



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

**CARACTERIZACIÓN DE ACTINOLITAS PRESENTES EN LOS DEPÓSITOS  
ÓXIDO DE HIERRO-APATITO ELICENA, MARIPOSA E IMÁN, REGIÓN DE  
ATACAMA, CHILE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

ALEJANDRA ANTONIA PALMA MORALES

**PROFESORA GUÍA**  
IRENE DEL REAL CONTRERAS

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN**  
MARTIN REICH MORALES  
FERNANDO BARRA PANTOJA

SANTIAGO DE CHILE  
2023

## RESUMEN

Los depósitos de tipo óxido de hierro-apatito (IOA) representan un gran interés económico debido a sus concentraciones explotables de Fe (magnetita y/o hematita) y otros elementos críticos (REE, P, U, Ag y Co). En Chile, estos depósitos se encuentran ubicados principalmente en la denominada Franja Ferrífera Chilena, que se extiende desde las localidades de Taltal a Ovalle formada durante el Jurásico Superior al Cretácico medio. Existen distintos estilos de mineralización que caracterizan a los depósitos tipo IOA de los Andes, pueden tener una geometría del tipo veta, brecha y manto. Los depósitos IOA, independiente de su estilo de mineralización, contienen actinolita dentro de su paragénesis, mineral que es posible observar con diversas texturas reconocibles a distintas escalas. El presente estudio tiene como principal objetivo identificar las diferencias macro y micro-texturales entre actinolitas pertenecientes a tres depósitos IOA con distintos estilos de mineralización; Elicena, Mariposa e Imán, localizados al sur de la ciudad de Vallenar en la región de Atacama. Estos tres depósitos están situados muy cerca entre sí, donde Elicena presenta mineralización brechiforme, Mariposa mineralización vetiforme, mientras que Imán presenta una mineralización mantiforme. Para diferenciar y clasificar las distintas texturas y estilos de alteración de actinolita en los tres depósitos, se realizaron estudios macroscópicos y microscópicos. El estudio macroscópico de los depósitos incluyó una visita de campo para Elicena y Mariposa, para Imán fueron analizados testigos de sondajes extraídos del depósito. El estudio microscópico se realizó a partir de observaciones petrográficas complementadas con datos micro-analíticos cualitativos obtenidos a partir del uso de microscopía electrónica de barrido (SEM) para los tres depósitos. Los resultados obtenidos permiten identificar repeticiones de algunas texturas de actinolita entre los depósitos, así como también, texturas propias para cada uno. Para el depósito Elicena se identificó como textura exclusiva un tipo de actinolita de grano fino fibrosa en conjunto con clorita asociada a la mineralización diseminada de magnetita en clastos de brecha. La textura exclusiva identificada en Mariposa corresponde a actinolita de grano muy grueso dispuesta en las paredes de las vetas de magnetita, con orientación preferente perpendicular a estas. Como textura exclusiva para Imán, se identificó actinolita de grano grueso acicular radial asociada a la mineralización masiva de magnetita. También, se encontraron diferencias en el tipo de zonación presente en actinolitas de los tres depósitos. Las actinolitas de Elicena en su mayoría presentan zonaciones en parche y localizada, que sugieren una formación en más de un evento de mineralización. Las actinolitas de Mariposa casi no exhiben zonación, por lo que sugieren no haberse formado en múltiples eventos de mineralización. En Imán se presentan actinolitas con zonación normal y oscilatoria, que, sumada a los múltiples eventos de alteración y mineralización identificados, sugieren una cristalización asociada a más de un evento de mineralización. En base a los distintos estilos de mineralización y a los eventos de alteración/mineralización que caracteriza a cada depósito, se sugiere para el depósito brechiforme Elicena una formación a profundidades someras y una clasificación como IOA pegmatítico. Para el depósito vetiforme Mariposa se sugiere un ambiente de formación profundo y una clasificación como IOA transicional. Para el depósito mantiforme Imán se sugiere una clasificación como IOA hidrotermal, ubicado en una zona de transición entre depósito IOA e IOCG pobre en Cu según la facies de alteración K – Fe que lo caracteriza. Se concluye que las diferencias texturales y composicionales en actinolitas tienen relación directa con el estilo de mineralización que caracteriza a cada depósito IOA estudiado. Además, el estudio de las zonaciones que exhiben estas diferentes texturas de actinolita permite realizar interpretaciones acerca de los distintos eventos de alteración y mineralización que habrían formado a cada depósito.

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quisiera agradecer a Irene, por guiarme durante todo este periodo, por acogerme, comprenderme y sobre todo por haber tenido tanta paciencia conmigo. Gracias por haber mostrado preocupación no solo en lo académico, sino también en lo personal, no muchos tienen la suerte de poder contar con una persona tan completa tanto en valores humanos, como también en sabiduría.

A los miembros de mi comisión, Martín y Fernando, por haber aceptado formar parte de este proceso, por su buena disposición y por haber realizado las correcciones y sugerencias pertinentes para poder crecer como futura profesional. Se que estuvieron pendientes de mi trabajo, siempre dispuestos a ayudar y aportar con sus conocimientos. A Blanca por realizar las gestiones necesarias, ofrecer su ayuda y asesoría siempre que me vi desesperada. Al Dago, mi “SEMsei”, el encargado de capacitarme en el SEM y quien me acompañó durante todo mi trabajo en la Universidad Austral. A la Gilla y el Pablo, dos grandes geólogos que tuve la suerte de conocer en terrenos junto a Irene. Gracias por haber ofrecido no solo sus conocimientos, sino también su amistad.

