una superficie puede ser estimada contando píxeles correspondientes a cada dominio mineral. Aunque este tipo de estimación conlleva a reflexionar, una parte de esta estimación está en función del aumento que se ha utilizado para tomar la imagen y de que se trata de una estimación en una sección bidimensional de un objeto que posee propiedades tridimensionales. Sin embargo, se puede disponer de un número suficiente de imágenes obtenidas, para así, reducir el error de estimación. La imagen como tal no es más que una ínfima parte de una muestra que se va a caracterizar y es tomada al azar dentro de dicha muestra que ella misma resulta de un específico protocolo de selección de muestreo.

El problema de estimación de las proporciones volumétricas es más simple de tratar, ya que, la estereología demuestra que la proporción de píxeles dentro de la imagen es un estimador no sesgado de la proporción volumétrica a condición de que la sección sea realizada al azar (Pirard, 2004).

Además, una consideración que se tiene que tomar en cuenta es que no es conveniente integrar, dentro de un mismo cálculo estadístico, medidas modales efectuadas a escalas

significativamente diferentes en muestras heterogéneas.

Una vez que se tengan las imágenes que se van a analizar, se abren en el software libre *ImageJ*. Posteriormente, con la herramienta de selección a mano alzada se marcan los minerales de los cuales queremos cuantificar su área, así como también, se marca el área de toda la imagen. Se calcula el área de cada selección marcada individualmente y el área de toda la imagen (Fig. D.1). El archivo que obtenemos como resultado se guarda en formato *.xls*. Se realiza el mismo proceso para todas las imágenes.

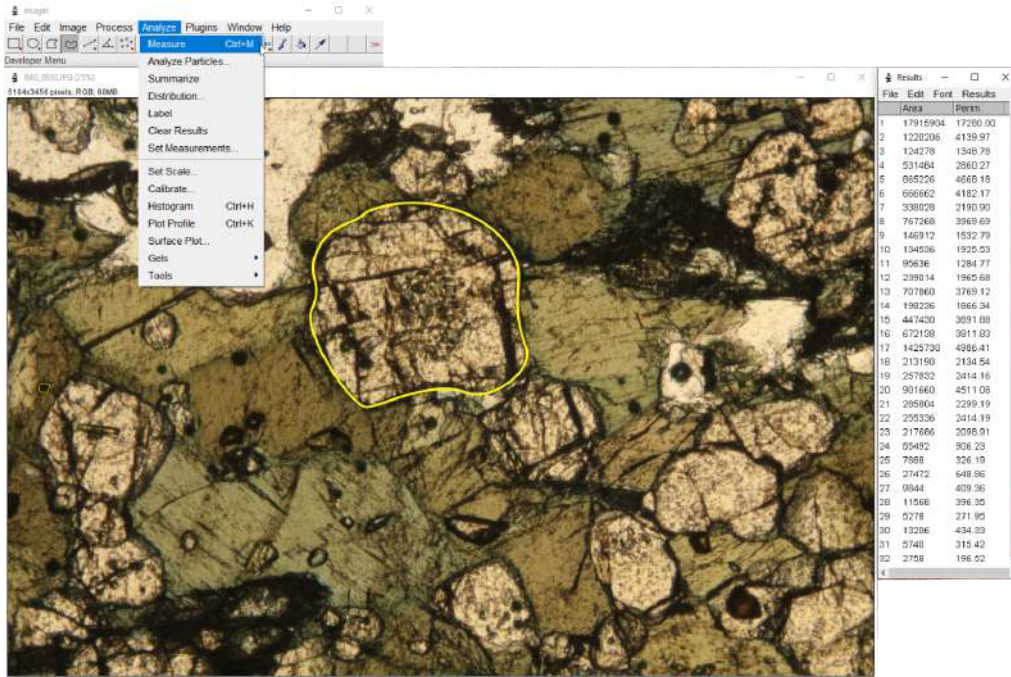


Figura D.1: Ejemplo del uso del programa ImageJ para cuantificar el área de los minerales y así obtener su porcentaje modal. El recuadro de resultados está en pixeles y se exporta en formato *.xls*.

