Capítulo 4. Petrografía y microscopía electrónica.

4.1. Introducción.

Se describe la petrografía de muestras consideradas clave para definir las unidades más importantes del área de estudio, con énfasis en el análisis de los diferentes gabros (JLT-8A, JLT-12, JLT-30-2, JLT-32, JLT-45). Se estudió también una roca de la fase félsica (JLT-23), una muestra de la roca encajonante (Formación Tecalitlán, 9) y un dique máfico (JLT-13C). Todas las muestras analizadas geoquímica e isotópicamente, y de las que se separaron minerales para fechamientos, están incluídas en los estudios petrográficos para ver si eran adecuadas para la obtención de datos geoquímicos confiables.

Se analizaron los gabros con variaciones texturales que conforman la litología máfica del plutón, para ver sus diferencias y similitudes y determinar si la asociación mineral tiene relación con dichas variaciones. Se describió una cuarzo-monzodiorita para comparar las composiciones extremas de las litologías observadas en dicho plutón. Se hizo la petrografía de una roca volcanosedimentaria de la Formación Tecalitlán para determinar el tipo de litología y ver si su asociación mineral da información respecto al tipo de contacto del plutón con la roca encajonante. También se analizó el contacto entre el gabro y el granitoide de manera cualitativa para determinar si los minerales presentes brindan información sobre su naturaleza. Además se analizó un dique máfico afanítico que intrusiona al microgabro y gabro de grano grueso para fines comparativos con éstos.

Posteriormente se estudiaron los gabros de la región de Tepalcaltepec, Michoacán (JLT-41) y Manzanillo, Colima (MZ-3 y 4) para comparar dichos plutones regionalmente con el de Jilotlán.

Las láminas, excepto una, fueron elaboradas en el taller de laminación del Instituto de Geología; se emplearon cortadoras de disco diamantado para cortar y desbastar las rocas. Se utilizó polvo de carburo de silicio (SiC) con tamaños de 100 (160μm), 400 (22μm) y 600 (15μm) para pulir las galletas de roca con discos metálicos giratorios. El pulido de los portaobjetos y el acabado final se realizó a mano sobre una placa de

vidrio como base con carburo de silicio de 600 (15 μm) y óxido de silicio de 14.5 μm respectivamente.

Se identificaron los minerales presentes en cada roca por medio de sus propiedades ópticas; se usó un microscopio petrográfico marca Olympus modelo BX 60. Para la clasificación mineralógica modal, a cada lámina delgada se le hizo un conteo de puntos, con la pinza de cangrejo, y se realizaron tantos como fue posible según el tamaño de la superficie de la muestra en cada lámina. La platina se posicionó en un angulo de 270° y se fijó para hacer el conteo de puntos con la reglas de la pinza para desplazar la lámina. Éste se realizó con una resolución de un milímetro para cada punto (un milímetro tanto vertical como horizontalmente) ya que era la menor resolución para hacer un conteo preciso. Ya que en teoría el área debe ser igual al volumen, se repitió la contabilización de puntos en cristales grandes si éstos se repetían al desplazar la pinza. Una vez contados los puntos de los minerales primarios y accesorios, se sumaron los puntos de la plagioclasa (P), feldespato potásico (FK) y cuarzo (Q) igualándolo al 100 por ciento y se recalcularon las proporciones de dichos minerales para clasificarlos por medio de diagramas de Streckeisen (1973, 1979). Se utilizó un libro de minerales en sección delgada (Perkins y Henke, 2004) y tablas (Saggerson, 1975) para la identificación de los minerales.

Posteriormente se describieron las texturas minerales y relaciones espaciales entre dichas fases para determinar los procesos magmáticos que se llevaron a cabo en la formación de las rocas.

En la tabla 2 se presentan los resultados del conteo de puntos y la clasificación modal de todas las muestras analizadas en este trabajo. Los minerales accesorios se presentan en total, a continuación se desglosaron, y se muestran en letras cursivas. Los campos donde aparece un guión corto (-) son minerales que se incluyeron en el conteo de otro mineral, el cual se especifica en la descripción de la muestra.

Aunque en el campo se observó mineralización, en ninguna muestra de mano se identificaron sulfuros. Por lo tanto, todos los minerales opacos fueron descritos como óxidos.

Se consideraron microgabros a las rocas que tienen tamaño de la plagioclasa (el mineral mayoritario) de grano fino a medio. Además se consideró el tamaño de grano de los minerales máficos, el cual se menciona al final de cada clasificación. La mayoría de los gabros son microgabros excepto la muestra MZ-4 de Manzanillo.

Muestra	JLT-8A	JLT-12	JLT-13C	JLT-23	JLT-30-2	JLT-32	JLT-41	JLT-45	MZ-3	MZ-4
Plagioclasa (P)	388	401	268	378	339	384	284	380	422	449
Hornblenda	133	265	226	42	223	223	262	202	49	283
Clinopiroxeno	4	12	3	14	0	3	0	0	81	2
Ortopiroxeno	0	13	0	0	0	0	0	0	0	0
Biotita	29	0	0	28	0	1	0	5	0	3
Feldespato potásico (FK)	3	44	0	91	0	0	0	0	0	0
Cuarzo (Q)	0	0	0	59	0	0	0	0	0	0
Accesorios (total)	63	34	19	25	57	99	41	44	35	40
Óxidos	31	18	-	10	14	86	26	35	35	33
Titanita	19	0	0	0	24	0	0	9	0	0
Clorita	8	6	10	8	17	-	11	-	0	1
Epidota	5	0	1	0	2	5	1	-	0	4
Sericita	0	6	8	0	0	-	-	0	0	0
Calcita	0	4	0	7	0	8	3	0	0	2
Total	620	769	516	637	619	710	587	631	587	777
P+Q+FK	391	445	268	528	339	384	284	380	422	449
P (%)	99.23	90.11	100	71.59	100	99.2	100	100	100	100
Q (%)	0	0	0	11.17	0	0	0	0	0	0
FK (%)	0.76	9.88	0	17.23	0	0.78	0	0	0	0
Total (%) Clasificación	99.99 Microgabro de hornblenda, biotita y clinopiroxeno de grano medio.	99.99 Microgabro de hornblenda, ortopiroxeno y clinopiroxeno de grano medio.	100 Dique basáltico afanítico con xenolitos.	99.99 Cuarzo-monzodiorita de hornblenda, biotita y clinopiroxeno de grano medio.	100 Microgabro de hornblenda de grano fino.	99.98 Microgabro de hornblenda, clinopiroxeno y biotita de grano medio.	100 Microgabro de hornblenda y clinopiroxeno de grano medio.	100 Microgabro de hornblenda y biotita de grano fino.	100 Microgabro de clinopiroxeno y hornblenda de grano fino.	100 Gabro de hornblenda, biotita y clinopiroxeno de grano medio.

Tabla 2. Conteo de puntos y clasificación modal de las muestras analizadas en este trabajo.

En la figura 9 se presenta la clasificación modal de las muestras analizadas. Se utilizó el diagrama de rocas plutónicas (Figura 9A) para clasificar los gabros y granitoides; y el de volcánicas (Figura 9B) para clasificar el dique máfico.

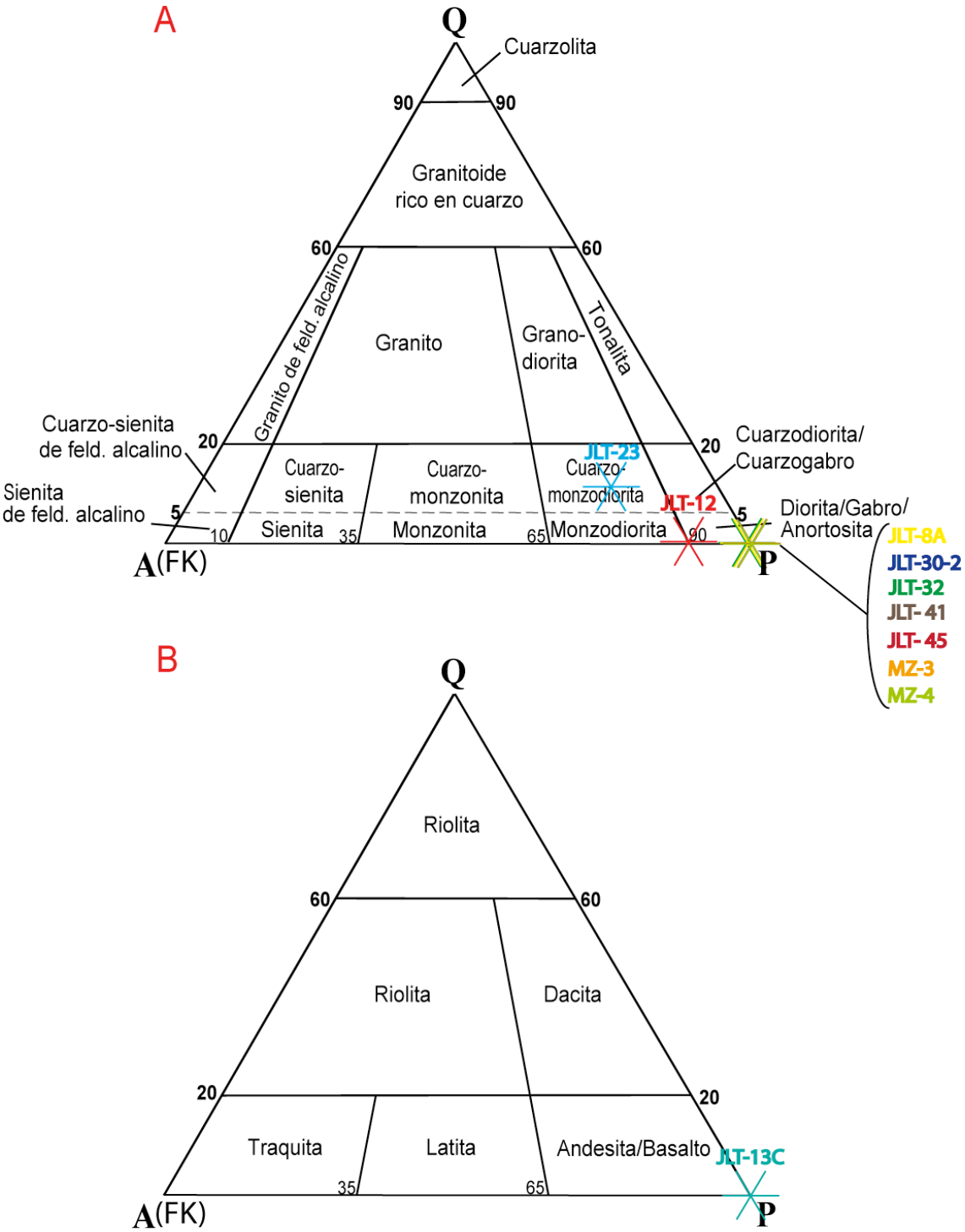

Figura 9. Clasificación modal de la muestras analizadas en este trabajo. A. Diagrama para rocas plutónicas (Streckeisen, 1973). B. Diagrama para rocas volcánicas (Streckeisen, 1979).

4.2. JLT-8A

Fases minerales: Plagioclasa, hornblenda, biotita, clinopiroxeno, óxidos, titanita, clorita, epidota.

Conteo de puntos: En las reglas de la pinza de cangrejo, el área que abarcó el conteo de puntos fue de 70-42 mm y 29-7 mm (616 mm cuadrados aproximadamente).

Clasificación (Figura 9A): Microgabro de hornblenda, biotita y clinopiroxeno de grano medio.

Texturas y relaciones espaciales entre fases minerales: La roca presenta una textura equigranular de grano medio. Las plagioclasas tienen formas anedrales aunque algunas presentan formas subedrales y menos euedrales. La longitud promedio de éstas es de 1 a 5 milímetros (grano medio). Los cristales más grandes dan la apariencia de ser fenocristales en una "matriz" de plagioclasas más pequeñas. Algunas plagioclasas se encuentran subredondeadas y cerca de ellas hay cristales pequeños de probable feldespato potásico. Éste último en ocasiones rellena intersticios entre minerales y en otros casos se encuentra junto a plagioclasas (Foto 17). Se han observado también pequeños cristales de feldespato potásico dentro de plagioclasas (textura antipertítica). Algunas plagioclasas presentan sericitización. Hay cristales de titanita (Foto 17).

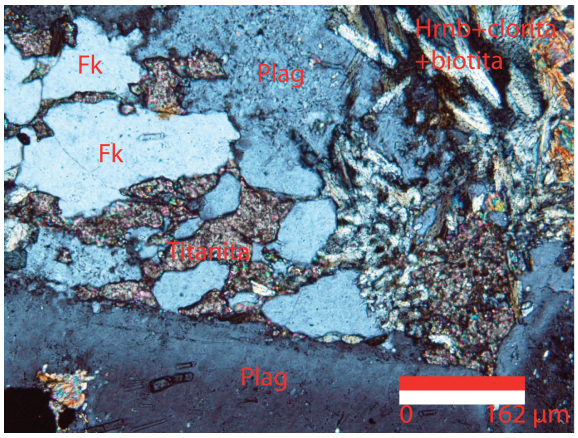

Foto 17. JLT-8A. Nícoles cruzados. 10X. Plagioclasas (Plag) en contacto con posible feldespato potásico (Fk), a su vez rodeado por titanita. Hay también cristales de hornblenda (Hrnb) cloritizados y biotita se observa en el extremo superior derecho e inferior izquierdo.

En general los minerales ferromagnesianos se encuentran muy alterados en la lámina. Se infiere que hay algunos cristales de clinopiroxeno porque presentan una figura OA positiva, pero no hay otras propiedades que las distingan de los anfíboles. Los anfíboles no se diferencian de las hornblendas mediante propiedades ópticas. Hay una hornblenda verde y otra parda, el color verde puede deberse a una cloritización completa pero no se determinó mediante propiedades ópticas. La forma de los cristales es anedral con tamaños de 1 a 5 mm (grano medio). La mayoría de los cristales de hornblenda están muy alterados y algunos presentan huecos producidos por corrosión (Foto 18A). Las hornblendas se encuentran cloritizadas y en ocasiones envuelven a cristales de epidota que están junto a cristales de ésta. Se observa biotita en varias zonas de la lámina, especialmente alrededor y a veces inmersa en hornblenda, probablemente por biotización. En algunos casos, cristales pequeños de epidota parecen estar intercrecidos con la biotita la cual está también cloritizada (textura simplectítica).

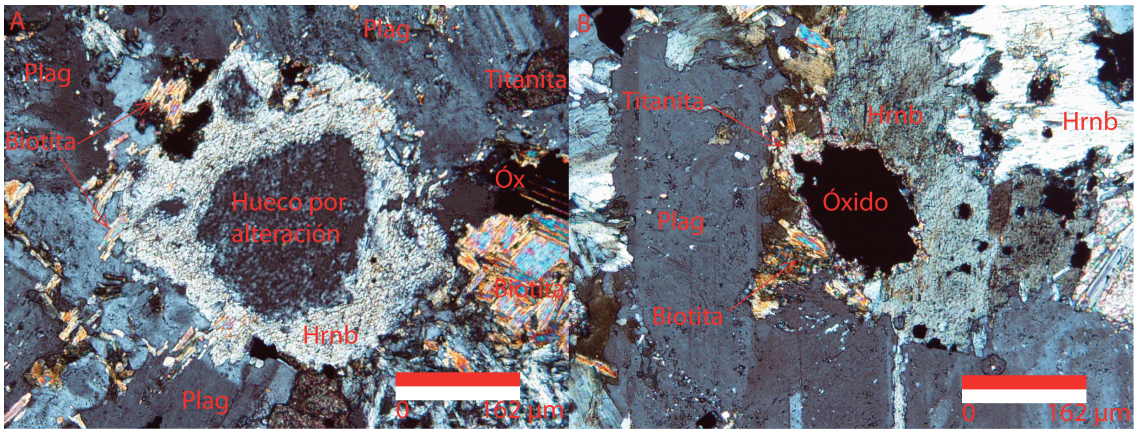

Foto 18. JLT-8A. Ambas fotos con nícoles cruzados. A. 10X. Hornblenda (Hrnb) alterada con cristales de biotita y epidota alrededor. Hay plagioclasas (Plag) alrededor. Se observa un óxido (Óx) con textura esqueletal relleno de biotita. Se observa también titanita. B. 10X. Óxido rodeado por cristales de titanita inmerso en hornblenda y biotita. También se observan plagioclasas.

Los opacos, algunos de los cuales presentan textura esqueletal, están rodeados casi siempre por titanita (Foto 18B). Si se tratase de un óxido rico en fierro y titanio (tal vez titanomagnetita), la titanita pudo formarse al ser requerido fierro para la formación de minerales como el clinopiroxeno y hornblenda lo que produce la perforación y bordes corroídos de los óxidos, y el titanio sobrante cristaliza como titanita.

Secuencia de cristalización: Las plagioclasas al parecer fueron de las primeras fases minerales en cristalizar y probablemente lo hicieron de forma continua conforme se enfrió el magma, como lo evidencian los cristales de plagioclasa subredondeados, que probablemente reaccionaron con el magma al enfriarse, y la presencia de cristales euedrales, que seguramente cristalizaron al final. Los óxidos seguramente fueron de las fases iniciales en cristalizar. Los posibles clinopiroxenos fueron los primeros silicatos ferromagnesianos que cristalizaron. Al cristalizar hornblenda, por una probable hidratación del sistema, los piroxenos pudieron ser sustituidos por ésta mediante uralitización, aunque no hay evidencia de ello. Sin embargo, es posible dada la similitud mineralógica con otros gabros. La textura esqueletal que presentan muchos óxidos seguramente se formó cuando los ferromagnesianos necesitaron el fierro para su formación y la titanita es producto del titanio liberado al ser destruido

el óxido. Una posible segunda generación de hornblenda estaría evidenciada por el hueco que presenta el cristal de hornblenda de la Foto 18A que se pudo producir por alteración, pero no hay otros cristales con las mismas características.

4.3. JLT-12.

Fases minerales: Plagioclasa, hornblenda parda, hornblenda verde botella, feldespato potásico, óxidos, ortopiroxeno, clinopiroxeno, clorita, sericita, calcita, titanita, epidota.

Conteo de puntos: En las reglas de la pinza de cangrejo, el área que abarcó el conteo de puntos fue de 6.5-29 mm y 40-70.5 mm (686 mm cuadrados aproximadamente).

Clasificación (Figura 9A): Microgabro de hornblenda, ortopiroxeno y clinopiroxeno de grano medio.

Texturas y relaciones espaciales entre fases minerales: La roca presenta en general una textura equigranular de grano fino a medio. Las principales fases minerales presentes son plagioclasas y anfíboles, en mucha menor proporción piroxenos. En algunos casos las plagioclasas tienen el aspecto de ser la matriz de los anfíboles, que parece una textura porfídica. Las primeras se presentan generalmente con una forma anedral pero son también los cristales que presentan la forma más subedral en la lámina. El tamaño es menor a 1 mm (grano fino). Con el método de Michel-Lévy se determinó su composición con 6 granos como 60% de componente anortítico (labradorita).
Un cristal anedral de ortopiroxeno con bordes de reacción presenta poca alteración y se encuentra inmerso en anfíbol (Foto 19). Se cree que hay otros ortopiroxenos rodeados por anfíboles aunque son difíciles de diferenciar por la gran alteración (cloritización) o sustitución por hornblenda que presentan (pseudomorfos, Foto 20A y B). Probablemente los ortopiroxenos se transformaron a anfíbol por uralitización y quedaron sólo algunos núcleos de ortopiroxeno sin alterar.