A mi generación de Geo, orgullosa de ser “beta” porque estoy segura de que mejor grupo humano no ha existido. Gracias a cada uno de ustedes por las risas, por aguantar mis locuras y sobre todo, por las veces que me ayudaron cuando hubo algo que no entendí, porque lo que menos les importó fue competir. A “Las the Rial”, mi team, el grupo más bacán de mujeres geo que conozco. Gracias por haber sido parte de esta aventura, por haber compartido el estrés y habernos ayudado mutuamente a terminar la carrera. Gracias por las risas y los cahuines, de eso sí que tuvimos de sobra. A mi paragénesis Coni, debería ser ilegal que nuestros títulos universitarios no lleven los nombres de las dos porque esta carrera la cursamos juntas de inicio a fin. Al Agus, Pinin y Mono, mis linditos buenos para hacerme bullying, de los hombres más bacanes que conocí en la U, gracias por las risas y por los golpes que más de una vez nos dimos.

A mi equipo de Futbolito que me acompañó durante los siete eternos años universitarios y a todas las mujeres bacanes que conocí jugando a la pelota. Fueron mi principal motivación para no haber abandonado cuando las cosas se pusieron difíciles.

A mi Fabi y mi Lunits (mis Feas), no hay cosa que agradezca más que haberlas conocido en ese campeonato premechón, fueron mi principal soporte y alegría durante todo el periodo universitario. Sin duda lo más lindo que me pudo haber dejado la universidad. Al Kike, por ser la primera persona en la que pude confiar apenas entré a la u (en ese primer día de inducción) y desde ese momento que nuestra amistad no ha hecho más que crecer. Al Nachin mi primer amor, gracias por el tiempo que compartimos y el cariño que aún conservamos.

A mi abuela Rosa, que no pudo verme terminar la carrera, pero sé que hubiese sido la primera en estar ahí apoyándome, orgullosa por mi logro. A mi abuela Mari, la persona más motivada con

que yo estudiara geología, quien se encargó de darme todo lo necesario para estar siempre equipada.

A mis perritas Ambar y Matilda, por ser la mayor terapia antiestrés, siempre aparecieron moviendo su colita o con sus locuras cada vez que me sentí agobiada.

A mis padres Alejandro y Marlene, por su amor incondicional, por haber aguantado a esta cabra chupete, por haber dedicado su tiempo en educarme y ser mi principal fuente de inspiración, gracias a ustedes son mis logros. A mis hermanos Javi, Maca y mi partner Pipe, no pude pedir mejores amigos, con ustedes siempre ha sido suficiente. No hay persona más afortunada que yo al tenerlos, son el motor de mi vida y los amo con todo mi corazón.

*Si supiéramos qué es lo que estamos haciendo,  
no se llamaría investigación ¿verdad?*  
**Albert Einstein**

*Nada está perdido si se tiene el valor  
de proclamar que todo está perdido  
y hay que empezar de nuevo*  
**Julio Cortázar**

## TABLA DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1	Motivación y formulación del problema.....	1
1.2	Objetivos .....	4
1.2.1	Objetivo general.....	4
1.2.2	Objetivos específicos .....	4
1.3	Hipótesis de trabajo .....	5
1.4	Ubicación y accesos .....	5
2	MARCO GEOLÓGICO .....	7
2.1	Marco tectónico.....	7
2.2	Geología distrital.....	8
2.3	Marco metalogénico.....	12
2.4	Geología estructural distrital .....	15
3	MARCO TEÓRICO .....	17
3.1	Estructura y ocurrencia de la actinolita .....	17
3.1.1	Estructura .....	17
3.1.2	Ocurrencia.....	18
4	METODOLOGÍA.....	20
4.1	Recopilación de antecedentes .....	20
4.2	Trabajo de campo.....	20
4.3	Microscopio Óptico.....	22
4.4	Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).....	24
5	RESULTADOS .....	27
5.1	Observaciones en trabajo de campo.....	27
5.1.1	Depósito Elicena .....	27
5.1.2	Depósito Mariposa .....	30
5.1.3	Depósito Imán.....	33
5.2	Petrografía de muestras .....	38
5.2.1	Depósito Elicena .....	38
5.2.2	Depósito Mariposa .....	40
5.2.3	Depósito Imán.....	41
5.3	Morfología de actinolitas .....	45
5.3.1	Macrotexturas .....	45
5.3.2	Microtexturas .....	48

5.3.3	Zonaciones .....	54
5.4	Caracterización textural .....	57
5.4.1	Elicena .....	57
5.4.2	Mariposa .....	58
5.4.3	Imán .....	60
6	DISCUSIONES .....	63
6.1	Estilo de la mineralización .....	63
6.2	Eventos de mineralización y alteración.....	65
6.2.1	Elicena .....	65
6.2.2	Mariposa .....	65
6.2.3	Imán .....	66
6.3	Ocurrencia de actinolita .....	68
6.3.1	Elicena .....	68
6.3.2	Mariposa .....	68
6.3.3	Imán .....	69
6.4	Síntesis e interpretaciones .....	71
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	73
8	BIBLIOGRAFÍA .....	75
	ANEXOS .....	86
	Anexo A. Descripciones petrográficas secciones pulidas – transparentes.....	86
	Anexo B. Imágenes BSE SEM. ....	114
	Anexo C. Geoquímica de actinolitas analizadas mediante SEM. ....	136

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 4.1:</b> Resumen de las muestras analizadas mediante microscopio petrográfico y SEM de los depósitos Elicena (ELI), Mariposa (CAM) e Imán (Iman). .....	23
<b>Tabla 4.2:</b> Resumen de parámetros utilizados en SEM. ....	26
<b>Tabla 5.1:</b> Texturas de actinolita según leyes de Fe. ....	35