Una vez calculado el porcentaje modal de los minerales objetivo de las áreas medidas, se promedia el porcentaje modal de todas las imágenes. Se resta la proporción contenida en la región del núcleo del granate (granate modal= $\sim 35-40\%$ , para eclogitas). A su vez se realiza la mediana de la composición de cada fase analizada mediante microsonda y se procede a hacer el cálculo de la composición de roca total efectiva (Tabla D.1).

Esta técnica tiene varias ventajas y desventajas, una de las limitaciones de este método es el de las fases que se escogen para generar la composición de roca total. Las fases escogidas tienen que haber crecido en equilibrio con su entorno. Sin embargo, se sabe que fases como el granate, se nuclean y crecen sólo después de sobrepasar el equilibrio (Hollister, 1969; Castro and Spear, 2017; Wolfe and Spear, 2018), aunque también hay otros estudios (George y Gaidies, 2017) que han supuesto que la desviación

## Referencias

Tabla D.1: Ejemplificación del cálculo de roca efectiva para la muestra Piax-27.

% modal				Todo	Núcleo <sup>①</sup>	Núcleo	Borde <sup>②</sup>	Borde	
Grt	40.4	Grt	40.4	42.3	0.42	23.3	0.29	0.19	0.21
Cpx (Omp)	32	Cpx+Amp	52.0	54.5	0.55	54.5	0.67	0.67	0.75
Rt	3	+Pl+Chl							
Amp	8	Rt	3.0	3.1	0.03	3.1	0.04	0.04	0.04
Qz	5	Total	95.39	100	1.00	80.95	1.00	0.90	1.00
Pl	11								
Chl	1								
Total	100.4								

① Núcleo 55% del Grt=(0.42\*55)/100=23.29      ② Borde=(42.3-23.3)/100=0.19

Composición mineral:

	Mediana				Composición de roca efectiva <sup>③</sup>				
	Grt			Cpx+Plg	Rt	Total	Borde	Núcleo	
	Total	Núcleo	Borde						
SiO2	37.87	37.71	37.91	60.36	0	SiO2	49.10	53.02	51.50
TiO2	0.15	0.13	0.15	0.29	100	TiO2	3.36	4.55	4.12
Al2O3	21.86	21.91	21.81	14.21		Al2O3	17.00	15.20	15.87
Cr2O3	0	0	0.01	0.03					
FeO	23.35	23.1	23.42	3.41		FeO	11.74	7.48	8.94
MnO	1.16	1.35	1.1	0.05		MnO	0.52	0.27	0.42
MgO	3.43	3.37	3.46	5.31		MgO	4.35	4.69	4.54
CaO	12.16	12.38	12.13	9.13		CaO	10.12	9.37	9.71
Na2O	0.02	0.04	0.02	7.20		Na2O	3.93	5.37	4.86
K2O	0	0.01	0	0.03					
Total	100	100	100	100		Total	100	100	100

③ Roca efectiva:  $SiO_2 = (\%modalGrt * SiO_2totalGrt) + (\%modalCpx+Plg * SiO_2Cpx+Plg) + (\%modalRt * SiO_2Rt)$   
 $= (0.42 * 37.87) + (0.55 * 60.3) + (0.03 * 0) = 49.1$

\*Todos los datos de microsonda estan normalizados

del equilibrio es lo suficientemente pequeña para dar validez a las condiciones P-T del crecimiento del granate. Además, hay que tener en cuenta que la composición del volumen en equilibrio cambia a lo largo de una trayectoria P-T debido al fraccionamiento (Tracy, 1982; Spear and Daniel, 1998; Spear et al., 1990).

Este método también permite comparar directamente las composiciones y proporciones de fases calculadas mediante modelos de pseudosección con las de la lámina delgada de interés, lo que proporciona más restricciones sobre las condiciones de metamorfismo P-T interpretadas (Pearce et al., 2015).