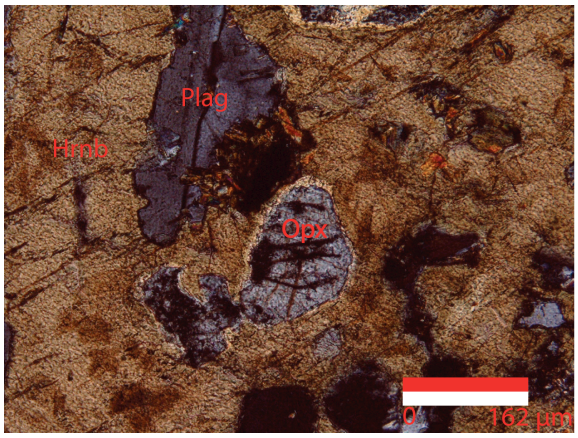

Foto 19. JLT-12. Nícoles cruzados. 10X. Ortopiroxeno (Opx) con borde de reacción inmerso en hornblenda (Hrnb). También hay plagioclasa (Plag).

No se diferenció el tipo de ortopiroxeno por la mínima presencia de cristales no alterados. Hay clinopiroxenos distinguibles de los anfíboles sólo por presentar una figura OA positiva (anfíboles y clinopiroxenos presentan generalmente cortes longitudinales) y tampoco fue identificado el tipo de clinopiroxeno del que se trata. Dada la asociación mineral puede ser que tanto ortopiroxenos como clinopiroxenos son férricos (probablemente hiperstena y augita respectivamente). Como se menciona en el capítulo 3, se corroboró la presencia de clinopiroxeno por análisis en microscopio electrónico de barrido. No se identificaron ortopiroxenos en dicho análisis.

Los dos tipos de anfíboles (pardo o verde oliva y verde claro) no fueron diferenciados con sus propiedades ópticas, pero dada su similitud con la hornblenda se cree que son tal. Ambas hornblendas son en su mayoría anedrales pero a veces subedrales y de tamaño de 1 a 5 mm (grano medio). Las hornblendas verdes son las más cloritizadas en comparación con las pardas. Fenocristales de hornblenda de ambos colores rellenan intersticios y rodean principalmente a plagioclasas, minerales opacos (óxidos) y a otras hornblendas y piroxenos (textura poikilítica, Foto 20A y B). Algunas tienen bahías rellenas de plagioclasa y feldespato potásico (textura esqueletal, Foto 20B).

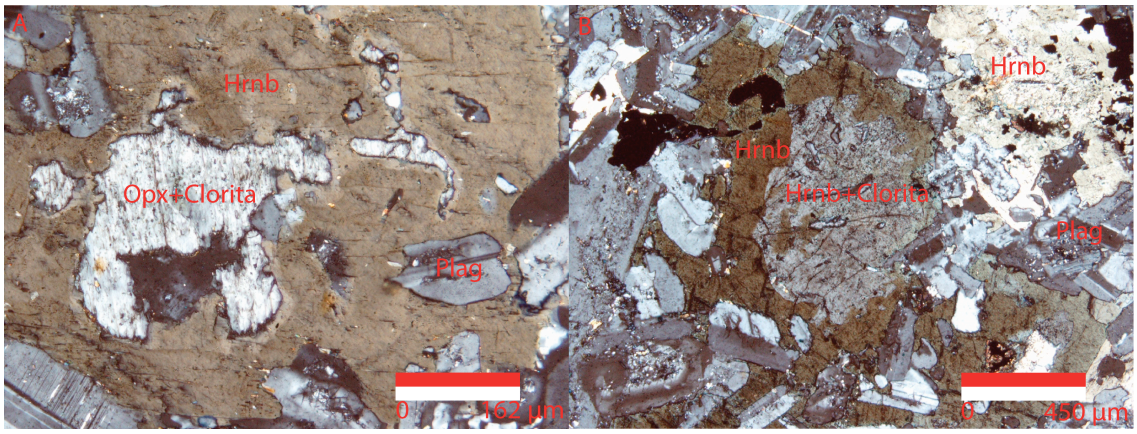

Foto 20. JLT-12. Ambas fotos con nícoles cruzados. A. 10X. Plagioclasas (Plag) y probable ortopiroxeno (Opx) sustituido por hornblenda (Hrnb) inmerso en otra generación de hornblenda. B. 4X. Hornblenda cloritizada y plagioclasas inmersas en otra hornblenda. Plagioclasas rellenando bahías de la hornblenda.

Se observó un cúmulo de cristales de hornblenda cloritizada rodeados por otra hornblenda cloritizada (textura cumulofírica o glomeroporfirítica). Algunas hornblendas presentan epidota y las plagioclasas sericita y algo de epidota (Foto 21A).

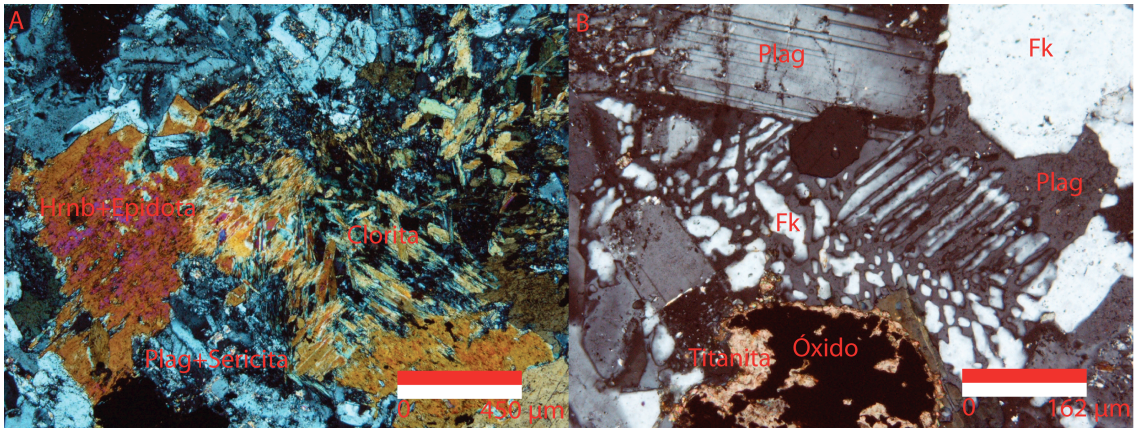

Foto 21. JLT-12. Ambas fotos con nícoles cruzados. A. 4X. Hornblenda (Hrnb) alterada a epidota y clorita, plagioclasas (Plag) sericitizadas. B. 10X. Textura antipertítica, un óxido es rodeado por titanita. Hay también plagioclasa y feldespato potásico (Fk).

Los óxidos presentan una textura esqueletal y están rodeados siempre por titanita tanto en los huecos como en la periferia (Foto 21B). Puede tratarse de titanomagnetita como se mencionó anteriormente. Hay también calcita presente a veces en forma de vetillas. Tanto la calcita como epidota presente en plagioclasas pudieron formarse por sausuritización al liberarse calcio y aluminio y aumentar sodio

al enfriarse el sistema (las primeras plagioclasas debieron ser más cálcicas que las segundas, aunque no hay evidencia de ello). Los cristales de feldespato potásico son anedrales y son los minerales presentes en menor proporción en la roca. En algunas zonas de la lámina se observaron cristales pequeños de feldespato potásico dentro de una plagioclasa (textura antipertítica) cercanos a otro feldespato potásico (Foto 21B). Ya que hay poco potasio en los resultados de fluorescencia de rayos X, el origen de la antipertita pudo ser por procesos metasomáticos tardíos que no afectó la composición global de la roca, ya sea por nucleación o por exsolución (saturación y falta de mezcla).

Secuencia de cristalización: Pudieron cristalizar primero los óxidos (posible titanomagnetita) y las plagioclasas con una composición igual o mayor a 60% anortita. Los ortopiroxenos y probables clinopiroxenos probablemente cristalizan a la par de los anteriores. Al hidratarse el magma, las hornblendas pudieron cristalizar (probablemente reemplazando además a orto y posibles clinopiroxenos). Durante estas etapas se forma la titanita con el titanio residual de la posible titanomagnetita. Continúa la cristalización de plagioclasas (más subedrales con una composición de 60% anortita) y hornblenda (subedral y menos alterada) rodeando a las hornblendas anteriores y a piroxenos cloritizados y/o sustituidos por hornblenda. Probablemente al final de esta segunda etapa pudo cristalizar también el feldespato potásico y producirse la antipertita.
La epidota, clorita y sericita pueden ser producto de intemperismo o de las últimas fases de cristalización.

4.4. JLT-13C

Fases minerales: Plagioclasa, óxidos, hornblenda, clorita, sericita, clinopiroxeno, epidota.

Conteo de puntos: Como se trata de una roca con matriz microcristalina (cristales muy pequeños muchos de los cuales no se pueden distinguir) con algunos fenocristales,

xenolitos y posibles xenocristales, se realizó un conteo de puntos utilizando el objetivo 40X. Se realizó el conteo milímetro por milímetro en el cruce de los hilos de una lámina con forma poligonal irregular cuya área no se determinó.
Dado que los óxidos se encuentran en todas las hornblendas, no se hizo un conteo separado de éstos.

Clasificación (Figura 9B): Dique basáltico afanítico con fenocristales y xenolitos.

Texturas y relaciones espaciales entre fases minerales: La roca tiene una textura afanítica con fenocristales y xenolitos. Es una matriz compuesta de cristales de grano fino que consiste en plagioclasas anedrales y subedrales con formas alargadas, a veces aciculares, de 70 µm en promedio (grano fino) las más largas de 320 µm y orientadas en un mismo sentido, lo que indica la dirección de flujo (textura traquítica). Se observaron pocos fenocristales de plagioclasa, algunos euedrales de hasta 620 µm (grano fino, Foto 22).

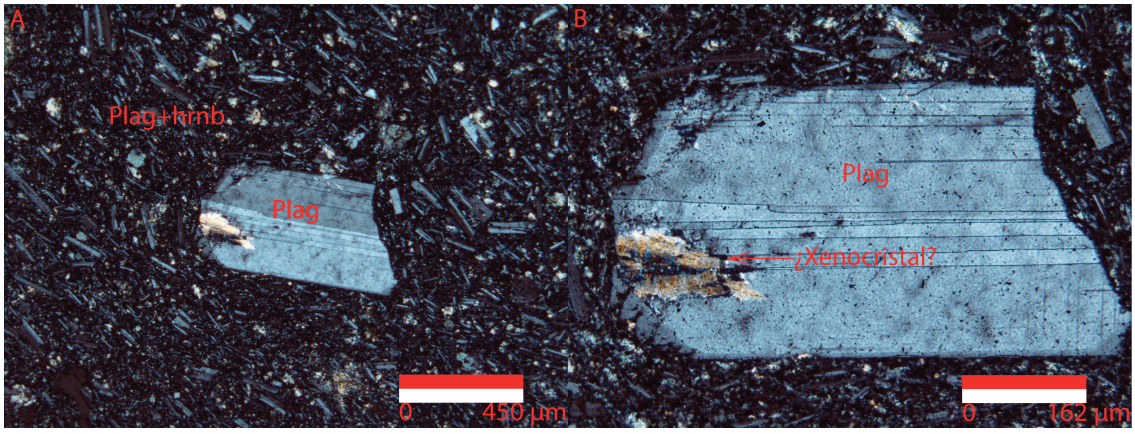

Foto 22. JLT-13C. Ambas fotos con nícoles cruzados. A. 4X. Un fenocristal subedral de plagioclasa (Plag) inmerso en una matriz de plagioclasa y hornblenda (Hrnb). B. 10X. Mismo fenocristal de A con mayor aumento, en el que se observa un posible xenocristal.

Algunos cristales, sobretodo los pequeños, tienen un alto grado de alteración a sericita en algunas zonas de la lámina. Ya que la mayoría de los cristales no presentan maclas polisintéticas, se determinó la composición de cuatro fenocristales con composición variable desde 60% a 68% anortita (labradorita) con el método de Michel-Lévy. No se observaron cristales de piroxenos, aunque podría haber

clinopiroxenos que presentan colores de interferencia distintos a la mayoría de los anfíboles. Sin embargo, no se pudo determinar ninguna propiedad óptica que indicara con certeza la diferencia dado lo pequeño y alterado de éstos. Se presentan cristales de anfíbol anedrales con tamaños de 120 µm en promedio (indistinguible de hornblenda). Muchas hornblendas están cloritizadas y otras tienen probablemente epidota. En cualquier caso los posibles clinopiroxenos tienen una proporción mucho menor a las hornblendas. Hay minerales opacos, que seguramente son óxidos con formas reticulares y esféricas con tamaños promedio de 70 µm aproximadamente, pero también algunos muestran textura esqueletal y bahías. Éstos se encuentran inmersos en todos los minerales máficos de la lámina pero no en las plagioclasas. También hay fenocristales de óxidos, algunos rodeados por hornblenda con tamaños de 300 µm en promedio. Se observó uno rodeado por hornblenda y epidota (Foto 23). No se encontró una evidencia clara que hiciera ver el tipo de óxido del que se trata, aunque deben de ser ricos en fierro como se explica más adelante, posiblemente magnetita.

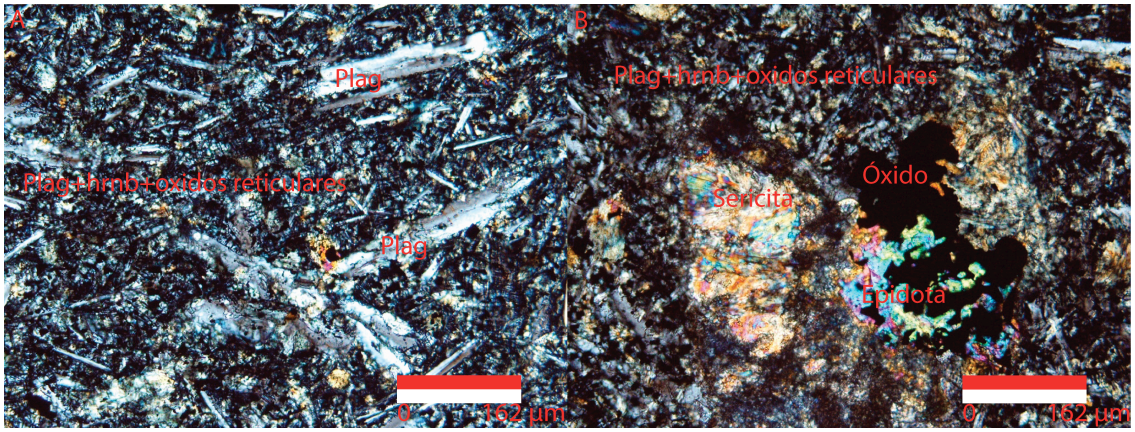

Foto 23. JLT-13C. Ambas fotos con nícoles cruzados. A. 10X. Fenocristales de plagioclasa (Plag) en una matriz compuesta por plagioclasa, hornblenda (Hrnb) y la textura de óxidos reticular presente en toda la lámina. B. 10X. Un mineral máfico sericitizado y un óxido esqueletal con epidota inmersos en la matriz de la roca.

Por otro lado, se observan xenolitos, algunos de los cuales presentan minerales poco alterados e identificables petrográficamente. Hay otros que están completamente alterados a clorita o a sericita. Un xenolito (1, Foto 24) euedral y con tamaño de 2.5 mm tiene cristales con forma de listón, uno de los cuales presenta forma bipiramidal posiblemente por macla con longitudes promedio de 500 µm. Puede tratarse de una

hornblenda maclada o tal vez de sillimanita. Además hay minerales fibrosos prismáticos blancos con una figura OA (+) que puede ser un clinopiroxeno, con birrefringencia muy baja o menos probablemente cordierita. También se observan minerales fibrosos prismáticos amarillos y blancos con una figura OA (-) poco clara que pueden ser hornblendas o clinopiroxenos con baja birrefringencia, o menos probablemente andalucita. Adicionalmente se vio un mineral con extinción recta y propiedades ópticas casi idénticas a las de un ortopiroxeno, posiblemente 40% hiperstena (por birrefringencia y ángulo 2V Foto 24). La presencia de posibles minerales máficos en el xenolito indicaría que se trata de un fragmento de composición máfica. La presencia de silicoaluminatos indicaría que se trata de un fragmento sedimentario.

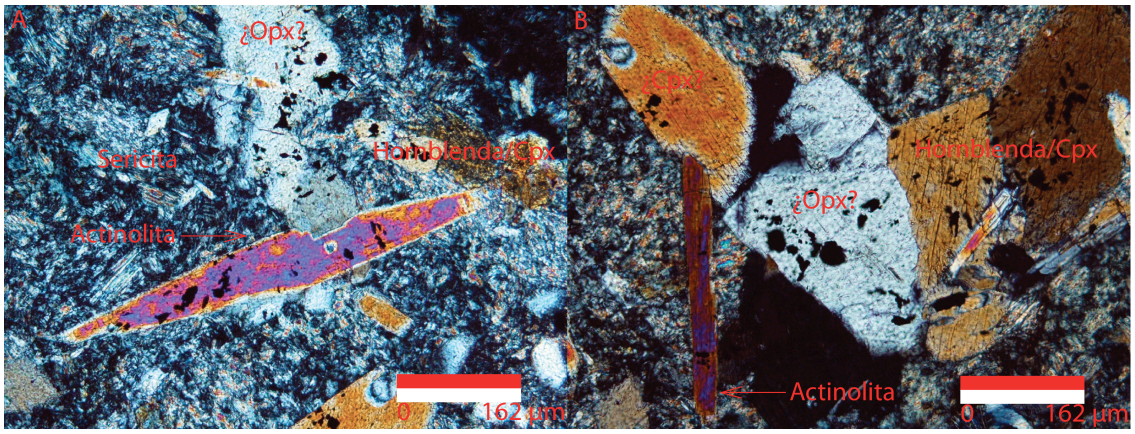

Foto 24. JLT-13C. Xenolito 1. Ambas fotos con nícoles cruzados. A. 10X. Cristal bipiramidal de actinolita en medio de minerales muy sericitizadas, un cristal de posible ortopiroxeno (Opx) y cristales de hornblenda (Hrnb) y clinopiroxeno (Cpx). B. 10X. Posibles cristales de ortopiroxeno (blanco), clinopiroxeno y hornblenda (amarillos) junto con cristales alargados de actinolita.

Otro xenolito (2, Foto 25A) de 2.25 mm está compuesto principalmente por cristales fibrosos prismáticos blancos y amarillos de tamaño variable de hasta 875 µm con algunas propiedades ópticas parecidas a la hornblenda, clinopiroxeno y menos probablemente andalucita, aunque presenta también clorita principalmente en la periferia, como borde de reacción (Foto 25A). Se observa otro xenocristal (Foto 25B).

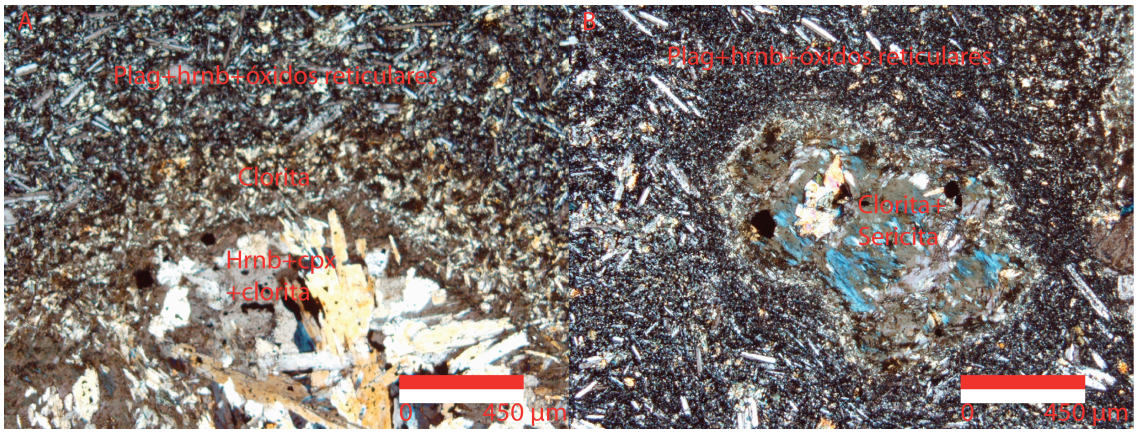

Foto 25. JLT-13C. Xenolito 2 y xenocristal. Ambas fotos con nícoles cruzados. A. 4X. Un xenolito con cristales de hornblenda (Hrnb), clinopiroxeno (Cpx) y algunas cloritas con un borde de reacción con probable clorita rodeado por la matriz de plagioclasa (Plag), hornblenda y óxidos reticulares. B. 4X. Xenolito muy alterado a clorita y menos cantidad de sericita rodeado por la matriz de la roca.