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<b>Figura 1.1:</b> Ubicación de la zona de estudio. En celeste se muestra la ubicación de los depósitos Elicena, Mariposa e Imán. Imagen satelital tomada de Google Earth Pro. ....	6
<b>Figura 2.1:</b> Sección tectonomagmática esquemática del margen andino central del norte y centro de Chile. Muestra las características relevantes para la formación de la franja metalogénica del Cretácico Inferior. La Figura muestra un arco magmático extensional a transtensional, subducción pronunciada, corteza delgada y alto gradiente geotérmico, vulcanismo abundante y desarrollo de arcos magmáticos y cuencas de trasarco. En este ambiente se formaron depósitos IOCG, IOA, Cu tipo manto y pequeños pórfidos de Cu. Modificado de Escolme (2016).....	8
<b>Figura 2.2:</b> Mapa geológico de la zona. Modificado de Marquardt (2016). ....	11
<b>Figura 2.3:</b> Mapa Mapa que muestra la ubicación de los depósitos de óxido de Fe-apatito (IOA) y óxido de Fe-cobre-oro (IOCG) en la Franja Ferrífera Chilena, asociados espacial y temporalmente con el Sistema de Falla de Atacama. Extraído de Rojas et al. (2018). ....	13
<b>Figura 2.4:</b> Modelo genético esquemático para la formación de depósitos IOA chilenos del Cinturón de Fe de Chile y El Laco. La figura muestra diferentes estilos o subtipos de mineralización IOA dependiendo de la profundidad del emplazamiento: profundo (p. ej., Los Colorados); de transición (p. ej., El Romeral); intermedio (p. ej., Cerro Negro Norte); pegmatítico (Carmen, Fresia y Mariela); y depósitos subvolcánicos/subaéreos poco profundos (p. ej., El Laco). También se muestra la ubicación de los depósitos IOA Elicena, Mariposa e Imán. El depósito Imán se ubicaría en el límite de la transición entre los depósitos IOA e IOCG. Extraído de Palma et al. (2020). ....	14
<b>Figura 2.5:</b> Imagen satelital con los principales sistemas de falla asociados espacialmente a depósitos IOCG e IOA presentes en la zona de estudio (Modificado de Perez et al., 2012). ....	16
<b>Figura 3.1:</b> Diagrama de clasificación para anfíboles cálcicos ( $Ca > 1,5$ c.p.f.u. y $(Na+K)A < 0,5$ c.p.f.u) (Leake et al., 1997). En rojo la serie tremolita – actinolita. ....	17
<b>Figura 3.2:</b> Arreglo atómico de celda unitaria correspondiente a una tremolita. Donde las esferas verdes pequeñas corresponden a átomos de Mg, las verdes grandes a Ca, las de color rojo a O y por último aquellas de color piel que corresponden a átomos de Si (Cameron et al., 1973). ....	18
<b>Figura 4.1:</b> Imagen satelital de la ubicación de los sondajes diamantina analizados en el depósito Imán. En rojo (estrella) los 6 sondajes descritos. ....	21
<b>Figura 4.2:</b> Imagen satelital obtenida de Google Earth. Muestra los puntos de control realizados durante la campaña de terreno. Paradas Día 1: corresponde a las paradas realizadas en el depósito Mariposa, mientras que Paradas Día 2: corresponde a las paradas realizadas en el depósito Elicena. ....	22
<b>Figura 4.3:</b> Metodología aplicada al SEM. A) Los cortes previamente sombreados son puestos en el portamuestras. B). Se está realizando un análisis de la información recolectada por el detector con el software AZtec 4.2 SP1, en el cual se realizó una selección de puntos de distintos tonos de grises que simbolizan las diferencias químicas composicionales presentes en cada grano seleccionado. ....	25
<b>Figura 5.1:</b> Morfología de los piques de extracción de magnetita pertenecientes al depósito Elicena, tipo túnel o mina subterránea. Es posible observar el acopio de bloques y el ingreso al túnel, no se observan evidencias superficiales de mineralización. ....	27
<b>Figura 5.2:</b> Roca con mineralización de magnetita y albitización (blanco) pervasiva de la roca. ....	28
<b>Figura 5.3:</b> Esquema simplificado de la mineralización principal del depósito Elicena. El esquema muestra la distribución del cuerpo de brecha principal de orientación NNW y en los bordes de la mineralización la roca caja Andesita Porfídica. Extraído de Minería Activa SpA. ...	29