Para aclarar lo anterior se realizó un análisis semi-cuantitativo en un microscopio electrónico de barrido Hitachi TM-1000 Tabletop Microscope en dos xenolitos que fueron previamente delimitados con plumón bajo un microscopio petrográfico. Los valores obtenidos fueron calculados por el aparato calibrado en el Laboratorio de Petrología y Mineragrafía del Instituto de Geofísica de la UNAM.

Se realizó una compilación de los elementos mayores reportados por Deer et al. (1966) para los anfíboles, piroxenos, plagioclasas, feldespatos potásicos, micas, silicoaluminatos, grupo de la epidota, grupo de la serpentina, y grupo de la clorita (Deer et al., 1992); y se compararon con los resultados obtenidos de los dos cristales mediante un error relativo: |valor medido-valor reportado/valor reportado|x100 para cada elemento de cada mineral de los grupos mencionados. Posteriormente se sumaron los distintos errores para obtener un error total para cada mineral. Donde se presenta el menor error total (menor diferencia de los valores obtenidos con los reportados) puede ser el mineral del que se trata.

Xenolito 1.

Se realizaron cuatro análisis dentro del xenolito, en los cuales se consideraron las diferencias en color, hábito y textura de los cristales que se pudieron observar (Figura 10). Se observa sólo el área general analizada, no los análisis puntuales. Al comparar

los resultados obtenidos con los análisis de los grupos minerales mencionados, el menor error del análisis del punto 1 corresponde a una ferroaugita. El punto 2 corresponde a una actinolita, aunque hay muy poca diferencia respecto a una ferroaugita. El punto 3 corresponde a una hornblenda de basalto (alto fierro y titanio) y el punto 4 a una epidota, aunque no contiene magnesio en los análisis reportados por Deer et al. (1966). Por ello se restó dicho elemento de la suma total del análisis y se recalcularon los demás, para ver si no se trataba del siguiente mineral con menor error (una hornblenda) pero no fue así y sí se trató de una epidota (Figuras 11 y 12). Aunque no se analizó ningún ortopiroxeno, la asociación mineral observada corresponde a un fragmento máfico metamorfizado, por la presencia de actinolita, lo que concuerda con el ambiente geológico local.

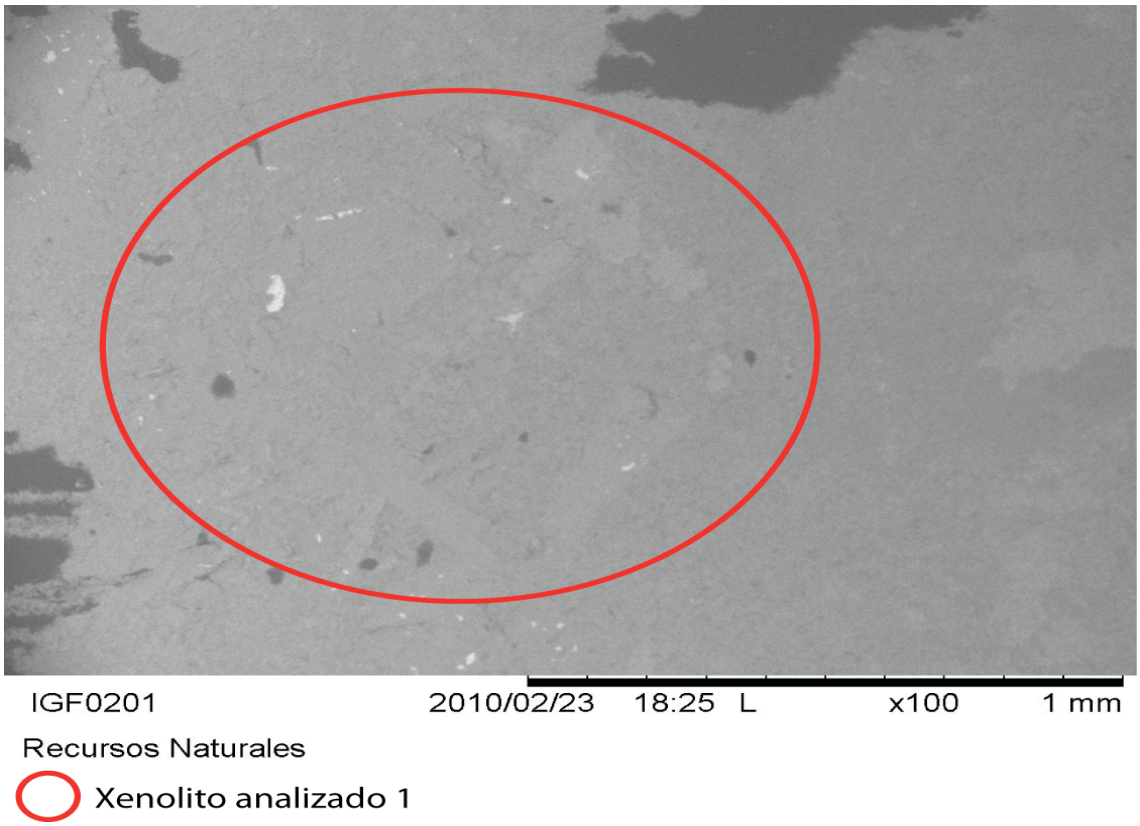

Figura 10. Muestra JLT-13C, xenolito 1. Fotografía tomada con el microscopio electrónico Hitachi TM-1000. El xenolito analizado se encuentra dentro del elipse rojo.

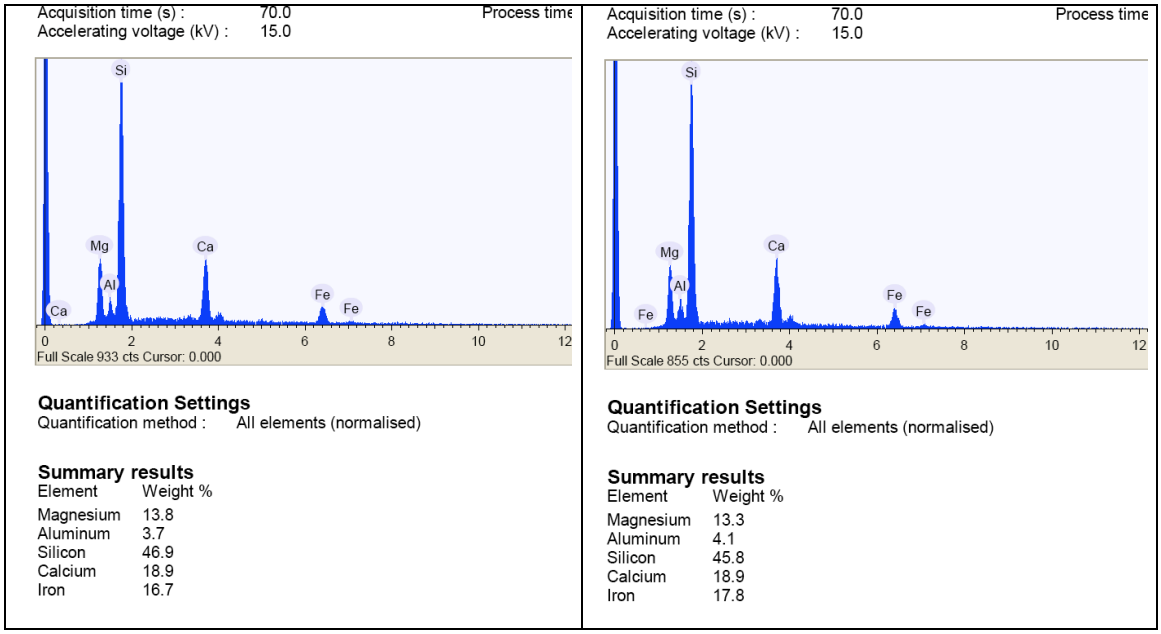

Figura 11. Análisis del punto 1 (izquierda) y del punto 2 (derecha) del xenolito 1.

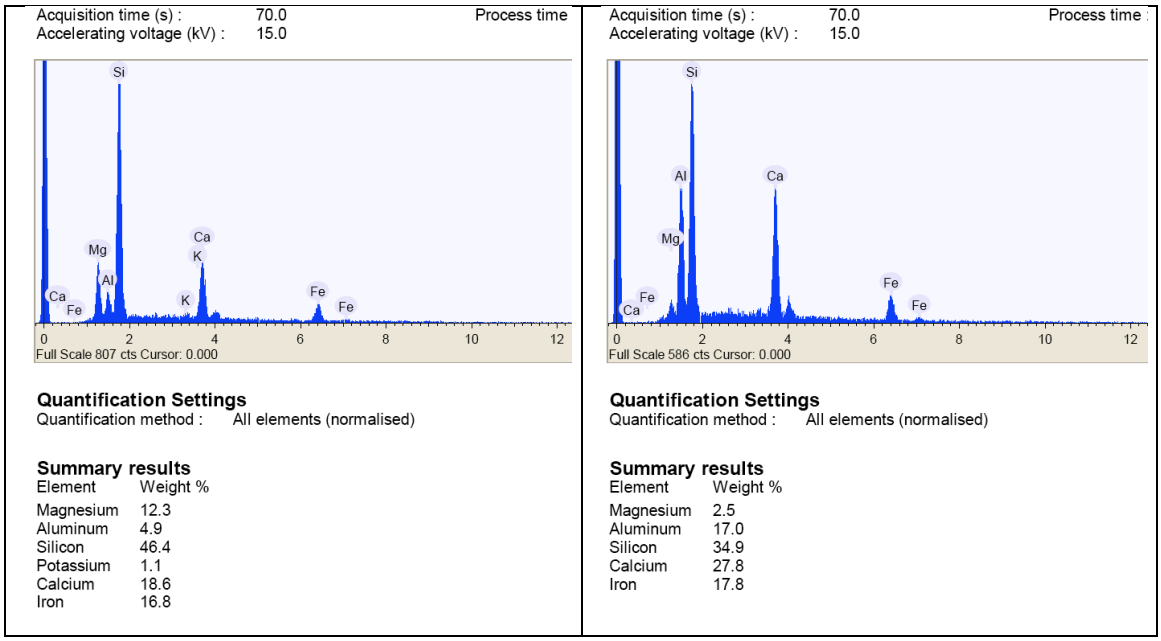

Figura 12. Análisis del punto 3 (izquierda) y del punto 4 (derecha) del xenolito 1.

Xenolito 2.

Se realizaron también cuatro análisis dentro de este xenolito donde se consideraron los mismos parámetros del primero (Figura 13). Al comparar los resultados obtenidos, el menor error del análisis del punto 1 corresponde a una ferroaugita. El punto 2 corresponde a una epidota, que se obtuvo al restar el magnesio de la suma

total del análisis y recalculando los demás elementos para ver si no se trataba del siguiente mineral con menor error (una hornblenda de basalto). Sin embargo, se trató de una epidota. El punto 3 era aparentemente una epidota, pero al restar el magnesio de la suma total del análisis y al recalcular los demás, resultó ser el siguiente mineral con menor error, una ferroaugita. El menor error del punto 4 corresponde a una muscovita. Sin embargo, seguramente se trata de sericita, posiblemente producto de alteración de plagioclasas (Figuras 14 y 15). La asociación mineral observada muestra que se trata de un fragmento máfico sin componente sedimentario.

Figura 13. Muestra JLT-13C, xenolito 2. Fotografía tomada con el microscopio electrónico Hitachi TM-1000. El xenolito analizado se encuentra dentro del elipse rojo.

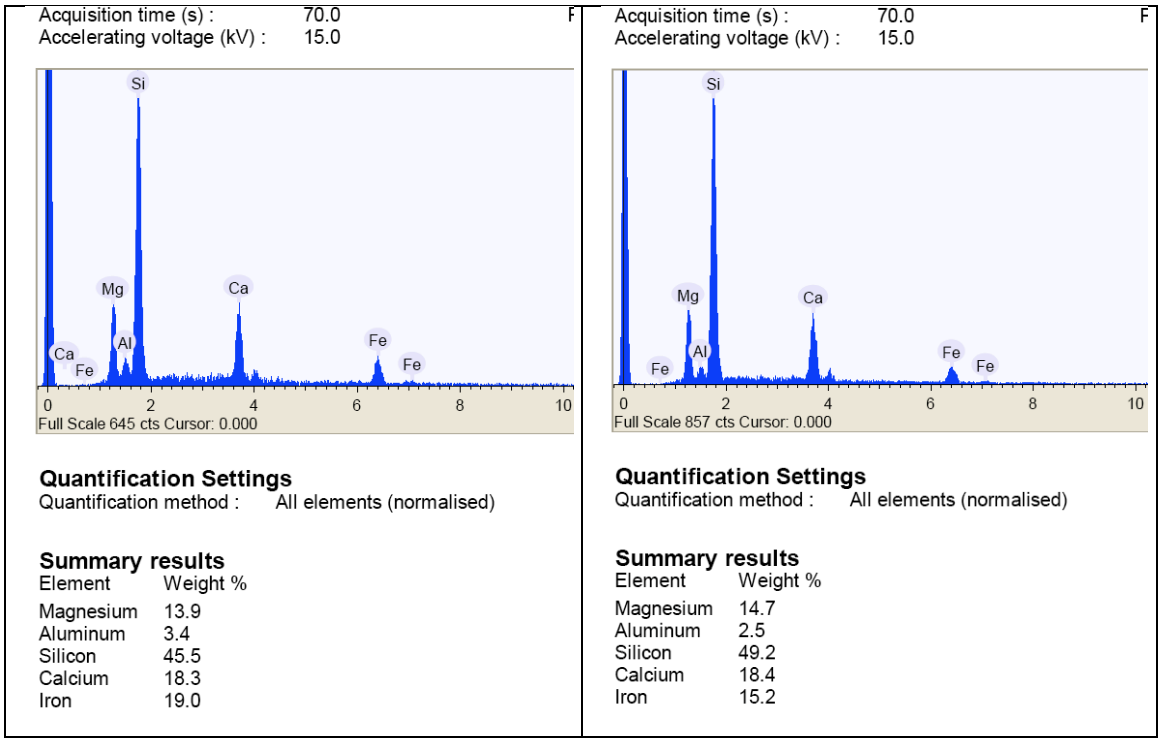

Figura 14. Análisis del punto 1 (izquierda) y del punto 2 (derecha) del xenolito 2.

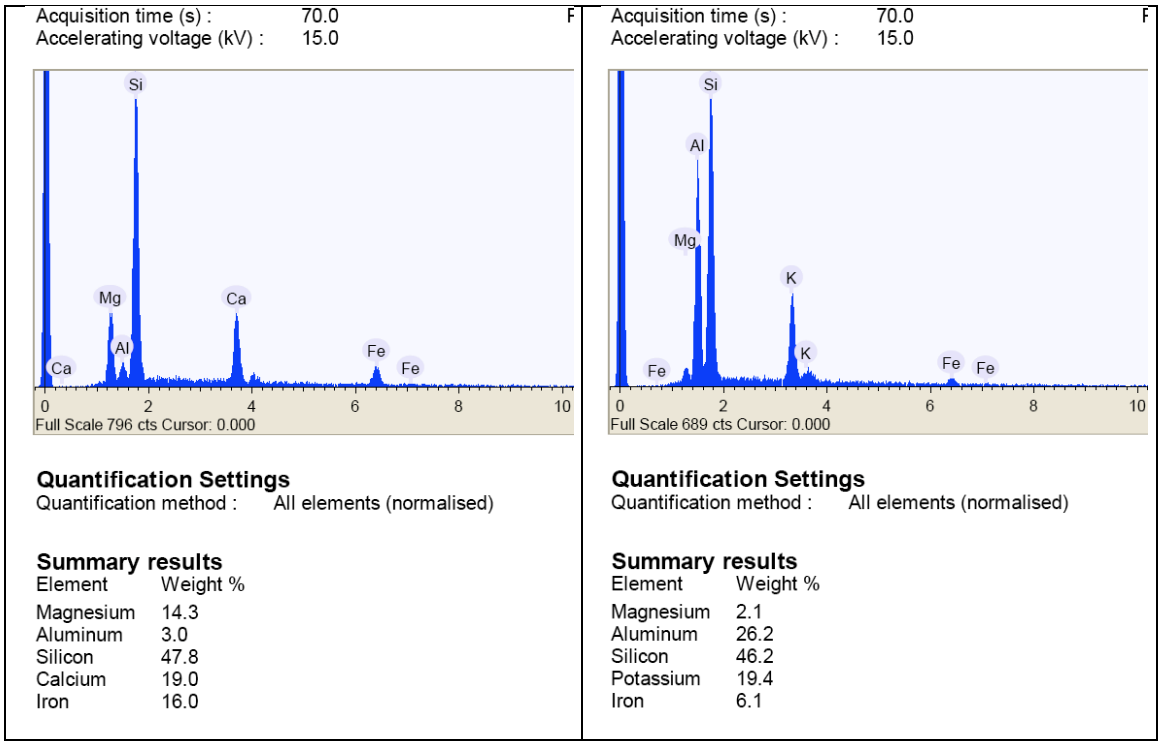

Figura 15. Análisis del punto 3 (izquierda) y del punto 4 (derecha) del xenolito 2.

En una plagioclasa subedral (Foto 22) se observa un posible xenocristal ya que no hay ese tipo de minerales en la matriz. Además hay xenolitos alterados muy homogéneamente (a clorita o sericita) lo que puede indicar que se trataba de xenocristales, pero no se sabe con certeza.

Secuencia de cristalización: Los fenocristales de plagioclasa fueron probablemente los primeros en cristalizar si se piensa que los euedrales y subedrales se forman a partir de los primeros núcleos con la composición y el espacio suficiente para desarrollarse en la cámara magmática. Probablemente los óxidos de mayor tamaño cristalizan simultáneamente a las primeras plagioclasas. Los posibles piroxenos cristalizarían mientras también se cristalizan las plagioclasas y los óxidos conforme se enfría el sistema. Las hornblendas cristalizan por una hidratación del sistema o simplemente por la reducción en la temperatura de éste. Para ello requieren de fierro, que proporcionaron los óxidos, lo que provoca la textura reticular de éstos. Los xenolitos analizados son completamente máficos, con ningún mineral que evidencie la presencia de un componente sedimentario. Dichos xenolitos y posibles xenocristales son seguramente arrastrados de las paredes donde se emplaza el dique, aunque no se sabe a qué profundidad. La clorita y la epidota presentes en las hornblendas, en los xenolitos y posibles xenocristales seguramente se debe a alteración hidrotermal o a alteración meteórica.

4.5. JLT-23

Fases minerales: Plagioclasa, feldespato potásico, cuarzo, hornblenda, biotita, clinopiroxeno, óxidos, clorita, calcita, titanita, epidota, sericita, zircón.

Conteo de puntos: En las reglas de la pinza de cangrejo, el área que abarcó el conteo de puntos fue de 70.5-39.5 mm y 29-11 mm (558 mm cuadrados aproximadamente).