<b>Figura 5.4:</b> Roca caja depósito Mariposa. Se observa la afloramiento obliterado y muy oxidado.	30
<b>Figura 5.5:</b> Alteraciones asociadas al depósito Mariposa. A) Roca con mineralización de magnetita y hematización (zona anaranjada), apatito (Ap) y cristales de calcita grano grueso (Cal). B) Muestra de actinolita alterada a talco con hematita especular diseminada (Sp).	30
<b>Figura 5.6:</b> Mineralización del depósito Mariposa. A) Morfología de los piques de extracción de magnetita pertenecientes característicos del depósito, con grandes cristales de actinolita (act) en los bordes de la veta. B) Mineralogía característica del depósito en vetas (apatito (Ap), actinolita (Act) y hematita (Ht). C) Bloque con mineralización masiva de magnetita y cristales diseminados de magnetita prismática (Mt). D) Cristales fibrosos de actinolita grano muy grueso (> 3 cm).	31
<b>Figura 5.7:</b> Esquema simplificado de la principal mineralización de magnetita en el depósito Mariposa. Modificado de Rojas (2018).	32
<b>Figura 5.8:</b> Litologías de roca caja presente en el depósito Imán. A) Andesita porfídica. B) Diorita muy obliterada.	33
<b>Figura 5.9:</b> Mineralogía de alteración asociada al depósito Imán. En A) albita (Alb), en B) anhidrita (Anh), escapolita (Esc) y biotita secuntaria (Bt), y en C) actinolita (act), epidota (Ep) y calcita (Cal).	34
<b>Figura 5.10:</b> Mineralización de sulfuros en el depósito Imán. calcopirita (Ccp) amarillo latón y pirita (Py) de color dorado.	35
<b>Figura 5.11:</b> Mineralización de magnetita depósito Imán. A) Mineralización en vetillas (Mt) con actinolita acicular grano fino (Act). B) Intercrecimiento de magnetita (Mt) con actinolita acicular radial grano grueso (Act). C) Mineralización masiva de magnetita con actinolita grano muy fino en vetillas (Act). D) Mineralización masiva de magnetita con biotita secundaria (Bt) reemplazando granos de actinolita. Todas las imágenes mostradas tienen un grosor de 5 cm.	36
<b>Figura 5.12:</b> Esquema simplificado de la mineralización mantiforme del depósito Imán. Modificado de Marquardt (2016).	37
<b>Figura 5.13:</b> Imágenes muestran la mineralogía principal que compone la roca caja del depósito Elicena. A) Fenocristal de feldespato (Feld) en una masa microcristalina de plagioclasa (Plg) y feldespato. B) Fenocristales plagioclasa (Plg) y hornblenda (Anf), estos últimos siendo alterados a actinolita (Act).	38
<b>Figura 5.14:</b> Imágenes muestran la mineralogía de alteración que presenta el depósito. A) Fenocristal de apatito (Ap) cortado por actinolita (Act) de hábito fibroso. B) Actinolita subhedral asociada a epidota (Ep), arcilla (Arc) y sericita (Ser) en la masa.	39
<b>Figura 5.15:</b> Muestra la mineralización de magnetita (Mt) que presenta el depósito. En la amplificación de la izquierda se pueden observar las líneas de hematita (Ht).	39
<b>Figura 5.16:</b> Imágenes muestran la mineralogía principal que compone la roca caja del depósito Mariposa. A) Se observa hornblenda alterada a actinolita (Act) y biotita (Bt) alterada a clorita (Chl). B) Se observa mineralogía de roca caja correspondiente principalmente a ortoclasa (Feld-k).	40
<b>Figura 5.17:</b> Mineralogía de alteración que caracteriza al depósito Mariposa. A) Fenocristales de clorita (Chl), biotita (Bt) y actinolita (Act) rodeados por una masa sericitizada junto a epidota. B) Gran cristal de actinolita (Act) con cuancho secundario (Qz) en sus intersticios.	41
<b>Figura 5.18:</b> Mineralización principal del depósito Mariposa. A) Magnetita (Mt) diseminada. B) Magnetita (Mt) masiva intercrecida con cristales de actinolita (Act) grano grueso.	41
<b>Figura 5.19:</b> Muestra la mineralogía primaria que compone la roca caja. A) Roca de textura porfídica, con fenocristales de feldespato-k (Feld) como mineral accesorio y cristales de hornblenda alterados a actinolita (Act) inmersos en una masa microcristalina de plagioclasa, mineralogía característica de andesita. B) Roca de textura fanerítica, con cristales de anhidrita	

(Anh), clorita (Chl) y cristales de biotita (Bt) y hornblenda (Anf) siendo alterados, mineralogía característica de diorita.....	42
<b>Figura 5.20:</b> Mineralogía de alteración que caracteriza al depósito Imán. A) Sericita (Ser) alterando segmentos medios de cristales de atinolita (Act), biotita (Bt) y epidota (Ep) alterando bordes. B) Cristales de apatito (Ap), actinolita (Act) y biotita secundaria (Bt) intercrecidos. C) Veta de calcita (Cal) y anhidrita (Anh) en andesita. D) Alteración pervasiva de clorita (Chl) y también calcita (Cal) intersticial.....	43
<b>Figura 5.21:</b> Mineralización principal del depósito Imán. A) Diseminaciones de pirita (Py) y calcopirita (Ccp), magnetita (Mt) relleno de cavidades. B) Mineralización masiva de calcopirita (Ccp) fracturando cristales de actinolita (Act). C) Mineralización masiva de pirita (Py) con inclusiones de calcopirita (Ccp). D) Mineralización masiva de magnetita euhedra (Mt) intercrecida con cristales de actinolita.....	44
<b>Figura 5.22:</b> Actinolita grano grano fino junto a magnetita como reemplazo pervasivo de roca caja.....	45
<b>Figura 5.23:</b> Macrotexturas de actinolitas representativas del depósito Mariposa. A) Actinolita (Act) fibrosa de grano muy grueso (10 cm). B) Actinolita fibrosa grano grueso (2 cm) con disposición preferente en roca de magnetita masiva. C) Actinolita grano fino a medio (<1 mm – 5 mm) en finas vetas asociadas con apatito.....	46
<b>Figura 5.24:</b> Macrotexturas de actinolitas representativas del depósito Imán. A) Vetilla de actinolita grano fino cortando la roca, mientras que cerca a esta veta se observan cristales de grano medio. B) Roca caja con su masa fundamental alterada a actinolita (Act) y/o clorita. C) Clastos en brecha cuya composición corresponde a una roca volcánica que fue alterada a actinolita (Act). D) Veta curva de magnetita (Mt) intercrecida con cristales de actinolita (Act) grano medio. E) Cristales pálidos de actinolita (Act, posible tremolita) grano grueso con hábito radial intercrecidos con magnetita (Mt). F) Magnetita (Mt) intercrecida con biotita secundaria (Bt) reemplazando actinolita. G) Cristales grano medio de actinolita (Act) en asociación con epidota (Ep), calcita (Cal), clorita alterando a actinolita y magnetita (Mt).....	47
<b>Figura 5.25:</b> Microtexturas de actinolitas características del depósito Elicena. A) y B) Actinolita (Act) subhedral grano medio en asociación con otros minerales de alteración como epidota (Ep), sericita (Ser), arcillas (Arc) y apatito (Ap). B) Microcristales de actinolita como reemplazo pervasivo de roca caja.....	48
<b>Figura 5.26:</b> Microtexturas de actinolita características del depósito Mariposa. A) Actinolitas (Act) grano medio hábito fibroso y prismático con orientación preferente. B) Actinolita (Act) grano muy grueso inmersa en magnetita masiva. C) Actinolita (Act) grano medio a fino en asociación con clorita (Chl) asociada a veta de magnetita. D) Actinolita grano fino (Act) diseminada, alterando roca caja con mineralización de magnetita (Mt) diseminada.....	49
<b>Figura 5.27:</b> Microtexturas de actinolita características del depósito Imán. A) Actinolita (Act) grano grueso acicular radial. B) Actinolita (Act) grano medio acicular radial, con alteración a clorita (Chl) y epidota (Ep). C) Microcristales y cristales aciculares grano fino de actinolita (Act) en matriz. F) Actinolita (Act) grano medio acicular radial con reemplazo insipiente de clorita (Chl) y biotita (Bt). .....	50
<b>Figura 5.28:</b> Imágenes BSE de microtexturas observadas en SEM. A) Actinolitas con textura de intercrecimiento (depósito Mariposa). B) Textura de reemplazo con bordes de reacción color claro, que implica un reemplazo insipiente de actinolita (depósito Mariposa).C) Textura acumulada, muestra como cristales amorfos de actinolita se asocian (depósito Elicena). D) Textura nucleada, muestra como actinolita posee una zonación marcada (depósito Imán). E) Textura homogénea, actinolitas no presentan cambios composicionales y se encuentran asociadas a mineralización de magnetita masiva (depósito Mariposa). .....	52

<b>Figura 5.29:</b> Gráfico de texturas por muestra. Indica la cantidad de puntos en actinolitas de cada muestra que presenta cierta textura. Las muestras ELI-1 y ELI-3 pertenecen al depósito Elicena, CAM2 y CAM12 pertenecen al depósito Mariposa y las muestras Iman01-03, Iman02-02, Iman14-01 e Iman14-03 pertenecen al depósito Imán. ....	53
<b>Figura 5.30:</b> Imágenes BSE de zonaciones presentes en cristales de actinolitas pertenecientes al depósito Elicena. A) Actinolita de la muestra ELI-1 con leve zonación inversa, exhibe bordes de distinta composición asociada a una textura de reemplazo, asociada a apatito (Ap). B) Actinolita de la muestra ELI-1 con zonación en parches, la esquina superior izquierda muestra intercrecimiento. C) Zonación en parches en actinolita de la muestra ELI-3 con textura acumulada (masiva) asociada a vetilla de calcita (Cal) D) Zonación en parches en actinolita de la muestra ELI-3 con textura de intercrecimiento, asociada a clorita (Chl) y epidota (Ep). ....	55
<b>Figura 5.31:</b> Imágenes BSE de zonaciones presentes en cristales de actinolita pertenecientes al depósito Mariposa. A) y B) Actinolitas de la muestra CAM2 exhiben zonación normal, posiblemente presente en su composición concentración de elementos asociados a los minerales colindantes, como clorita (Chl), apatito (Ap), epidota (Ep). C) y D) Actinolitas de la muestra CAM12 asociadas a mineralización masiva de magnetita (Mt) con ausencia de zonación y cuarzo (Qz) como cemento. ....	55
<b>Figura 5.32:</b> Imágenes BSE de zonaciones presentes en cristales de actinolita pertenecientes al depósito Imán. A) Actinolita de la muestra Iman01-03 con textura de reemplazo posee zonación oscilatoria, se encuentra asociada a anhidrita intersticial. B) Actinolita de la muestra IMAN02-02 con textura nucleada, exhibe zonación normal. C) Actinolita de la muestra IMAN14-01 con textura de reemplazo presenta zonación en parches, al igual que la actinolita de la muestra IMAN14-03 en D. ....	56
<b>Figura 5.33:</b> Actinolita de grano medio en vetillas (depósito Elicena). Izquierda: Actinolita (Act) en asociación con apatito (Ap). Derecha: Actinolita con textura de reemplazo asociada a apatito (Ap) y zonación amorfa (derecha). ....	57
<b>Figura 5.34:</b> Actinolita anhedral de grano muy fino (depósito Elicena). Izquierda: Actinolita como reemplazo de roca caja. Derecha: Actinolita con textura acumulada y zonación irregular en parches. ....	58
<b>Figura 5.35:</b> Actinolita fibrosa de grano muy fino (depósito Elicena). Izquierda: Actinolita (Act) en los bordes de las diseminaciones de magnetita (Mt). Centro: Igual a figura de la izquierda, pero imagen BSE. Derecha: Actinolita con textura de intercrecimiento y zonación irregular en parches. ....	58
<b>Figura 5.36:</b> Actinolita de grano grueso a muy grueso (depósito Mariposa). Izquierda: Actinolita en muestra de mano. Centro: Actinolita (Act) inmersa en magnetita (Mt) masiva. Derecha: Actinolita con textura acumulada (masiva) y leve zonación irregular en parches. ....	59
<b>Figura 5.37:</b> Actinolita de grano fino a medio en vetillas (depósito Mariposa). Izquierda: Actinolita (Act) en muestra de mano asociada a apatito (Ap). Centro: Actinolita (Act) asociada a magnetita (Mt) y clorita (Chl). Derecha: Actinolita con textura de reemplazo y zonación normal. ....	59
<b>Figura 5.38:</b> Actinolita de grano muy fino (depósito Mariposa). Izquierda: Actinolita (Act) inmersa en magnetita (Mt) masiva. Derecha: Actinolita (Act) con textura homogénea y ausencia de zonación, inmersa en magnetita (Mt). ....	60
<b>Figura 5.39:</b> Actinolita acicular radial (depósito Imán). Izquierda: Actinolita (Act) en asociación con magnetita (Mt) y epidota (Ep). Centro: Actinolita (Act) en asociación con clorita (Chl). Derecha: Actinolita (Act) con textura nucleada y zonación normal. ....	60
<b>Figura 5.40:</b> Actinolita de grano medio reemplazada por biotita (depósito Imán). Izquierda: Actinolita reemplazada (Bt) en asociación con magnetita (Mt). Centro: Actinolita (Act) en	