Clasificación (Figura 9A): Cuarzo-monzodiorita de hornblenda, biotita y clinopiroxeno de grano medio.

Texturas y relaciones espaciales entre fases minerales: La roca tiene una textura equigranular de grano medio. Las principales fases presentes en esta muestra son las plagioclasas y los anfíboles.

Se presentan cristales de plagioclasa en su mayoría subedrales y algunos euedrales de tamaño promedio de 1-5 mm (grano medio). Algunos presentan zoneamiento químico muy claro (Foto 26A) y en ocasiones engolfamiento. Algunas veces las plagioclasas están inmersas en anfíbol. La composición fue estimada por el Método de Michel-Lévy con 6 cristales, como de 52% componente anortítico (Labradorita).

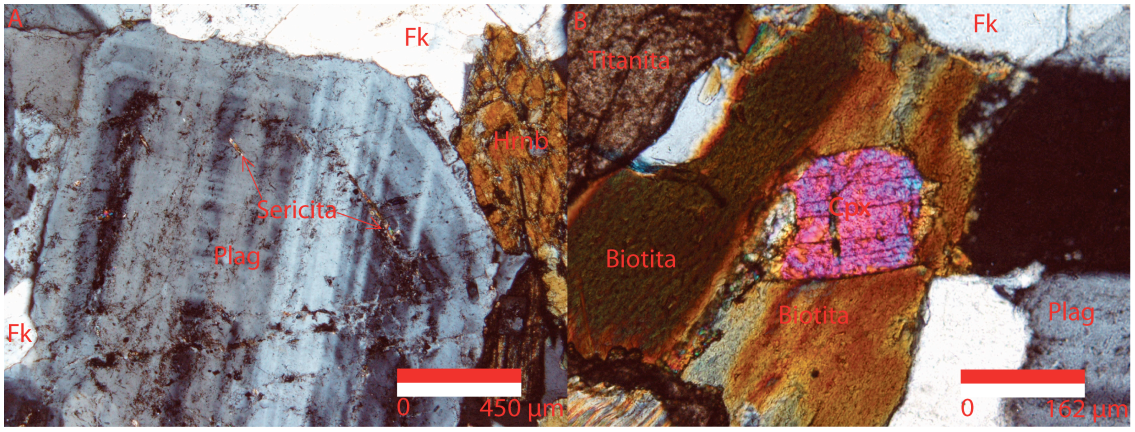

Foto 26. JLT-23. Ambas fotos con nícoles cruzados. A. 4X. Plagioclasa (Plag) con zoneamiento, sericitizada y rodeada por hornblenda (Hrnb) y feldespato potásico (FK). B. 10X. Clinopiroxeno (Cpx) inmerso en biotita. Hay plagioclasas, feldespato potásico y titanita.

Se distinguió un cristal pequeño de clinopiroxeno anedral (Foto 26B) que presenta una clara dirección de crucero y extinción oblicua (corte longitudinal) en medio de una biotita en el que no se observan bordes de reacción. No se determinó el tipo de clinopiroxeno porque fue el único cristal identificado como tal.

Los anfíboles tienen formas en general anedrales con tamaños de 1 a 5 mm (grano medio). Sus propiedades ópticas son muy similares a la hornblenda. Presentan colores de interferencia anómalos, algunas veces causados por alteración. Gran parte de los cristales están cortados longitudinalmente por lo que impiden que se aprecien los planos de crucero. Se observan también varios cristales de hornblenda maclados (Foto 27).

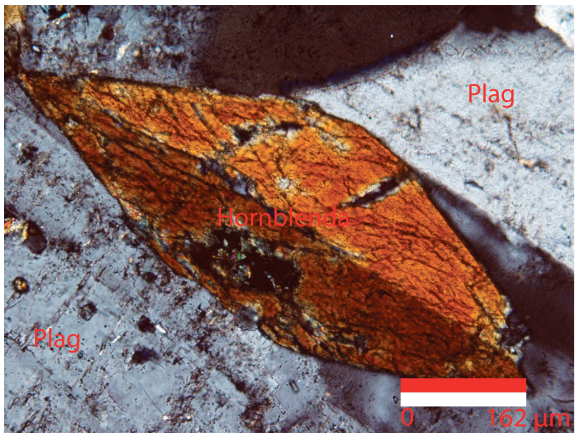

Foto 27. JLT-23. Nícoles cruzados. 10X. Hornblenda maclada rodeada por cristales de plagioclasa (plag).

El segundo mineral máfico más abundante después de la hornblenda es la biotita. Presenta formas anedrales con tamaños promedio de 1 a 5 mm (grano medio). Ya que el ángulo 2V en biotita es casi cero, la figura de interferencia parece uniáxica (es biáxica negativa) con isocromas, que en este caso está descentrada, lo que impide ver la pequeña separación de las isogiras. Muchas biotitas tienen cortes longitudinales lo que impide que se observe su crucero. Se encontraron zircones dentro de cristales de biotita (Foto 28A). Algunos cristales de biotita tienen colores de interferencia anómalos debido a alteración (Foto 28B).

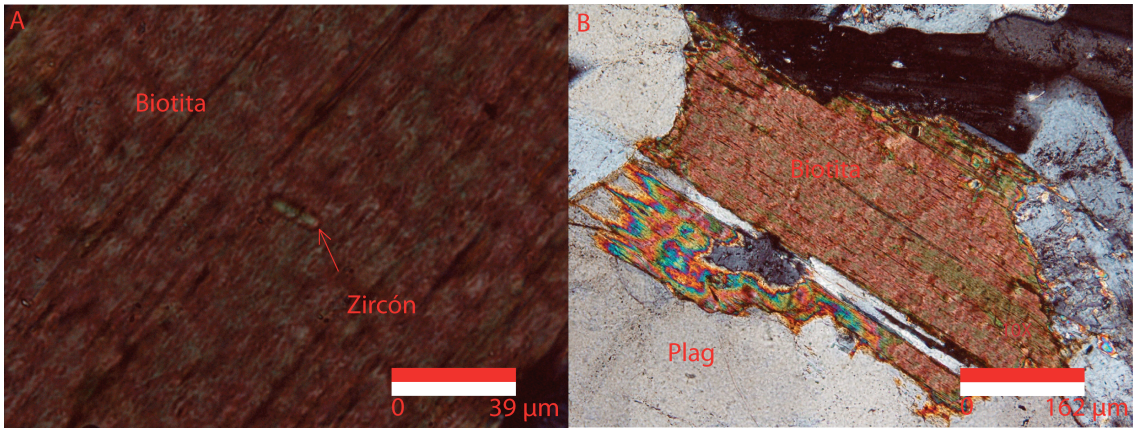

Foto 28. JLT-23. Ambas fotos con nícoles cruzados. A. 40X. Zircón inmerso en cristal de biotita. B. 10X. Biotita rodeada por cristales de plagioclasa (plag). Se observa un cristal con colores de interferencia anómalos por alteración.

Se identifican dos tipos principales de feldespato potásico (ortoclasa y microclina, Foto 29A) aunque su proporción respecto a plagioclasa es poca. Hay también

presencia de cuarzo aunque en menor proporción a las plagioclasas. El cuarzo se distingue de las plagioclasas y feldespatos por la ausencia de sericita, ya que muestra figura uniáxica descentrada. Se observan óxidos que no están siempre asociados a titanita como en la muestra anterior (no se observan bordes corroídos o perforaciones en los óxidos con titanita alrededor, aunque sí se vieron algunos óxidos anedrales inmersos en titanita). Sin embargo, por la presencia de titanita pueden ser titanomagnetita.

Los minerales de alteración son clorita de las hornblendas y biotitas, epidota de minerales máficos y de plagioclasas por sausuritización, lo que posiblemente produce también la sericita. Ésta afecta a feldespatos potásicos y plagioclasas (Foto 29B).

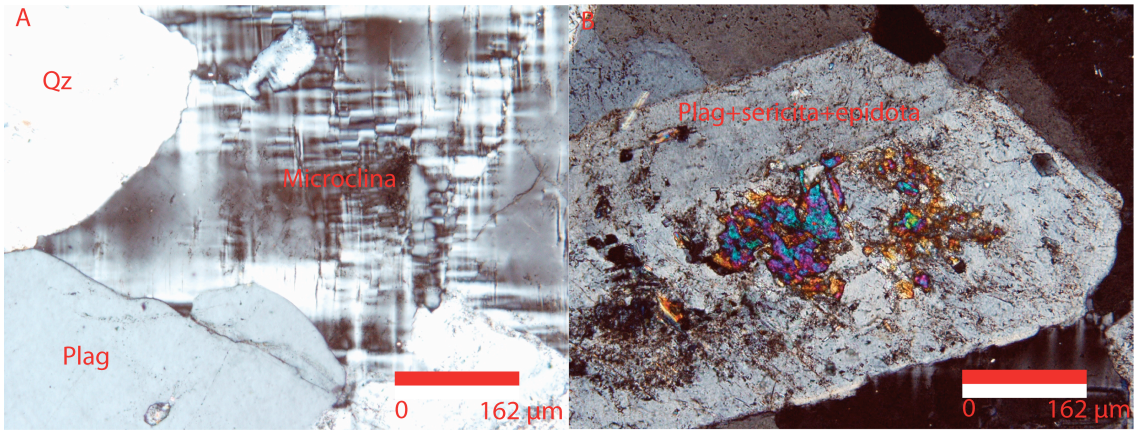

Foto 29. JLT-23. Ambas fotos con nícoles cruzados. A. 10X. Microclina rodeada por cuarzo (Qz) y plagioclasa (Plag). B. 10X. Una plagioclasa subedral con alteración de sericita y epidota.

Secuencia de cristalización: La posible secuencia de cristalización de las diferentes fases minerales puede haber sido óxidos, plagioclasas y clinopiroxeno. Después cristalizan la hornblenda, biotita, microclina, ortoclasa y cuarzo al último. El zoneamiento químico de las plagioclasas (si el fundido no estaba en equilibrio con el cristal) puede indicar los cambios en la composición del sistema conforme éste se enfriaba. La sausuritización se llevó a cabo posiblemente al enfriarse el sistema, cuando se libera el calcio y aluminio conforme éste se volvía más sódico (las últimas plagioclasas en cristalizar o el zoneamiento exterior deben ser más sódicos). La cloritización de hornblendas y biotita y la sericitización se pudo dar por intemperismo o por las últimas fases de cristalización. En general la roca presenta bastantes cristales subedrales (sobre todo las plagioclasas y feldespatos) de grano

medio lo que indica que su cristalización (enfriamiento del sistema) no fue muy veloz. Muchos de los fenocristales de plagioclasa por ejemplo presentan fracturamiento y algunas de las maclas se ven ligeramente deformadas, seguramente por la deformación que sufrió la roca después de su cristalización.

4.6. JLT-30-2

Fases minerales: Plagioclasa, hornblenda, titanita, clorita, óxidos, epidota.

Conteo de puntos: En las reglas de la pinza de cangrejo, el área que abarcó el conteo de puntos fue de 70-40 mm y 29-6 mm (690 mm cuadrados aproximadamente).

Clasificación (Figura 9A): Microgabro de hornblenda de grano fino.

Texturas y relaciones espaciales entre fases minerales: La roca presenta una textura equigranular de grano fino. La mayoría de las plagioclasas son anedrales y algunas subedrales con dimensiones de 0.8 milímietros como máximo (grano fino). Todas están bastante sericitizadas. Por dicha alteración no se observan maclas polisintéticas y sólo se ven maclas de Carlsbad por lo que no se pudo determinar su composición. En un cristal de plagioclasa hay cristales pequeños de probable calcita, ya que presenta muy altos colores de interferencia y una figura uniáxica con isocromas. Excepcionalmente se observa también algo de epidota. No se ven piroxenos ni minerales que envuelvan a posibles cristales alterados de éstos. Los anfíboles presentan formas anedrales y en excepciones subedrales con tamaños de 0.3 milímetros en promedio (grano fino). No se distinguen de la hornblenda. Hay cristales pardos y verde claro con nícoles cruzados que puede deberse a dos tipos de anfíbol. Se observan hornblendas que rodean y rellenan huecos de posibles óxidos. Muchas de las hornblendas están cloritizadas y algunas han sido sustituidas completamente por ésta. Varias presentan epidota (Foto 30).

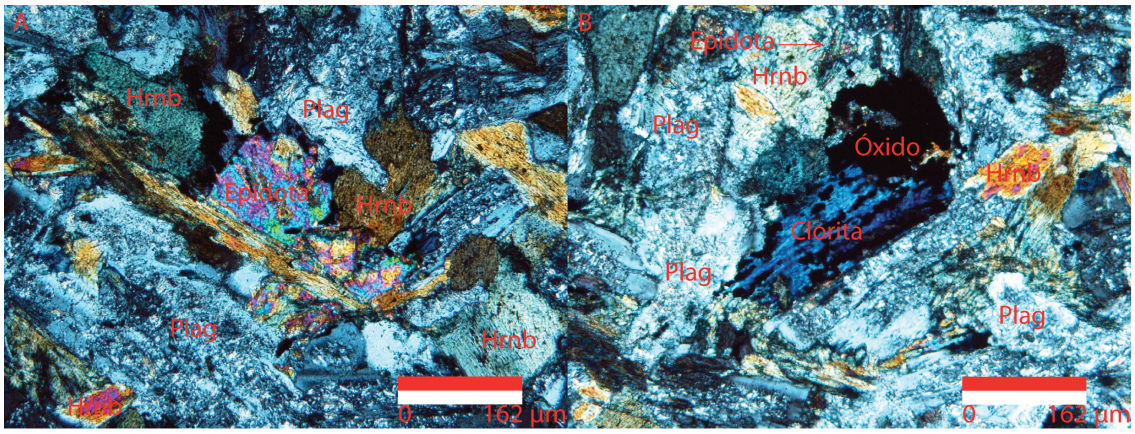

Foto 30. JLT-30-2. Ambas fotos con nícoles cruzados. A. 10X. Hornblenda (Hrnb) verde y pardo con epidota. Plagioclasas (Plag) están sericitizadas. B. 10X. Posiblemente una hornblenda que rodea a un óxido esqueletal que ha sido alterado a clorita. Hay además cristales de plagioclasa y hornblenda.

Se observan cristales de titanita en varias partes de la lámina y que en ocasiones rodean a algunos posibles óxidos. Los minerales opacos tienen tamaños menores a un milímetro (grano fino) salvo un fenocristal de 2 milímetros de longitud que envuelve a un pequeño cristal de plagioclasa. Además de éste, algunos presentan en los bordes un lustre rojo lo que puede indicar que se trata de hematita (Foto 31).

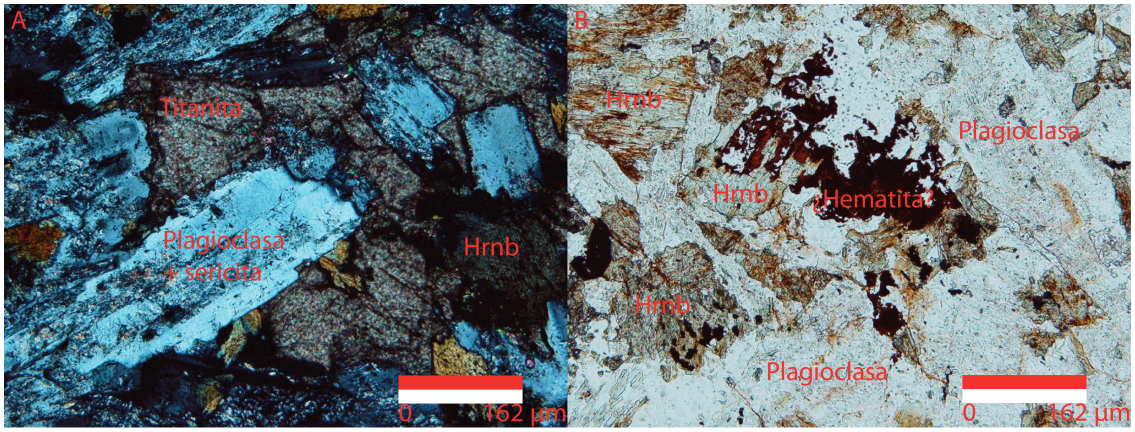

Foto 31. JLT-30-2. Ambas fotos con nícoles cruzados. 10X. A. Plagioclasa sericitizada rodeada por titanita y hornblenda (Hrnb). B. Posible hematita bordeada en algunas partes por hornblenda y plagioclasas.

En una pequeña zona de la lámina se observa una coloración rojiza en todos los minerales que pudo formarse por la alteración hidrotermal o meteórica de dichos óxidos. Sin embargo, la presencia de titanita alrededor de algunos de éstos puede indicar que hay otro óxido rico en titanio como la titanomagnetita. La mayoría de los óxidos tienen textura esqueletal.

Secuencia de cristalización: Seguramente las plagioclasas son las primeras fases en cristalizar. Algunos óxidos cristalizan después (por el pequeño cristal de plagioclasa inmerso en el fenocristal de posible hematita) aunque tal vez otros cristalizan al mismo tiempo o incluso antes que las plagioclasas (la posible titanomagnetita y algunos cristales corroídos). Al no observarse piroxenos se puede decir, o bien que no hubo, o que han sido completamente sustituidos por hornblenda y/o removidos por alteración dado que es relativamente alta. Posteriormente cristalizan las hornblendas, para lo cual se requiere que el sistema estuviera hidratado, aunque no hay evidencia de una hidratación posterior a la primera cristalización del magma (piroxenos inmersos en hornblenda). En esta etapa probablemente el fierro de los óxidos es utilizado por la hornblenda y eso provoca la textura esqueletal de los primeros. También se produce la titanita al quedar liberada al ser destruído el óxido. La presencia excepcional de probable calcita y epidota puede deberse a la sausuritización de plagioclasas que ocurre cuando el sistema se vuelve rico en sodio y disminuye el calcio conforme se enfría. La clorita y epidota presente en las hornblendas puede deberse a alteración hidrotermal o meteórica posterior.

4.7. JLT-32

Fases minerales: Plagioclasa, hornblenda, óxidos, calcita, epidota, clinopiroxeno, biotita, titanita, clorita, sericita.

Conteo de puntos: En las reglas de la pinza de cangrejo, el área que abarcó el conteo de puntos fue de 70-40 mm y 29-6 mm (690 mm cuadrados aproximadamente).
Ya que más del 60% de las hornblendas se encuentran cloritizadas y no hay clorita por si sola, ésta no se consideró como un mineral aparte en el conteo de puntos. En el caso de la sericita en plagioclasas, se consideró lo mismo.

Clasificación (Figura 9A): Microgabro de hornblenda, clinopiroxeno y biotita de grano medio.

Texturas y relaciones espaciales entre fases minerales: La textura de la roca es equigranular de grano medio. Se observan plagioclasas en su mayoría anedrales de tamaño promedio de 1 a 5 mm (grano medio). Sin embargo, también se presentan cristales subedrales y euedrales. Gran parte de los cristales están sericitizados (50% aproximadamente) indistintamente de la forma del cristal y en diferentes zonas de la roca. Algunos cristales no presentan nada de sericitización, pero otros tienen una pequeña cantidad de epidota. Mediante el método de Michel-Levy, utilizando seis granos, se determinó la composición de las plagioclasas como 53% de componente anortítico (labradorita). En muy pocos cristales de plagioclasa se identificaron algunos cristales de feldespato potásico (textura antipertítica).

Se identificó la presencia de clinopiroxeno por la figura óptica (OA) positiva, aunque el hábito que muestra no se distingue de los anfíboles. Sin embargo, hay casos donde se observan cristales alterados con una sola dirección de crucero y relieve alto cuyas propiedades ópticas no se pudieron determinar pero que pueden tratarse de clinopiroxenos (tampoco tienen extinción recta) rodeados por anfíbol (Foto 32). Pueden sugerirse también dos generaciones de anfíbol.