asociación con clorita (Chl) y con alteración a biotita (Bt). Derecha: Actinolita (Act) con textura masiva y zonación localizada (Bt).....	61
<b>Figura 5.41:</b> Actinolita de grano fino (depósito Imán). Izquierda: Actinolita (Act) en clastos de brecha alterados. Centro: Actinolita (Act) reemplazando pervasivamente la roca caja. Derecha: Actinolita con textura acumulada (masiva) y zonación en parches.....	61
<b>Figura 5.42:</b> Actinolita fibrosa de grano medio (depósito Imán). Izquierda y centro: Actinolita (Act) de grano medio en asociación con magnetita (Mt), calcita (Cal) y epidota (Ep). Derecha: Actinolita con textura de reemplazo y zonación normal e irregular en parches.....	62

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Motivación y formulación del problema

El Fe es un elemento esencial para el proceso de fabricación de acero, el cual es altamente demandado en la industria de la construcción, transporte, infraestructura energética y electrodomésticos. El alza constante en la demanda por este recurso debido a la urbanización y modernización exige el crecimiento de la actividad minera. Es ante esto, que a lo largo de la historia se han realizado numerosas investigaciones científicas y campañas de exploración, cuyo principal objetivo ha sido comprender el origen de los distintos tipos de depósitos de hierro y así facilitar su posterior extracción.

Chile ha cumplido un rol importante en lo que a extracción mineral respecta, esto debido a que la geología de la zona permite que se formen una gran cantidad de depósitos mineros. Uno de estos depósitos, es el de tipo magnetita-apatito (IOA - Iron Oxide Apatite) denominado como el miembro final pobre en cobre de los depósitos de óxido de hierro-cobre-oro (IOCG - Iron Oxide Copper Gold) (Palma et al., 2020). Los depósitos IOA están ubicados en la Cordillera de la Costa del norte de Chile, específicamente en la provincia metalogénica denominada Franja Ferrífera Chilena (Espinoza, 1990; Ménard, 1995) y se hospedan en formaciones volcánicas del Jurásico y Cretácico, como la Formación La Negra y Punta del Cobre (Ruiz et al., 1968; Bookstrom, 1977). Gran parte de estos depósitos IOA se encuentran en la Región de Atacama, caracterizada por ser la segunda región de mayor actividad minera en el país (COCHILCO, 2016) y es en esta región donde están localizados los tres depósitos IOA objeto de este estudio Elicena, Mariposa e Imán, ubicados específicamente en la comuna de Vallenar.

Ha sido ampliamente documentado que los depósitos de IOCG se forman principalmente por procesos hidrotermales (Sillitoe, 2003; Williams et al., 2005; Mumin et al., 2007; Groves et al., 2010; Barton, 2014). Sin embargo, a pesar de su importancia económica y que los depósitos IOA corresponden a una fuente importante de Fe (Foose & McLelland, 1995; Chiaradia et al., 2006; Barton, 2014), el origen de estos depósitos y que controla sus diferencias sigue siendo un tema de debate. Diversos estudios han llevado a postular un origen magmático para estos depósitos, donde se sugiere que los depósitos de tipo IOA se formaron por intrusión y cristalización de un cuerpo mineral rico en Fe en los niveles someros de corteza (Geijer, 1931; Park, 1961; Nyström & Henríquez, 1994; Broman et al., 1999; Naslund et al., 2002; Henriquez et al., 2003). Por otro lado, autores presentaron evidencias que apoyan un origen hidrotermal, donde el mineral de magnetita se forma por reemplazo metasomático de rocas hospedantes por fluidos ricos en Fe provenientes de fuentes magmáticas-hidrotermales (Rhodes & Oreskes, 1999; Sillitoe & Burrows, 2002; Sillitoe, 2003).

Recientemente se planteó un modelo genético, el “modelo de flotación”, que permite explicar la formación de los distintos depósitos de tipo IOA a partir de una combinación de procesos

magmáticos e hidrotermales (Knipping et al., 2015a, b; Bilenker et al., 2016; Reich et al., 2016; Barra et al., 2017, Simon et al., 2018). Este modelo ha sido utilizado como base para proponer una posible conexión genética entre los depósitos IOA e IOCG, donde la mineralización profunda, sin sulfuro (IOA) evoluciona hasta la mineralización somera de magnetita rica en sulfuro (IOCG) y que, por lo tanto, los depósitos de IOA representarían la porción basal de los sistemas de IOCG (Knipping et al., 2015a, b, Naslund et al., 2002, Sillitoe, 2003).

Debido a que el modelo de flotación permite variaciones para el origen de los depósitos IOA Andinos, fueron definidos distintos subtipos de mineralización IOA. Estos subtipos reflejan la formación del depósito a diferentes profundidades de la corteza (de tipo profundo, de transición, intermedio, pegmatítico y subvolcánicos/aéreos poco profundos) y están controlados por profundidad de formación, estructuras/fallas, composición de la roca huésped, fuente de fluidos hidrotermales y relación fluido/roca (Palma et al., 2020). Asociados a estos subtipos de mineralización, existen distintos estilos de mineralización que caracterizan a los depósitos de tipo IOA Andinos y evidencian la existencia de emplazamientos subvolcánicos a profundos (Allen et al., 1996; Palma et al., 2020), entre estos estilos se destacan cuerpos minerales masivos de magnetita, vetas, cuerpos lenticulares, mantos y brechas con actinolita, apatito (generalmente <1% modal) y trazas de sulfuros como pirita y calcopirita (Frietsch, 1978; Nyström & Henriquez, 1994; Vivallo & Henriquez, 1997).

Los modelos de formación previamente mencionados han sido definidos en base a estudios texturales y geoquímicos realizados en magnetita y otras fases minerales (pirita, actinolita, apatito) asociadas a la mineralización en los depósitos IOA e IOCG Andinos. La actinolita corresponde al mineral de alteración más común presente en los depósitos IOA de la provincia Andina, ocurre en la mayoría de los depósitos de Fe del Cretácico de Chile y suele encontrarse en paragénesis con la mineralización de magnetita. Datos experimentales demuestran que la estabilidad térmica de la actinolita depende de su contenido de Fe y Mg, que disminuyen linealmente en un amplio rango de P-T, y es aplicable como indicador indirecto para estimar la temperatura de formación del depósito (Lledo & Jenkins, 2008). Recientemente se realizó una investigación sobre variaciones microtexturales y composicionales en actinolita, para restringir la evolución térmica del depósito IOCG Candelaria en Chile (Del Real et al., 2021).

Además de su función como geotermómetro, una característica que hace especial a la actinolita es que este mineral presenta numerosas texturas, cuyas diferencias (hábito, tamaño, color, etc) son visibles tanto a nivel macroscópico como microscópico. Sin embargo, a pesar de poseer esta cualidad y de su abundancia en los depósitos IOA Andinos, existen pocos estudios enfocados en las diferencias texturales presentes entre actinolitas pertenecientes a diferentes subtipos de depósitos IOA. La actinolita también corresponde a uno de los principales minerales de alteración presente en los depósitos Elicena, Mariposa e Imán, los cuales poseen distintos estilos de mineralización, brechiforme (Elicena), vetiforme (Mariposa) y tipo manto (Imán). Ante esto, este estudio tiene como principal objetivo identificar diferencias macrotexturales y microtexturales entre actinolitas pertenecientes a estos depósitos IOA. Con el propósito de definir texturas exclusivas para cada estilo de mineralización que los caracteriza.

Para cumplir con el propósito de este estudio, en el presente trabajo se presentan observaciones macroscópicas y petrográficas realizadas a partir del análisis de muestras de mano recolectadas durante trabajo de campo y logueo de sondajes, así como también del análisis de cortes transparentes mediante microscopio petrográfico. Estas observaciones comprenden datos composicionales de roca caja, alteraciones, mineralizaciones y texturas de actinolita. En este trabajo también se reportan datos micro-analíticos cualitativos de zonaciones y microtexturas de actinolita adquiridos mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). A partir de lo cual, se establecen relaciones entre las texturas observadas a diferentes escalas y se definen tipos de actinolita representativas para cada depósito, las cuales se asocian a los distintos eventos de alteración y mineralización que caracterizan a los depósitos.

Se espera que los resultados obtenidos en este trabajo evidencien texturas diferentes que muestren relación con los distintos estilos de mineralización que caracterizan a los tres depósitos estudiados y que estas texturas entreguen información acerca del ambiente de formación de cada depósito. De cumplirse este objetivo, el presente trabajo de título significaría una fuente de información importante para la exploración futura de depósitos IOA a partir del análisis textural de actinolitas.



## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

El objetivo general de este estudio es identificar diferencias macrotexturales y microtexturales entre actinolitas de tres depósitos IOA Elicena, Mariposa e Imán, con el propósito de definir texturas exclusivas para cada estilo de mineralización que caracteriza a los tres depósitos estudiados (brechiforme en el depósito Elicena, vetiforme en Mariposa y tipo manto en Imán). Se espera que la identificación de estas texturas sirva como base para la exploración futura.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Para lograr cumplir con el objetivo general de este estudio se definieron los siguientes objetivos específicos:

- Realizar una caracterización general de los tres depósitos estudiados para lograr comprender el comportamiento macroscópico del sistema mineralizador. Esta caracterización debe incluir observaciones de campo, como litología de roca caja, mineralogía primaria y secundaria (o de alteración), morfología o estilo de la mineralización y orientación de estructuras principales.
- Determinar diferencias macroscópicas y microscópicas presentes entre los tres depósitos, principalmente en el mineral de alteración actinolita. A partir de una descripción detallada de las alteraciones en las que se identifica actinolita y de las principales texturas que esta exhibe, mediante el análisis de muestras en microscopio óptico y SEM.
- Identificar potenciales zonaciones en actinolita mediante el uso del SEM, para determinar a partir de imágenes BSE variaciones composicionales presentes en los granos.
- Determinar la secuencia de los eventos que caracterizan a cada depósito e identificar a que evento está asociado cada textura de actinolita.

### **1.3 Hipótesis de trabajo**

Existen diferentes texturas de actinolitas para los tres depósitos IOA, estas texturas están asociadas a los distintos estilos de mineralización que caracterizan a estos depósitos (brechiforme en el depósito Elicena, vetiforme en Mariposa y tipo manto en Imán) generados por distintos eventos de alteración y mineralización asociados a sistemas mineralizadores independientes.

### **1.4 Ubicación y accesos**

Los depósitos objetivos de este estudio, Elicena, Mariposa e Imán, se distribuyen en la zona norte del país específicamente en la comuna de Vallenar, región de Atacama, están localizados a aproximadamente 534 km al norte de Santiago y 140 Km al norte de la Serena (Figura 1.1). A continuación, se detalla la ubicación de cada depósito y se mencionan las principales rutas de acceso.