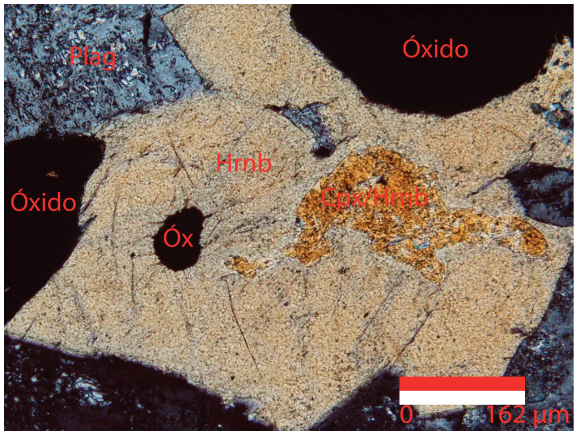

Foto 32. JLT-32. Nícoles cruzados. 10X. Cristal de hornblenda (Hrnb) rodeando a otro cristal de clinopiroxeno (Cpx) u hornblenda. Se observan también óxidos (Óx) y plagioclasas (Plag).

Los anfíboles son de color pardo y verde observados con luz paralela, además del color verde característico de la clorita que algunos pardos presentan por alteración. Puede ser que los verdes son anfíboles completamente sustituidos por clorita. Las propiedades ópticas de ambos tipos de anfíbol no se distinguen de la hornblenda. Los

tamaños de los cristales promedio son de 1 a 5 mm (grano medio) con los cristales más grandes con una longitud mayor a 3 mm. Algunas hornblendas están muy alteradas a clorita y otras a epidota. También hay hornblendas sin alteración que rodean a otras hornblendas alteradas y a cristales de óxidos, plagioclasas euedrales y posibles piroxenos (Foto 33 A y B).

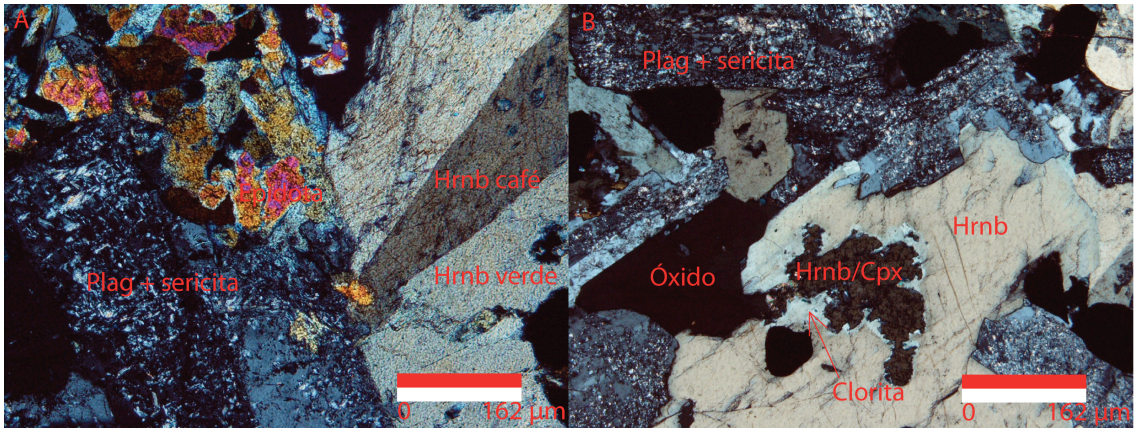

Foto 33. JLT-32. Ambas fotos con nícoles cruzados. 10X. A. Distintos tipos de hornblenda (Hrnb), algunas con epidota; plagioclasas (Plag) con sericita. B. 10X. Un cristal de hornblenda o clinopiroxeno (Cpx) cloritizado rodeado por hornblenda. Se observan también plagioclasas sericitizadas y un óxido.

La roca presenta minerales opacos que por similitud mineralógica con otras muestras de gabro pueden ser titanomagnetita, aunque en este caso no se observan cristales muy corroídos o perforados. Hay titanita anedral rodeándolos parcialmente (Foto 34 A y B). Sin embargo, hay óxidos que parecen haber reaccionado totalmente hasta desaparecer el cristal y quedar sólo la forma de éste sin haber sido sustituido por ningún otro mineral.

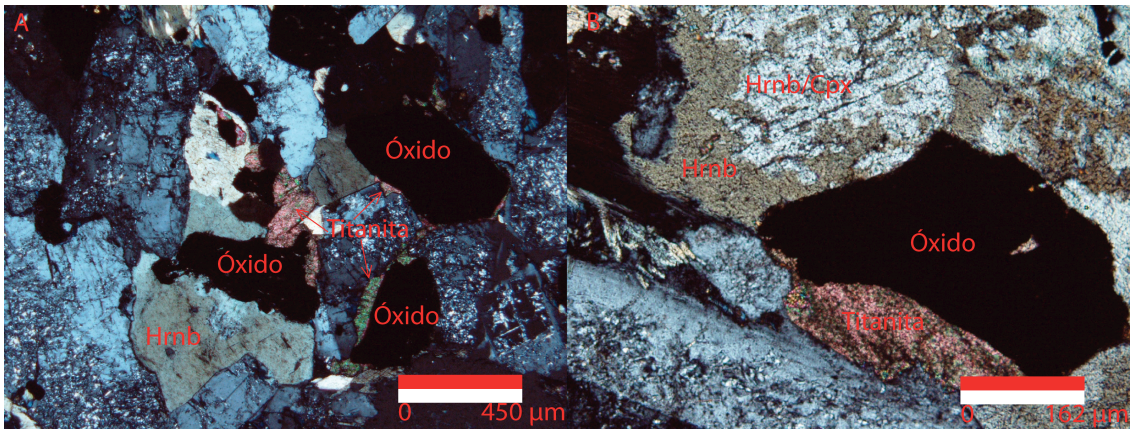

Foto 34. JLT-32. Ambas fotos con nícoles cruzados. A. 4X. Óxidos rodeando parcialmente a cristales de titanita y hornblenda (Hrnb). B. 10X. Cristal de titanita en contacto con un óxido. Un cristal de hornblenda cloritizada que posiblemente era un piroxeno (Cpx) se encuentra perforado (a reaccionado) y está inmerso en otro cristal de hornblenda.

Se presenta calcita inmersa en una hornblenda. En otros casos, cristales de hornblenda que pudieron ser clinopiroxenos (pseudomorfos) se encuentran corroídos y perforados junto con pequeños cristales que tienen características ópticas similares a la plagioclasa (textura simplectítica de hornblenda y plagioclasa). Ambos minerales están inmersos en hornblenda (Foto 35B).

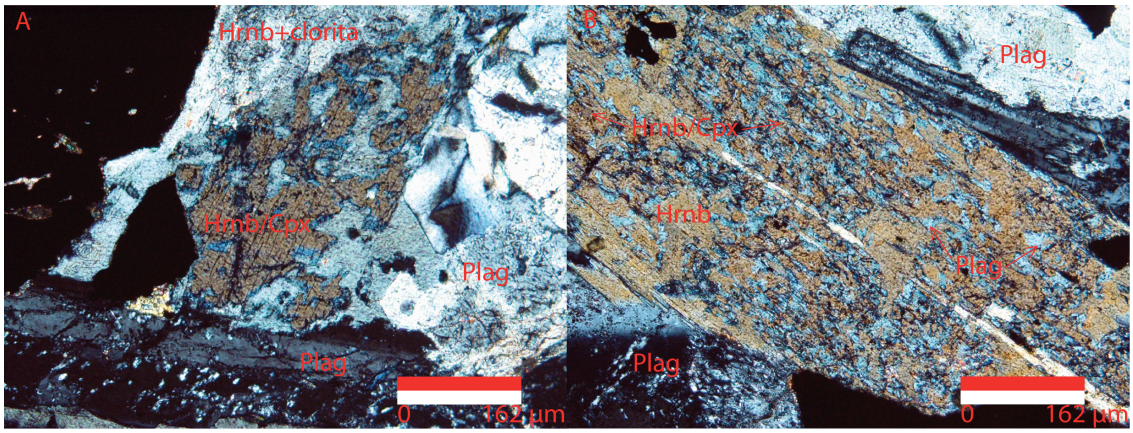

Foto 35. JLT-32. Ambas fotos con nícoles cruzados. 10X. A. Cristal de hornblenda (Hrnb) o clinopiroxeno (Cpx) parcialmente sustituido por clorita. Nótese que no hay exsolución de plagioclasa (Plag). B. Hornblenda o clinopiroxeno que presenta exsolución de probable plagioclasa.

La exsolución de plagioclasa puede significar falta de mezcla al haber un exceso de calcio al transformarse un piroxeno cálcico (Cpx) a hornblenda. Otra posibilidad más complicada y menos probable es que puede indicar un desequilibrio termodinámico

producto de un posible cambio de presión del sistema provocado por un ascenso relativamente rápido del magma. El mineral original (piroxeno de alta presión) sería cálcico y la sustitución de éste por hornblenda y plagioclasa sería producto de una reducción en la presión del sistema. Deer et al. (1997) citan que la coexistencia de anillos de hornblenda y plagioclasa alrededor de onfacita en una eclogita se da a presiones de 6 a 8 Kb y temperaturas de 470 a 570° C basados en el geobarómetro de Schmidt (1992) y el geotermómetro de Spear (1981).

Secuencia de cristalización: Seguramente las plagioclasas como los óxidos fueron los primeros en cristalizar. Los supuestos clinopiroxenos fueron los primeros minerales ferromagnesianos en cristalizar, tal vez contemporáneamente a los óxidos y plagioclasas. Después, por una hidratación del sistema, los probables clinopiroxenos pudieron ser reemplazados por hornblenda mediante uralitización, en algunos casos reemplazan parcialmente al clinopiroxeno (figura OA positiva) y en otros totalmente (únicamente hornblenda). Ya que algunos óxidos, probablemente titanomagnetita, incluso han desaparecido, es probable que el fierro de éstos haya sido utilizado por la cristalización de los clinopiroxenos y de las hornblendas. La titanita presente siempre al lado de éstos se habría formado por la presencia de titanio residual al ser destruido el óxido. Sin embargo, hay otros óxidos que no se encuentran junto a titanita y que no muestran perforaciones o corrosión en las orillas. Esto puede deberse a que continuó su cristalización incluso después de haberse formado las hornblendas, o que se trataba de cristales más grandes, con un contenido de titanio menor al de otras muestras (no formando siempre titanita), que fueron reducidos a su tamaño actual. Posteriormente, por la presencia de relictos de hornblenda o clinopiroxeno, junto con posibles pequeños cristales de plagioclasa que dan una textura simplectítica a hornblendas de generación posterior que los envuelven; se cree que hubo falta de mezcla por el cambio de composición del sistema, o un desequilibrio termodinámico que pudo ser producido por un ascenso relativamente rápido del magma y una hidratación posterior de éste. Aunque son evidentes dos generaciones de hornblenda, no todos los cristales de éstas o de los clinopiroxenos de la primera generación presentan los pequeños cristales de plagioclasa. Esto puede deberse a que sólo los

cristales de clinopiroxeno que no habían sido reemplazados por hornblenda en la primera hidratación del sistema son los que contienen plagioclasa actualmente.

4.8. JLT-45

Fases minerales: Plagioclasa, hornblenda, óxidos, titanita, biotita, clorita, epidota, sericita.

Conteo de puntos: En las reglas de la pinza de cangrejo, el área máxima analizable fue de 570 mm cuadrados aproximadamente.
No se hizo un conteo separado de la clorita y epidota presentes en hornblenda ya que gran parte de la última se altera a las primeras.

Clasificación (Figura 9A): Microgabro de hornblenda y biotita de grano fino.

Texturas y relaciones espaciales entre fases minerales: La roca es de una textura equigranular. Las plagioclasas tienen formas anedrales y pocas subedrales con tamaños de hasta 3.12 mm (grano fino a medio). Casi no se observan maclas polisintéticas con claridad por la alteración; aún así, se utilizó un solo dato de un fenocristal que no es representativo de la composición de las plagioclasas como 40% componente anortítico (andesina) por el método de Michel-Levy. La mayoría de las plagioclasas no están sericitizadas pero algunas presentan epidota (Foto 36A); sin embargo, no se puede asegurar si corresponden a la alteración de los pequeños cristales de anfíbol inmersos en éstas o si alteran directamente a la plagioclasa (sausuritización). Hay por lo menos dos generaciones de plagioclasas ya que algunos cristales euedrales y subedrales de éstas están inmersos en fenocristales de plagioclasa que rellenan además todos los intersticios entre cristales (Foto 36B).

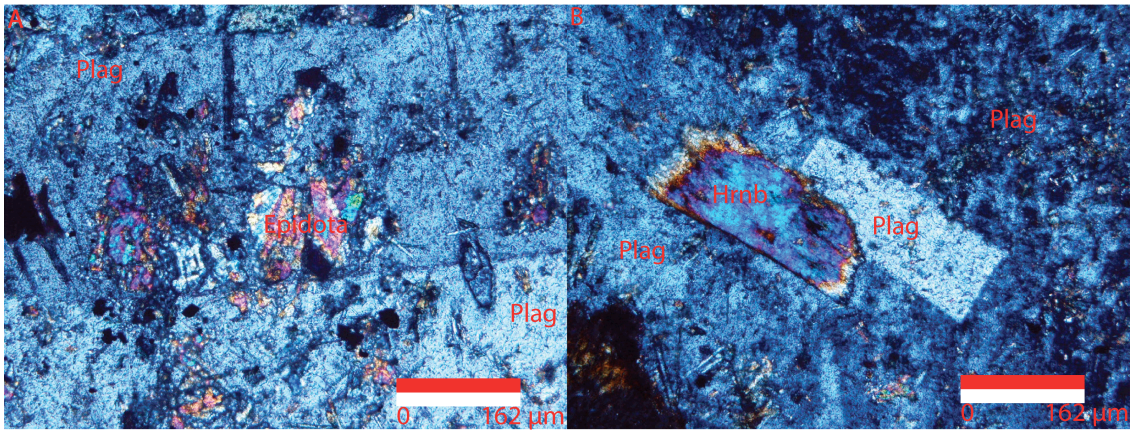

Foto 36. Muestra JLT-45. Ambas fotos con nícoles cruzados. A. 10X. Plagioclasa con epidota dentro. B. 10X. Plagioclasa (plag) euedral y hornblenda (Hrnb) subedral inmersos en plagioclasa.

Además se observan algunos cristales finos de anfíbol (seguramente hornblenda) inmersos en dichos fenocristales de plagioclasa (Foto 37A). Una zona de la roca presenta un intercrecimiento de plagioclasas y anfíboles de grano fino con textura equigranular. Los anfíboles son anedrales con dimensiones máximas de 1.34 mm (grano fino). Las propiedades ópticas no son distinguibles de la hornblenda. No se distinguen diferentes tipos de hornblenda con luz paralela; pero presentan colores de interferencia amarillos, verdes, azules y rojos probablemente debido a alteración.

Muchas de las hornblendas están alteradas a clorita y epidota. Fenocristales de hornblenda están inmersos en plagioclasas pero algunos cristales de hornblenda, en general de grano fino, se encuentran rodeando a cristales de plagioclasa (Foto 37B).

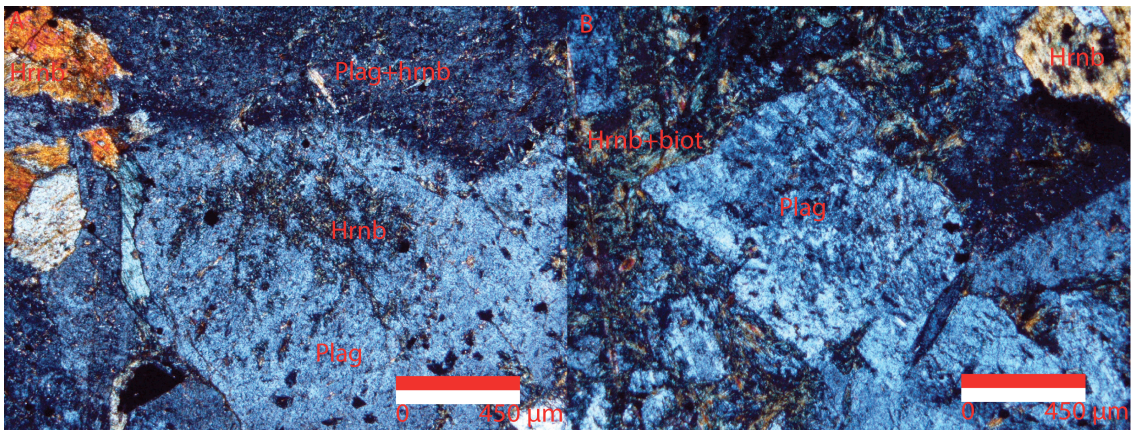

Foto 37. Muestra JLT-45. Ambas fotos con nícoles cruzados. A. 4X. Plagioclasa (Plag) que envuelve cristales finos de hornblenda (Hrnb). Se observan también fenocristales de hornblenda. B. 4X. Plagioclasa subedral rodeada por cristales finos de hornblenda y biotita. Fenocristal de hornblenda que envuelve a óxidos.

En pocas zonas de la lámina se observaron cristales anedrales de grano fino de biotita, en una ocasión rellenan un intersticio entre cristales de plagioclasa y otras inmersos en plagioclasas junto con las honblendas (Foto 38). La escasa presencia de esta mica sugiere que fue generada por biotización de la hornblenda por alteración ya que no es muy abundante y está siempre junto a ésta. Los cristales de minerales opacos anedrales de grano fino presentan texturas esqueletales y perforaciones. Seguramente son óxidos ya que se observan titanita en la periferia y en bordes de las bahías y huecos. Puede evidentemente tratarse de titanomagnetita (Foto 38).

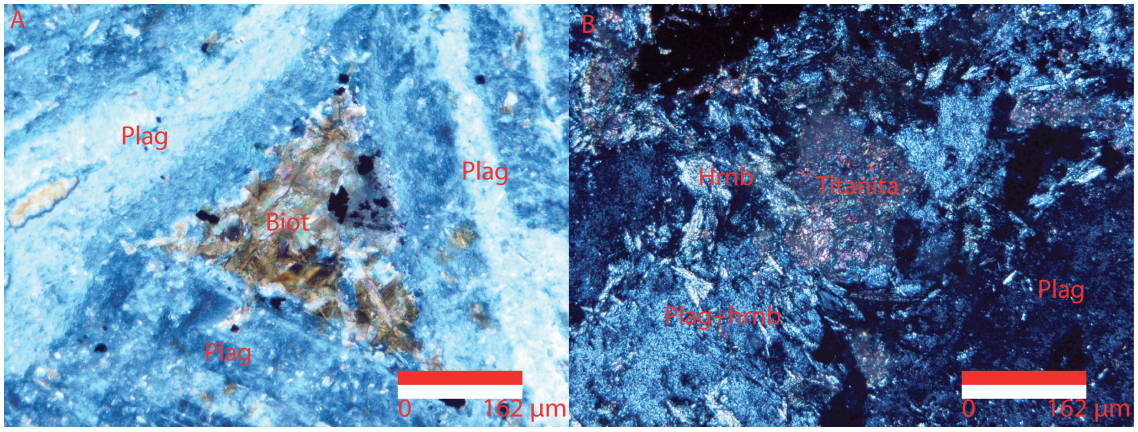

Foto 38. Muestra JLT-45. Ambas fotos con nícoles cruzados. A. 10X. Luz conoscópica, un cúmulo de biotitas (Biot) rodeado por tres fenocristales de plagioclasa (Plag). B. 10X. Cristal de titanita rodeado por cristales de hornblenda (Hrnb) y plagioclasa (Plag).

Secuencia de cristalización: Probablemente plagioclasas y óxidos son los primeros en cristalizar. Como no hay evidencia de la presencia de piroxenos se asume que por una simple secuencia de cristalización o menos probablemente por hidratación posterior, cristalizan los fenocristales de hornblenda. El fierro necesario para la cristalización de éstos es extraído de los óxidos lo que provoca la textura esqueletal y las perforaciones que presentan, así como la titanita formada por el titanio residual al desintegrarse la posible titanomagnetita. Los cristales finos de hornblenda y menor cantidad de biotita que rodean a plagioclasas pudieron formarse en esta etapa. De igual manera el intercrecimiento de plagioclasas y anfíboles de grano fino con textura equigranular pudieron formarse en esta etapa.

Hay una segunda generación de plagioclasas representadas por fenocristales que envuelven a otras plagioclasas y rellenan intersticios. Los cristales finos de

hornblenda y biotita inmersos en estas plagioclasas son interpretados como remanentes de cristales de hornblenda que, al ser inestables, fueron sustituidos por plagioclasas en las últimas fases de cristalización. La posible presencia de epidota en un fenocristal de plagioclasa sumado a la posible composición de andesina de las últimas puede indicar que el sistema evolucionó conforme se enfrió y originó las últimas plagioclasas, más sódicas (los fenocristales) que las primeras (presentando epidota por sausuritización). Sin embargo, esto es especulativo porque no se conoce con más certeza la composición de las plagioclasas ni se sabe si la epidota proviene de la plagioclasa o de un cristal de hornblenda.

Otra posible interpretación es que tanto el intercrecimiento equigranular de grano fino de plagioclasa y hornblenda, como las hornblendas y menor cantidad de biotita de grano fino que rodean a plagioclasas, pueden representar un distinto evento magmático que se mezcló con el primero, antes de la segunda generación de plagioclasas.

4.9. -9- Formación Tecalitlán.

Fases minerales: Plagioclasa, sillimanita, cuarzo, muscovita, biotita, hornblenda, óxidos.

Clasificación: Esta muestra fue colectada de la roca encajonante de los cuerpos plutónicos. Por la presencia de micas blancas principalmente, así como granos de cuarzo y plagioclasas redondeados se clasifica esta roca como una arenisca rica en cuarzo que fue expuesta a una alta temperatura, posiblemente por un evento volcánico o plutónico que la metamorfizó. Se omitió un conteo de puntos ya que varias zonas de la lámina están muy alteradas y no se distinguen los minerales.

Texturas y relaciones espaciales entre fases minerales: Se observan fenocristales con forma prismática bipiramidal con longitudes de hasta 6 mm, en general subedrales pero a veces euedrales con forma romboédrica, que se cree que son cortes basales de los primeros. Son incoloros, no pleocroicos, crucero en una dirección pero presenta

fractura tal vez en dos direcciones; el relieve es muy alto. Presenta baja birrefringencia (0.005 a 0.007), extinción recta, aunque en algunos cristales oblicua con 9°, elongación negativa (largo-rápido), figura biáxica positiva y ángulo 2V alrededor de 60°. (Foto 39). Los fenocristales muestran una alteración que parecen anfíboles, basado en su hábito, pero pueden ser piroxeno. Además un mineral opaco, tal vez óxido, rodea a todos los fenocristales.

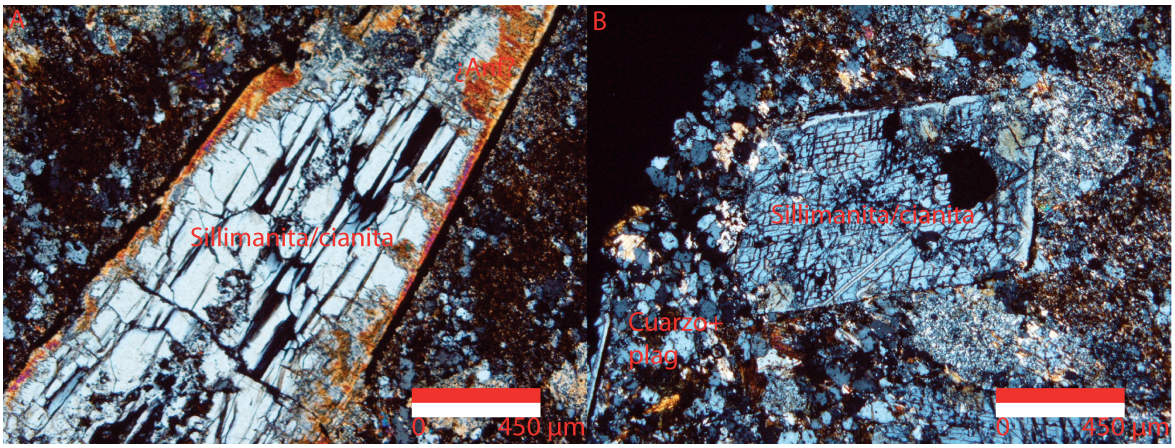

Foto 39. Muestra -9-. Ambas fotos con nícoles cruzados. A. 4X. Sillimanita/cianita determinada por microscopía electrónica. Se observan posibles anfíboles (Anf) en los bordes y un mineral opaco (posible óxido) en la periferia. B. 4X. Una posible sillimanita/cianita euedral en corte basal rodeada por cuarzo y plagioclasa (plag).

Las propiedades ópticas son muy similares a los ortopiroxenos pero la elongación observada es negativa, que no coincide con éstos. Otro mineral con propiedades similares es la andalucita pero ésta tiene una figura biáxica negativa, no presente en los cristales observados. Por lo anterior se realizó un análisis semi-cuantitativo en un microscopio electrónico de barrido Hitachi TM-1000 Tabletop Microscope en dos cristales (Figura 16 y 17):

Cristal 1

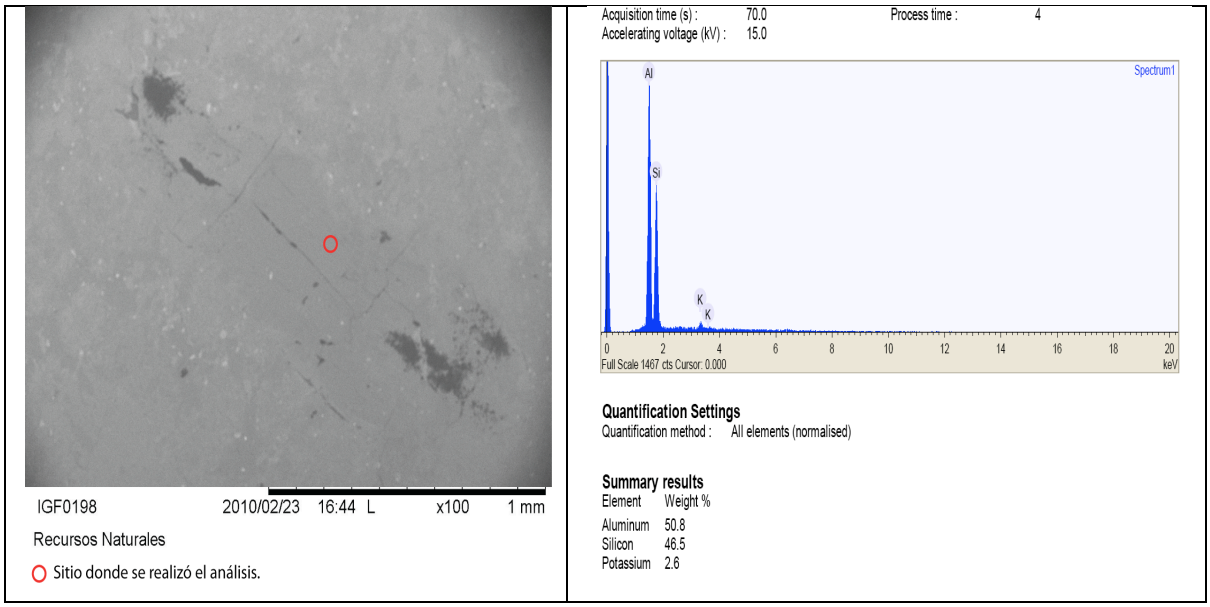

Figura 16. Foto del sitio donde se analizó un cristal alargado cuyo análisis está desplegado en el recuadro derecho.

Este cristal tiene más de 1 mm de longitud y se puede observar claramente. Los resultados son 50.8% en peso de aluminio, 46.5% de silicio y 2.6% de potasio (Figura 16), calculados por el microscopio calibrado por el Laboratorio de Petrología y Mineragrafía del Instituto de Geofísica de la UNAM.

Cristal 2

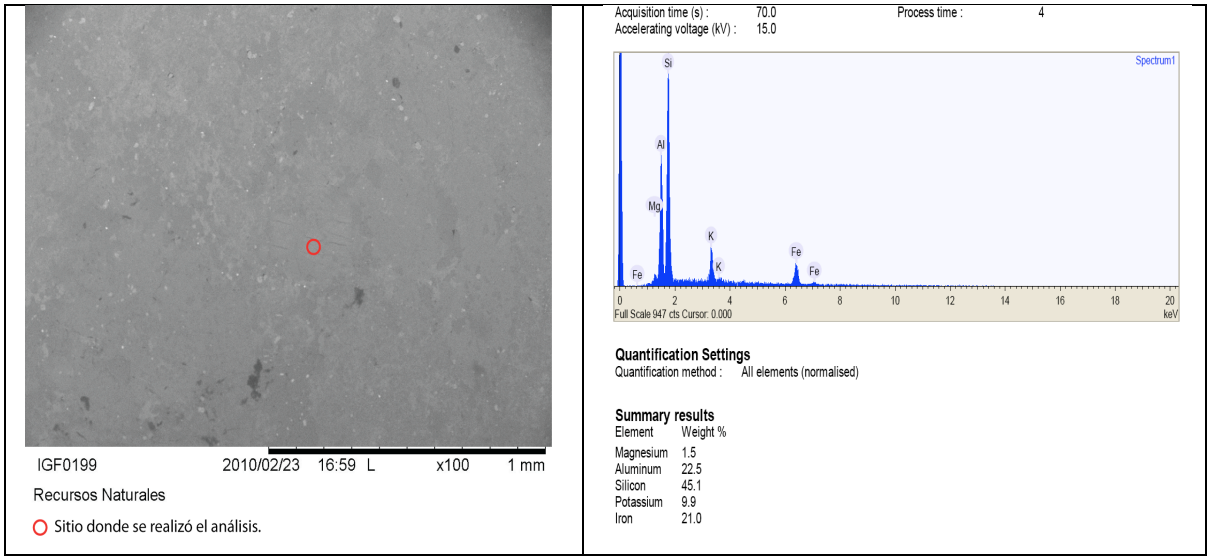

Figura 17. Foto del sitio donde se analizó un cristal cuyo análisis está desplegado en el recuadro derecho.

El segundo cristal es mucho más pequeño y no es tan clara la imagen desplegada por el aparato. Los porcentajes obtenidos de igual manera que en el cristal anterior son 45.1% de silicio, 22.5% de aluminio, 21.0% de fierro, 9.9% de potasio y 1.5% de magnesio (Figura 17).

El primer cristal está formado por una gran cantidad de aluminio, silicio y muy poco potasio. Al comparar los valores obtenidos con los reportados para distintos grupos minerales mencionados anteriormente, el menor error lo presenta una sillimanita seguido de una anortita. Sin embargo, ambos minerales no contienen potasio en los valores reportados por Deer et al. (1966). El mineral con menor error que contiene todos los elementos presentes en el análisis es una anortoclasa. Pero dado que muchas propiedades ópticas que presenta el cristal no corresponden a ésta, se restó el potasio de la suma total del análisis y se recalcularon los demás elementos para ver de qué mineral se trataba sin considerar el potasio. El menor error lo presenta nuevamente la sillimanita. En comparación con los demás silicoaluminatos, curiosamente el menor error lo presenta el polimorfo de alta presión, la cianita azul; seguido de la andalucita y finalmente de la sillimanita. Dado que la andalucita tiene propiedades ópticas distintas a las determinadas, se descarta. Seguramente se trata de sillimanita, pero podría ser también cianita.

El otro cristal contiene además de una proporción mayor de potasio y poco menor de aluminio, gran cantidad de fierro y poco magnesio. El menor error total lo presenta una biotita de un esquisto. Los dos valores más cercanos son una biotita en un esquisto de granate y una biotita en un granito. Se trata indudablemente de una biotita, tal como se observa en la lámina.

Se determinó petrográficamente biotita con tamaños promedio menores a 1 mm (grano fino, Foto 40A) inmersa en los cristales de anortoclasa. También se identificó una mica blanca de tamaños menores a 1 mm, posiblemente muscovita (Foto 40B). Adicionalmente se identificó la presencia de pequeños cristales redondeados de cuarzo y plagioclasa a lo largo de la lámina, pero también se observan dichos cristales redondeados en forma de vetas.

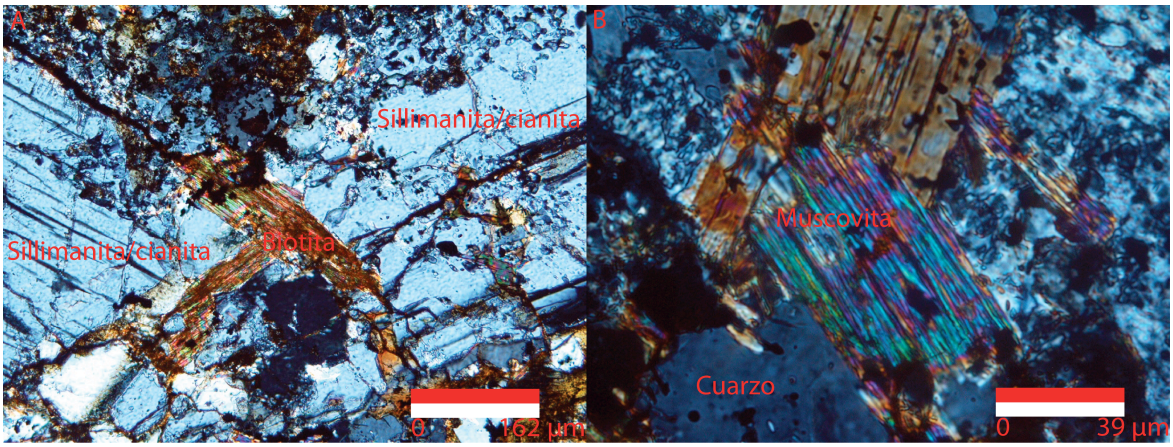

Foto 40. Muestra -9-. Ambas fotos nícoles cruzados. A. 10X. Biotita en medio de dos cristales de sillimanita/cianita. B. 40X. Mica blanca que es posiblemente muscovita alrededor de un cristal de cuarzo.

Asociación mineral: La presencia de mica blanca, sillimanita o probable cianita, indica el carácter sedimentario (pelítico) de esta secuencia. Probablemente tanto el cuarzo como las plagioclasas redondeadas formaban parte de una roca sedimentaria. Las micas blancas y la biotita pudieron formarse por un evento térmico al que estuvo expuesta la roca sedimentara, que pudo pertenecer a un evento volcánico de la secuencia volcanosedimentaria, anterior al plutonismo, y más probablemente a la intrusión de los plutones. Los fenocristales de sillimanita son anómalamente grandes y evidencian un metamorfismo de alta temperatura, seguramente producto de la intrusión de los plutones. Posiblemente parte del cuarzo en forma de vetas es arrastrado o se produce durante este evento.

Alternativamente, los fenocristales de posible cianita, así como las micas blancas y otros minerales, como un posible rutilo muy alterado determinado así por su forma, podrían pertenecer a fragmentos de una roca encajonante sedimentaria metamórfica de alta presión (si se tratara de cianita) que fueron transportados por el evento volcánico hacia la superficie.

4.10. JLT-41. Muestra colectada cerca de la ciudad de Tepalcaltepec, Michoacán.

Fases minerales: Plagioclasa, hornblenda, clinopiroxeno, óxidos, clorita, calcita, epidota, sericita.

Conteo de puntos: En las reglas de la pinza de cangrejo, el área máxima analizable fue de 510 mm cuadrados aproximadamente.
No se distinguieron hornblendas de clinopiroxenos por la gran alteración que presentan y la mayoría de éstas están cloritizadas y epidotizadas. Por lo anterior, en el conteo de puntos los minerales antes mencionados fueron considerados hornblendas.
Como la mayoría de las plagioclasas están sericitizadas, tampoco se hizo un conteo separado de ambas.

Clasificación (Figura 9A): Microgabro de hornblenda y clinopiroxeno de grano medio.

Texturas y relaciones espaciales entre fases minerales: La roca tiene una textura equigranular. Las plagioclasas presentan formas anedrales, algunas veces subedrales y más raramente euedrales. Las dimensiones máximas son de dos milímetros pero muchas son menores a un milímetro (grano fino a medio). Aproximadamente el 80% de las plagioclasas están sericitizadas y pocas presentan maclas polisintéticas, la mayoría presentan maclas de Carlsbad. Se estimó con base en sólo tres cristales una composición de 47% de componente anortítico (andesina) utilizando el método de Michel-Levy. Hay algunas plagioclasas que rodean a otras plagioclasas subedrales y hasta euedrales, aunque no se determinó si las segundas están realmente inmersas en las primeras (Foto 41).

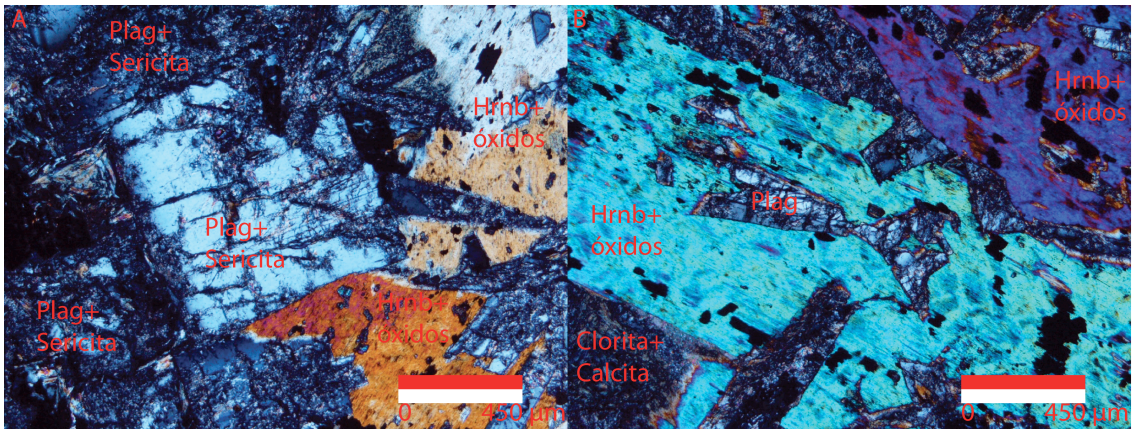

Foto 41. Muestra JLT-41. Ambas fotos con nícoles cruzados. A. 4X. Una plagioclasa (Plag) euedral sericitizada rodeada por plagioclasas muy sericitizadas y hornblendas (Hrnb) con óxidos. B. 4X. Plagioclasa inmersa en fenocristales de hornblenda con óxidos. En la parte inferior izquierda se ven cristales de clorita con calcita.

Aunque se determinó la presencia de pocos cristales con hábitos indistinguibles de los anfíboles pero con figura OA positiva, no se identificaron clinopiroxenos. Se observan fenocristales de anfíboles anedrales con tamaños variables desde 1.5 mm hasta 4.5 mm (grano medio) con propiedades muy similares a las de la hornblenda aunque con colores de interferencia muy variables como rojos, naranjas, azules, verdes y amarillos observados con luz polarizada (Foto 42). Se creé que la variación de los colores de interferencia se debe principalmente a la alteración, presente en toda la roca, aunque también a la orientación de los cristales, ya que hubo uno que presentó un color verde oscuro (el menor color de interferencia) y una figura óptica perfectamente centrada. La mayoría de las hornblendas presentan clorita y epidota, que en ocasiones no las sustituyen completamente.

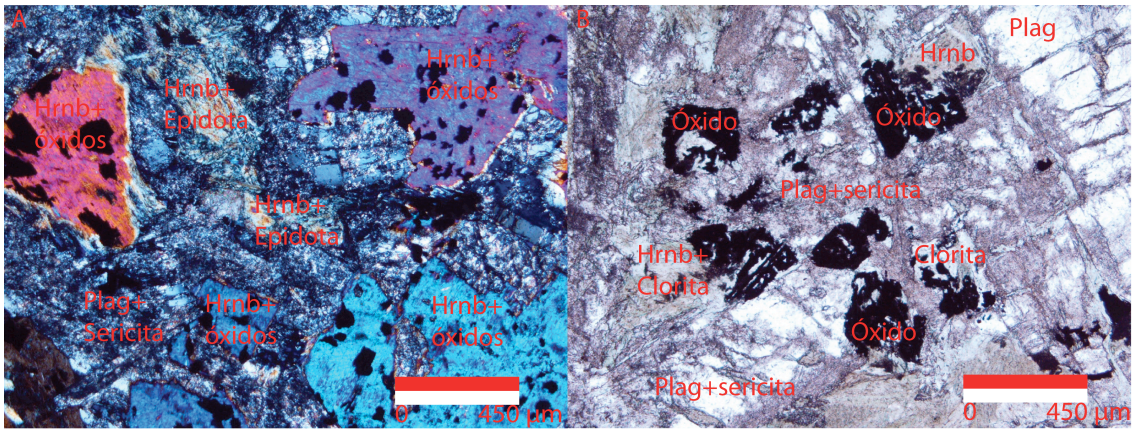

Foto 42. Muestra JLT-41. A. Nícoles cruzados y 4X. Hornblendas (Hrnb) con distintos colores de interferencia con óxidos en su interior. Hornblendas epidotizadas y plagioclasas (Plag) sericitizadas. B. Luz paralela y 4X. Óxidos esqueletales en cristales de hornblenda cloritizados. Se observan plagioclasas en ocasiones muy sericitizadas.

Hay minerales opacos que se asumen como óxidos ricos en fierro porque presentan texturas esqueletales y se encuentran inmersos en cristales de posible hornblenda (textura poikilítica, Fotos 41 y 42). Además, por correlación, todos los gabros analizados los muestran. Por otro lado, hay intercrecimientos de cristales con hábito fibroso observados con luz paralela que parecen ser hornblendas completamente sustituidas por clorita y epidota, pero dicho hábito aparenta corresponder al de la serpentina o antigorita (Foto 43). Éstos se encuentran a lo largo de la lámina. Adicionalmente se encontró calcita en forma de vetas y en zonas donde hay gran alteración en la lámina (Foto 43).

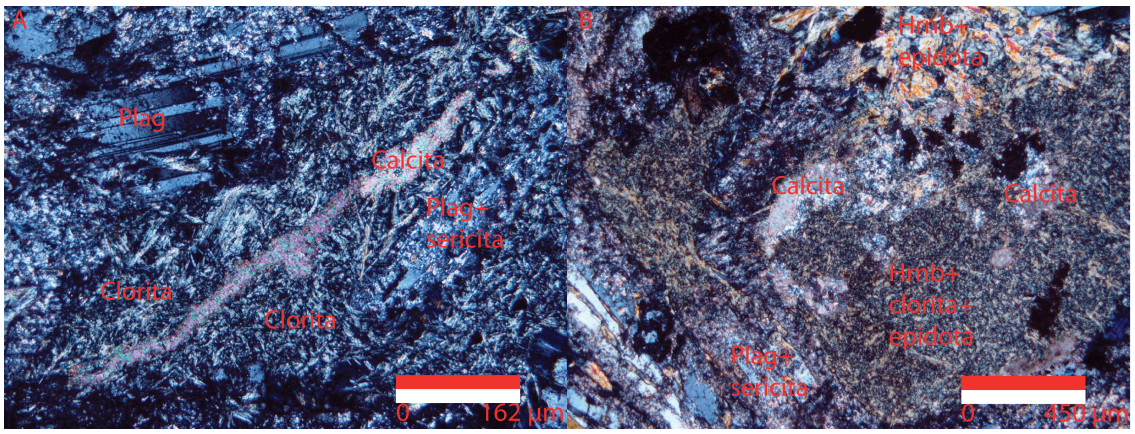

Foto 43. Muestra JLT-41. Ambas fotos con nícoles cruzados. A. 10X. Una veta de calcita en medio de plagioclasas (Plag) a veces sericitizadas y clorita que sustituye completamente a un posible anfíbol. B. 4X. Calcita en medio de pequeños cristales de hornblenda cloritizada y epidotizada. También se observan cristales más grandes de hornblenda epidotizada. Hay plagioclasas sericitizadas.

Para distinguir el tipo de anfíbol del que se trata, ver si hay clinopiroxenos y confirmar si se trata de intercrecimientos de clorita-epidota o serpentina, se realizaron análisis de la lámina con el microscopio electrónico de barrido Hitachi TM-1000 Tabletop Microscope y se compararon con los grupos minerales antes mencionados.

Se hizo el análisis a cuatro cristales de un área previamente delimitada con un plumón al observar la lámina en el microscopio petrográfico (Figura 18). Sin embargo, como se nota en la figura 18 sólo es posible distinguir el hábito de los cristales, no la textura o alguna propiedad óptica.

Figura 18. Muestra JLT-41. Foto tomada con el microscopio electrónico Hitachi TM-1000 con la ubicación de los puntos donde se realizaron los cuatro análisis. La zona sombreada en la parte superior izquierda e inferior derecha es tinta de plumón.

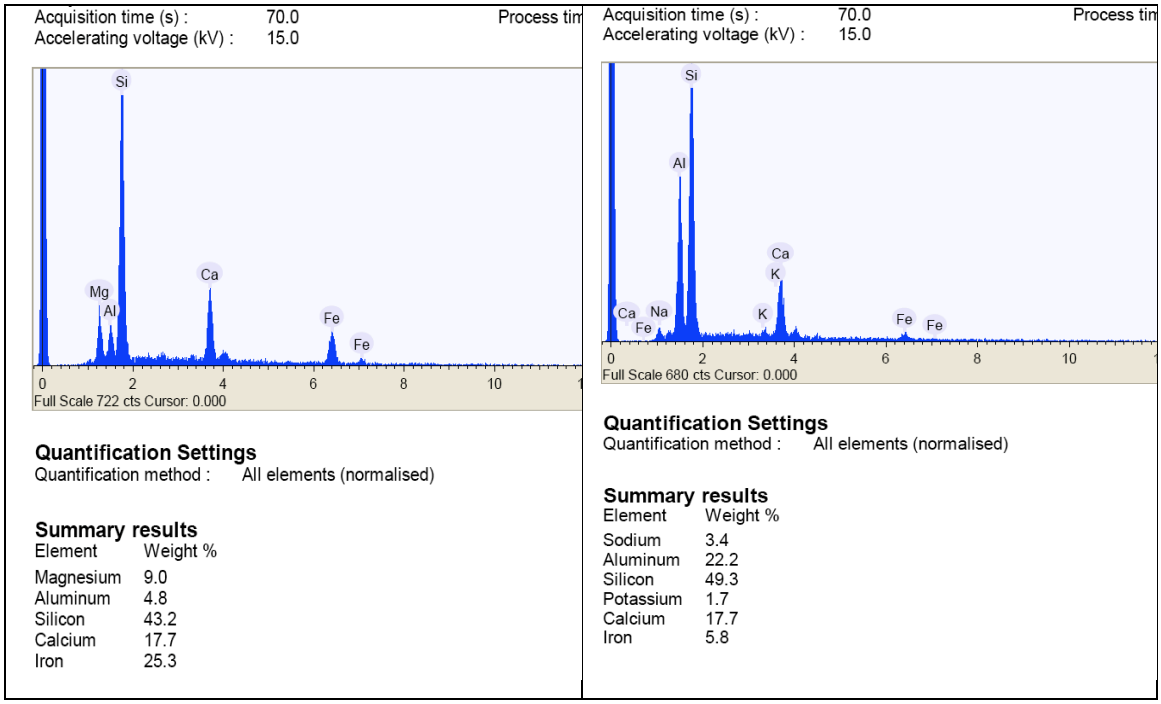

Figura 19. Análisis 1 y 2. El diagrama izquierdo corresponde al análisis del punto 1. El diagrama derecho al análisis del punto 2.

Al comparar los valores obtenidos para el análisis del punto 1 (Figura 19), que corresponde a un cristal con hábito prismático muy parecido al de un anfíbol; con diferentes valores de anfíboles, piroxenos, epidota y serpentina, el menor error obtenido corresponde a una ferroaugita.

Al comparar los valores obtenidos para el punto 2 (Figura 19), se obtuvo el menor error en una clinozoisita (grupo de la epidota). Sin embargo, se omitieron los valores de 3.4% de sodio y 1.7% de potasio ya que ningún mineral del grupo de la epidota los contiene. Pese a que el porcentaje de los mencionados elementos es bajo en proporción al total de los que componen el mineral (sólo 5.1%), se calculó el valor que tendría el siguiente mineral con menor error (una kersutita, que no corresponde con la asociación mineral de la roca) al restar el sodio y el potasio en el porcentaje total, y haciendo el recálculo de los demás elementos. De todas maneras la clinozoisita presenta el menor error.

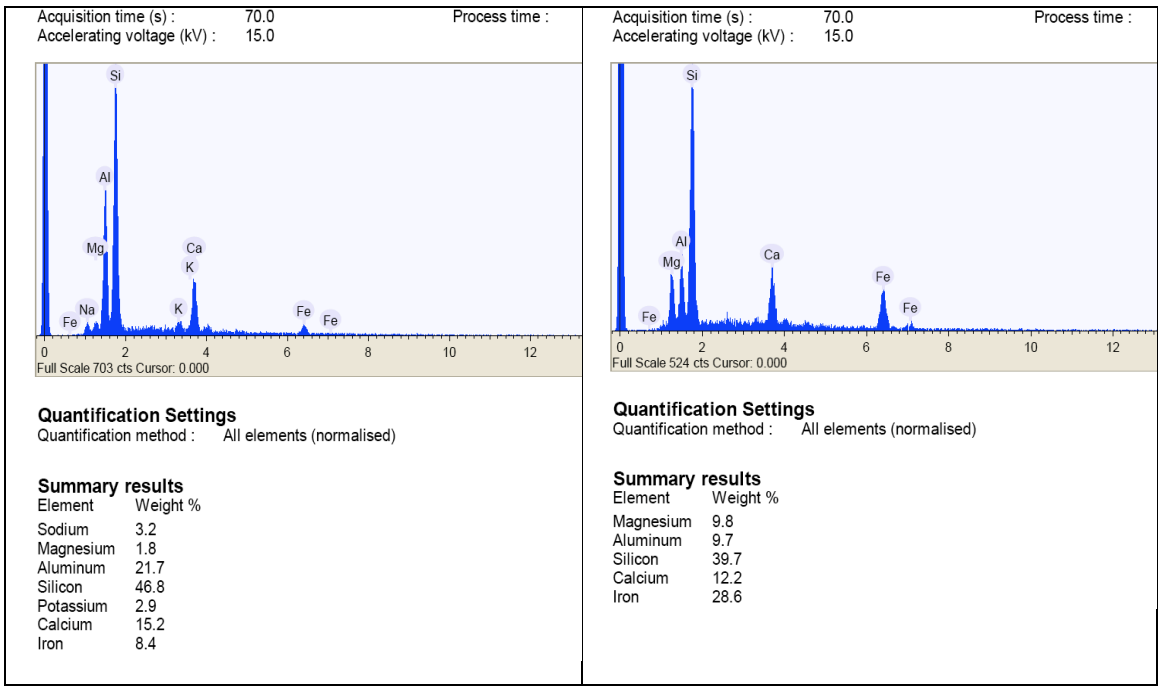

Figura 20. Análisis 3 y 4. El diagrama izquierdo corresponde al análisis del punto 3. El diagrama derecho al análisis del punto 4.

Al comparar el punto 3 (Figura 20) se obtuvo el menor error para una epidota, al omitir el sodio y potasio. Se restaron, al igual que en el punto 2, dichos elementos y se recalcularon los demás, para ver si no se trataba del siguiente mineral con menor error (también una kersutita). Se trata sin lugar a dudas de una epidota.

Para el punto 4 (Figura 20) se obtuvo el menor error para una hornblenda.

Por lo tanto se concluye que sí hay clinopiroxenos que se confunden fácilmente con anfíboles y por otro lado se descarta la presencia de serpentina y se confirma que se trata de minerales del grupo de la epidota.

Secuencia de cristalización: Las plagioclasas y óxidos son seguramente los primeros en cristalizar. Ya que hay plagioclasas subedrales y euedrales posiblemente inmersas en otras, se puede pensar en que la cristalización de este mineral fue constante al menos hasta que cristalizó la hornblenda. Por otro lado, aunque la composición de las plagioclasas no se haya determinado de manera precisa, dados los pocos cristales que presentan maclas polisintéticas, se cree que la andesina es una composición tardía o al menos no de las primeras plagioclasas que seguramente son más anortíticas, por

simple correlación con los otros gabros analizados a nivel regional. Como hay evidencia de clinopiroxeno se piensa que pudieron cristalizar desde un principio. Es posible que las hornblendas cristalizan al enfriarse el sistema y no por una hidratación súbita de éste. Los óxidos son desintegrados al utilizar el fierro para la formación de hornblenda, evidenciado por las inclusiones de éstos en hornblendas, a veces de forma esqueletal. Posiblemente, por una alteración meteórica fuerte o más probablemente hidrotermalismo, muchas hornblendas se alteran y otras son completamente sustituidas por epidota y clorita. La calcita es secundaria debido a la fuerte alteración de minerales ricos en calcio como las plagioclasas y hornblendas por hidrotermalismo ya que se encuentra en forma de vetas y está presente en lugares con mucha alteración.

4.11. MZ-3. Muestra colectada en Manzanillo.

Fases minerales: Plagioclasa, clinopiroxeno, hornblenda, óxidos.

Conteo de puntos: En las reglas de la pinza de cangrejo, el área máxima analizable fue de 540 mm cuadrados aproximadamente.

Clasificación (Figura 9A): Microgabro de clinopiroxeno y hornblenda de grano fino.

Texturas y relaciones espaciales entre fases minerales: La roca es de una textura equigranular con algunos fenocristales de plagioclasas y hornblendas que la semejan a una textura porfirítica. Los cristales de plagioclasa, clinopiroxeno y hornblenda están en contacto grano con grano. Los últimos tienen tamaños variables que no presentan grandes diferencias. La roca está excepcionalmente poco alterada.
Se observan cristales de plagioclasa anedrales y subedrales con longitud de hasta 3 mm y con tamaño promedio menores a un milímetro (grano fino). Se determinó la composición de las plagioclasas con seis cristales mediante el método de Michel-Levy como 58% de componente anortítico (labradorita). No presentan alteración. Se observaron plagioclasas que envuelven a óxidos de grano fino pero también óxidos

que rellenan cavidades de éstas (Foto 44). También hay cristales inmersos en anfíboles.

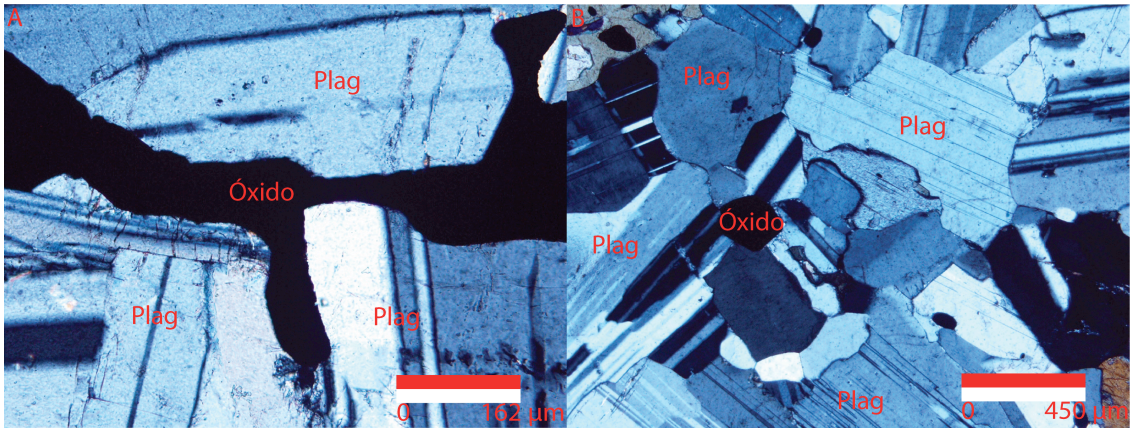

Foto 44. Muestra MZ-3. Ambas fotos nícoles cruzados. A. 10X. Se observa un óxido que rellena intersticios entre plagioclasas (Plag). B. 4X. Se observa un óxido inmerso en plagioclasas. En el extremo superior izquierdo se observa un óxido inmerso en hornblenda.

Se identificaron minerales incoloros a verde claro anedrales que presentan siempre una dirección de crucero, extinción oblicua y colores de interferencia variables debido a la orientación de los cristales, desde el inicio del primer orden al inicio del segundo orden, con figuras Bxa y OA positivas. Los de menor orden tienen figuras OA perfectas con el signo óptico positivo muy claro. Los de mayor orden tienen figuras descentradas en que resulta imposible determinar su signo óptico. Muchos de estos cristales presentan macla simple y otros polisintética. También tienen un mayor relieve respecto de otros anfíboles. Las propiedades ópticas de este mineral pueden corresponder a clinopiroxenos, probablemente augitas por los relativamente bajos colores de interferencia pero pueden ser diópsidas también (Foto 45).

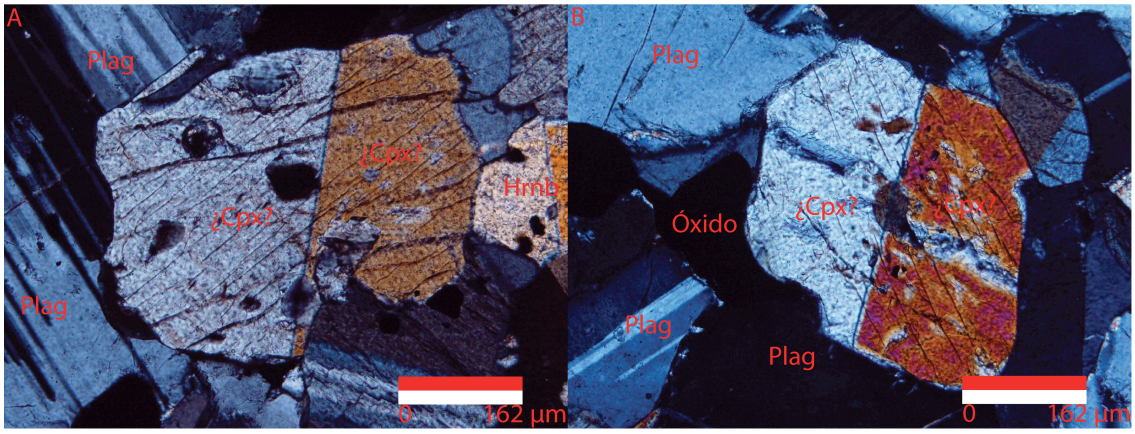

Foto 45. Muestra MZ-3. Ambas fotos con nícoles cruzados. A. 10X. Clinopiroxeno (Cpx)/anfíbol con una dirección de crucero y macla simple, rodeado por plagioclasas (Plag) y hornblendas (Hrnb). B. 10X. Clinopiroxeno/anfíbol con una figura óptica OA (+) con una dirección de crucero y macla simple, bordeado por un óxido y rodeado por plagioclasa.

Sin embargo, el hábito y relieve que presentan no son típicos de clinopiroxenos. Por otro lado, puede tratarse de algún tipo de anfíbol con figura de interferencia OA positiva. Los anfíboles que la presentan son la antofilita-gedrita, exclusivos de rocas metamórficas; la riebeckita, anfíbol sódico presente en esquistos de bajo grado, granitos, sienitas y volcánicos ácidos. También la edenita, hornblenda ligeramente sódica presente en pegmatitas graníticas ricas en sodio y skarns así como en algunos gabros forma coronas alrededor de olivino; la pargasita, también hornblenda ligeramente sódica presente en metamórficas de alto grado y más raramente en andesitas; y la cumingtonita, anfíbol no cálcico común en rocas metamórficas básicas y raro en ígneas como volcánicas ricas en sílice, en dioritas y gabros. Por lo tanto, dado que se trata de un gabro, las propiedades ópticas y la asociación mineral, pudiera corresponder a una cumingtonita, aunque es rara en gabros e ígneas en general. Se descarta la posibilidad de que se trate de anfíboles sódicos como la edenita, ya que hay otro anfíbol probablemente no sódico rodeándolos como se explica a continuación.

Hay anfíboles anedrales pardos pleocroicos que rodean a los posibles clinopiroxenos o cumingtonita, con textura fibrosa sin crucero, figura óptica OA negativa que también rellenan intersticios entre plagioclasas y envuelven a distintos minerales (textura poikilítica, Foto 46B). Se trata con lugar a poca duda de hornblendas.

También hay exsolución de hornblenda en los posibles clinopiroxenos/cumingtonita (Foto 46A).

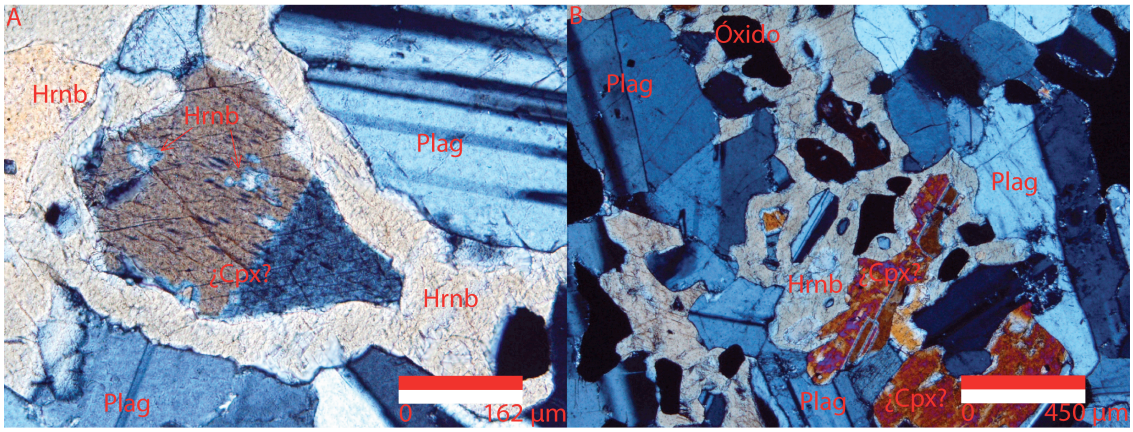

Foto 46. Muestra MZ-3. Ambas fotos con nícoles cruzados. A. 10X. Clinopiroxeno (Cpx)/anfíbol con macla simple y exsolución de hornblenda (Hrnb). Se encuentra inmerso en hornblenda y rodeado por plagioclasa. B. 4X. Cristales de posible clinopiroxeno, plagioclasas (plag) y óxidos inmersos en un oikocristal de hornblenda (textura poikilítica). Se encuentra rodeado por fenocristales de plagioclasa.

Si se trata de dos generaciones de anfíboles, se han reportado cumingtonitas (pobres en calcio) rodeadas por hornblendas (ricas en calcio) en algunas anfibolitas, lo que expresa la falta de mezcla entre anfíboles ricos y pobres en calcio en condiciones de P-T normales. Puede tratarse de un caso similar, en este caso durante la cristalización del magma gabroico. Por otro lado hay evidencia de cristales de hornblenda que probablemente sustituyen a los posibles clinopiroxenos o cumingtonita (pseudomorfos), rodeados a su vez por hornblenda (Foto 47).

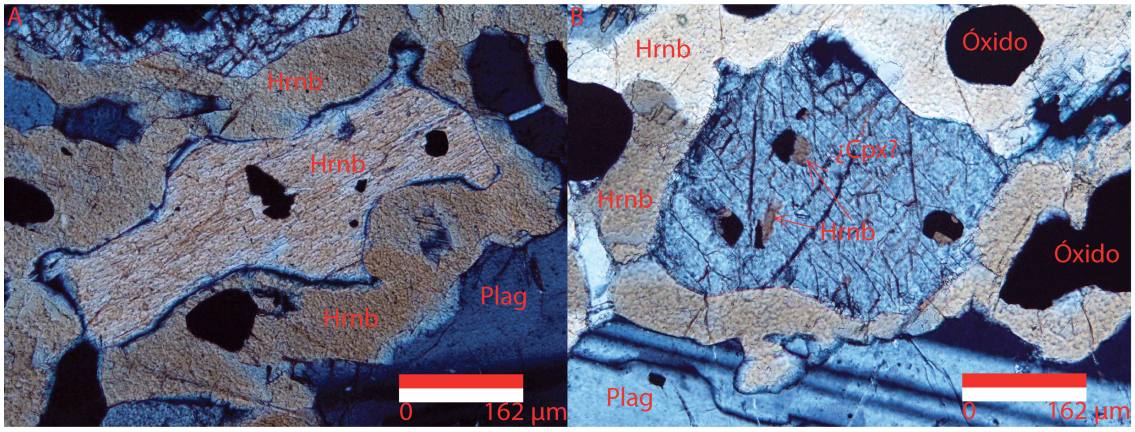

Foto 47. Muestra MZ-3. Ambas fotos con nícoles cruzados. A. 10X. Cristal de clinopiroxeno (Cpx)/anfíbol completamente sustituido (pseudomorfo) por hornblenda (Hrnb) inmerso en otra hornblenda. Rodeado de plagioclasa. B. 10X. Clinopiroxeno/anfíbol con OA (+) bordean a óxidos y exolusión de hornblenda. Inmerso en hornblenda que a su vez engloba a óxidos.

Se presentan opacos anedrales de grano fino que seguramente son óxidos inmersos en plagioclasas, clinopiroxenos/cumintonita, pero también se observan óxidos que rodean a dichos minerales y rellenan cavidades (Foto 44). No se notan cristales corroídos.

Secuencia de cristalización: Las relaciones de contacto descritas anteriormente indican que pudieron cristalizar los óxidos seguidos de las plagioclasas y posibles clinopiroxenos/cumingtonita. Posteriormente cristalizan más óxidos que rodean a los minerales anteriores y rellenan intersticios entre éstos. Probablemente antes de la segunda generación de óxidos cristalizan las hornblendas que rodean a los posibles clinopiroxenos/cumingtonita por una posible hidratación súbita del sistema, en caso de ser clinopiroxenos; o por una falta de mezcla entre anfíboles pobres y ricos en calcio en caso de cumingtonita. La hornblenda continúa en cristalización hasta envolver a las plagioclasas, a los óxidos, a otras hornblendas (Foto 46) y rellena intersticios. Las plagioclasas seguramente cristalizan hasta las etapas finales de enfriamiento.

Una alternativa es que cristalizan primero plagioclasas y posibles clinopiroxenos/cumingtonita, seguidos de óxidos que los rodean mientras los primeros continúan su cristalización (una sóla generación de óxidos inmersos en

algunas plagioclasas y posibles clinopiroxenos/cumintonita). Posteriormente cristaliza la hornblenda y continúan en su cristalización las plagioclasas.

4.12. MZ-4. Muestra colectada en Manzanillo a 50 m aproximadamente de la MZ-3.

Fases minerales: Plagioclasa, hornblenda, óxidos, epidota, biotita, clinopiroxeno, calcita, clorita, sericita.

Conteo de puntos: En las reglas de la pinza de cangrejo, el área máxima analizable fue de 750 mm cuadrados aproximadamente.
Ya que la sericita afecta a más del 80% de las plagioclasas no se realizó un conteo por separado.

Clasificación (Figura 9A): Gabro de hornblenda, biotita y clinopiroxeno de grano medio.

Texturas y relaciones espaciales entre fases minerales: La roca presenta una textura inequigranular con fenocristales excepcionalmente grandes (grano medio a grueso) de plagioclasas y hornblendas que la asemejan a una textura porfirítica. Sin embargo, no presenta una matriz. Hay cristales de plagioclasa, clinopiroxeno y hornblenda de tamaños variables. La roca presenta una fuerte alteración en general.
Las plagioclasas tienen formas anedrales a subedrales de grano fino a medio (<1-5 mm) con longitudes máximas de 5 mm. Pocos cristales muestran maclas polisintéticas; la mayoría, de Carlsbad. Esto se debe probablemente a la gran alteración que presentan, más del 80% están sericitizadas. También se observa calcita alrededor de una plagioclasa. Con base en dos cristales de 1.5 mm aproximadamente con maclas polisintéticas y una orientación adecuada, se obtuvo una composición de 53% de componente anortítico (labradorita) con el método de Michel-Levy. Para un cristal de 500 μm aproximadamente se obtuvo una composición de 43% de componente anortítico (andesina). Sin embargo, dado los pocos cristales utilizados, la composición es aproximada. Casi todas las plagioclasas se observan con tres

direcciones de fracturamiento, lo que refleja los esfuerzos a los que ha sido sujeta la roca. Las plagioclasas se encuentran dentro de óxidos y hornblendas pero algunos óxidos también están inmersos en éstas.

Se determinó la presencia de pocos minerales incoloros anedrales de grano fino (<1 mm) con un relieve mayor que la hornblenda, con colores de interferencia de segundo orden superior y tercero inferior con una figura óptica Bxa positiva muy clara. Se identificó como clinopiroxeno, probablemente diópsida (Foto 48).

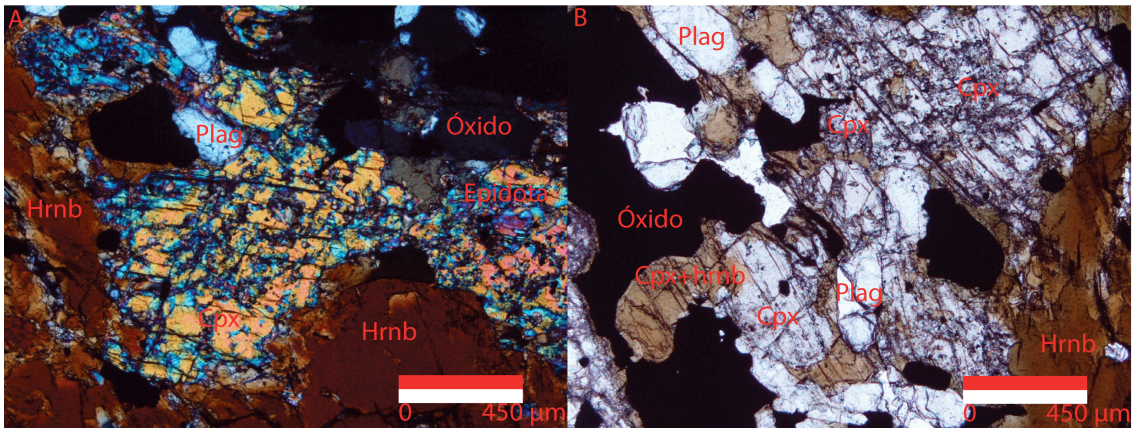

Foto 48. Muestra MZ-4. Ambas fotos con nícoles cruzados. A. 4X. Un cristal de clinopiroxeno (Cpx) en algunas zonas alterado a epidota, rodeado por hornblenda (Hrnb), óxidos y plagioclasas (Plag). B. 4X. Se observa la diferencia de color y relieve entre clinopiroxenos (blanco), plagioclasas y distintos cristales de hornblenda y óxidos por los que está rodeado. Nótese que en el extremo inferior izquierdo del cristal de clinopiroxeno hay sustitución parcial por hornblenda.

Algunos probables clinopiroxenos alteran a epidota y se encuentran inmersos o en contacto con hornblendas (Foto 49A). Se observan óxidos dentro de éstos y están también rodeados por plagioclasa. Se identificaron anfíboles anedrales de grano medio (1-5 mm) con longitudes máximas de 4.25 mm. Presentan colores de interferencia variables: pardo, verde aqua y rojo. Las propiedades ópticas no se diferencian de la hornblenda. La variación de colores se debe probablemente a diferentes tipos de hornblenda y/o alteración (Foto 49A). Muchas alteran a epidota. Algunas envuelven a algunos clinopiroxenos y están en contacto con otros; envuelven también a óxidos y plagioclasas.

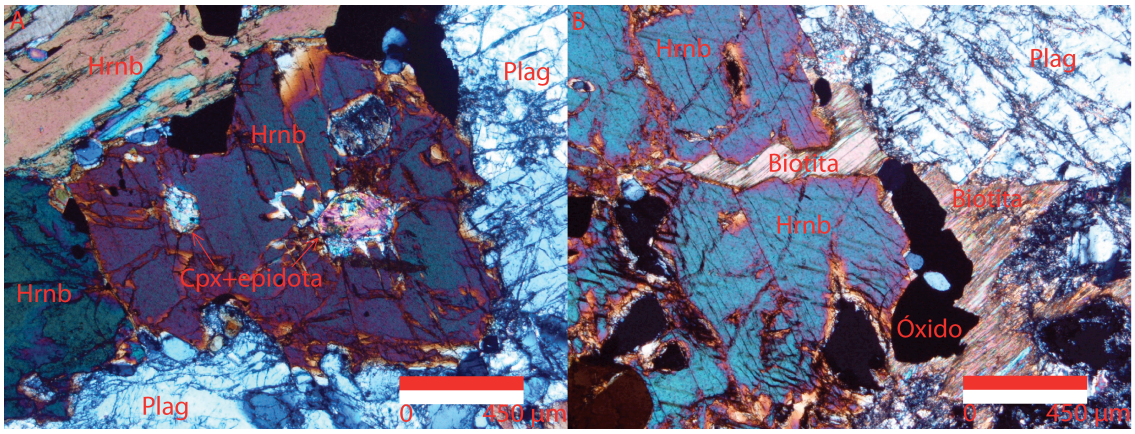

Foto 49. Muestra MZ-4. Ambas fotos con nícoles cruzados. A. 4X. Cristal de probable clinopiroxeno (Cpx) epidotizados inmersos en hornblenda (Hrnb). Las hornblendas presentan diferentes colores de interferencia. Hay óxidos rodeados por éstas y plagioclasas (Plag) que a su vez las rodean. B. 4X. Biotita rodeando a cristales de hornblenda y óxidos. Las plagioclasas están fracturadas y sericitizadas.

Se identificó biotita anedral de grano fino (< 1 mm) que presenta distintos colores de interferencia debido a la orientación de los cristales. Los de menor birrefringencia corresponden a figuras ópticas perfectamente centradas (visto a través de un eje óptico), los de mayor birrefringencia están descentradas. Rellena intersticios en la hornblenda (Foto 49B) pero también se ve inmersa en ésta (Foto 50A).

Hay cristales de óxidos anedrales de grano fino (<1 mm) que seguramente son óxidos por correlación con otros gabros aunque no presentan minerales secundarios o texturas que permitan identificarlos. Se encuentran inmersos en plagioclasas, clinopiroxenos y hornblendas. Sin embargo, hay cristales que envuelven a plagioclasas y a algunas hornblendas (Foto 50B).

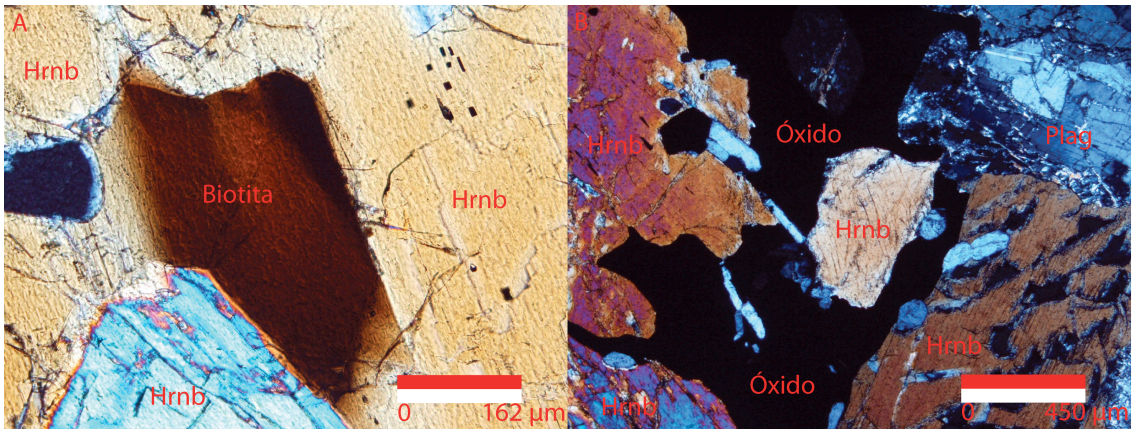

Foto 50. Muestra MZ-4. Ambas fotos con nícoles cruzados. A. 10X. Cristal de biotita con bajo color de interferencia ya que un eje óptico es perpendicular a la platina. Se encuentra rodeado por hornblenda (Hrnb). B. 4X. Cristal de hornblenda y plagioclasas (Plag) inmersas en un fenocristal de óxido. Se observan fenocristales de hornblenda y plagioclasa.

Secuencia de cristalización: Probablemente cristalizan plagioclasas y óxidos desde un principio. Las plagioclasas seguramente cristalizan hasta las fases finales de enfriamiento. Los cristales iniciales ciertamente tienen un componente anortítico mayor que los últimos en cristalizar, al tomar en cuenta las composiciones aproximadas obtenidas. El clinopiroxeno tal vez cristaliza en las fases iniciales, al menos justo después de los óxidos. Conforme se enfría el sistema cristaliza la hornblenda que sustituye a algunos clinopiroxenos (pseudomorfos) y rodea a óxidos y plagioclasas. Ya que no hay muchos clinopiroxenos rodeados por hornblenda y no se observa exsolución de plagioclasa en cristales de clinopiroxeno, se cree que la cristalización de hornblenda no se debió a un cambio súbito de presión o hidratación del sistema. Los pocos probables clinopiroxenos inmersos en hornblenda fueron epidotizados (pseudomorfos) probablemente antes de cristalizar ésta. Ya que hay óxidos que envuelven a hornblendas y algunas plagioclasas; se cree que continuaron con su cristalización al menos hasta que cristaliza la hornblenda, o que hay un segundo evento en el que cristalizan dichos óxidos. Conforme continúa el enfriamiento del sistema cristaliza la biotita y continúan formándose plagioclasas hasta el enfriamiento del sistema. Ya que hay hornblendas que envuelven a biotitas, las primeras siguen cristalizando al menos contemporáneamente a las últimas o hay más de dos eventos de cristalización de hornblenda. La presencia de calcita en

algunos cristales de plagioclasa puede deberse a que se liberó calcio conforme se volvió más sódica al enfriarse el sistema (sausuritización).