El depósito Elicena se encuentra ubicado en la provincia de Huasco, 18 km al SW de Vallenar, hacia Cerro Yungay, las coordenadas geográficas de su centro son 28°39'58 latitud sur y 70°48'29 longitud oeste (UTM: 323.298,6E y 6.827.664,4N), 600 metros sobre el nivel del mar. Al igual que Elicena, Mariposa se encuentra ubicado en la provincia de Huasco, 19 km al SW de Vallenar, también hacia Cerro Yungay y sus coordenadas geográficas son 28°40'32 latitud sur y 70°49'09 longitud oeste (UTM: 322.227,7E y 6.826.604N), se localiza próximo al depósito Elicena aproximadamente 1,5 km al SW, en un alto topográfico similar. Por último, el depósito Imán se encuentra ubicado 10km al SW de Vallenar y a 40km de la costa, a solo 350 metros sobre el nivel del mar y cubre un área total de proyecto de 11,217 Ha de propiedad minera, las coordenadas geográficas de su centro son 28°34'06 latitud sur y 70°51'50 longitud oeste (UTM: 317.670E y 6.837.142N) y se ubica 9 km al NW de los depósitos Elicena y Mariposa.

Los depósitos cuentan con buenos accesos tanto desde Vallenar (Figura 1.1) como desde la Serena, a través de la carretera panamericana (Ruta 5 S) y luego tomando el camino C-486 (Elicena y Mariposa) y C-472 (Imán). Dentro de la zona de estudio existen diversos caminos asfaltados y numerosos caminos ripiados y huellas, los que se encuentran en regular estado, que permiten el acceso diferentes puntos de interés.



**Figura 1.1:** Ubicación de la zona de estudio. En celeste se muestra la ubicación de los depósitos Elicena, Mariposa e Imán. Imagen satelital tomada de Google Earth Pro.

## 2 MARCO GEOLÓGICO

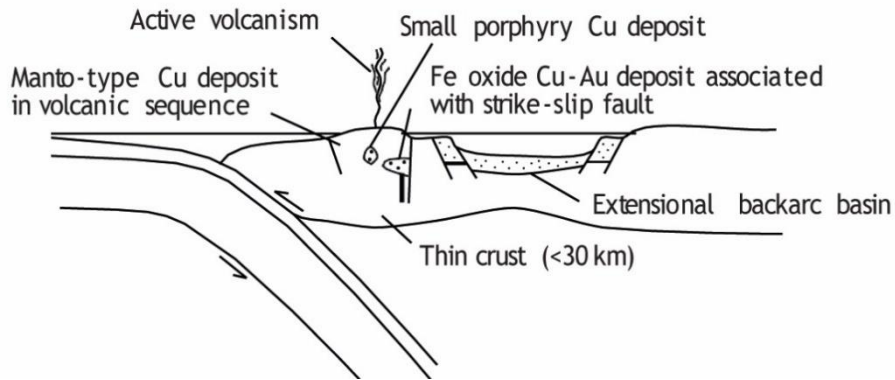
### 2.1 Marco tectónico

La Región Atacama es parte del margen continental activo de América de Sur, entonces parte del sistema tecto-genético de los Andes. La evolución geológica del norte de Chile durante el ciclo tectónico andino ha sido dividida en tres etapas (Charrier et al., 2007). Durante el Jurásico medio hasta Cretácico Inferior, tuvo lugar la primera etapa, caracterizada por inicio del volcanismo y plutonismo en la Cordillera de la Costa del norte de Chile. Este evento estuvo controlado por un régimen tectónico extensional (subducción tipo Mariana) en respuesta al retroceso de la subducción en el margen convergente (Mpodozis & Ramos, 1990). Las condiciones extensionales durante este periodo dieron lugar a la formación de un arco magmático paralelo a la trinchera en retroceso y una cuenca sedimentaria marina de trasarco (Figura 2.1) (Brown et al., 1993; Scheuber et al., 1994). El arco magmático estaba dominado por secuencias volcánicas jurásicas de lavas andesíticas a basálticas (Formación La Negra) (Naranjo, 1978; Godoy & Lara, 1998) y grandes complejos plutónicos dioríticos y granodioríticos (García, 1967; Godoy & Lara, 1998), emplazados en productos de arco e intra-arco volcánico ampliamente contemporáneos.

Cerca de la culminación de la actividad magmática del arco, se desarrolló la actividad transcurrente del Sistema de Falla de Atacama (Hervé, 1987a). Este sistema consiste en un conjunto de fallas de orientación N-S y de distribución longitudinal subparalela al borde continental (Arabasz, 1971), se pueden seguir por más de 1000 km sobre un área que se extiende desde Iquique (20°30'S) al norte de La Serena (29°45'S) (Scheuber y Andriessen, 1990). El Sistema de Falla de Atacama se dispone a lo largo de un arco magmático Mesozoico, de carácter calcoalcalino, relacionado con una zona de subducción. El Sistema de Falla de Atacama presenta un comportamiento tanto dúctil como frágil (Hervé, 1987 a; Scheuber y Andriessen, 1990; Scheuber y Reutter, 1992; Dallmeyer et al. 1996), los movimientos de deslizamiento a lo largo del sistema consisten en dos conjuntos de zonas de corte dúctil de diferentes edades: una Jurásica tardía, formada bajo condiciones de facies de anfibolitas y la otra Cretácico Inferior, con milonitas en facies de esquisto verde. Las asimetrías estructurales apuntan a un movimiento principalmente sinistral en ambos conjuntos (Hervé, 1987a; Scheuber y Andriessen, 1990). Por otro lado, a través de la datación K-Ar de la mineralización asociada, se ha inferido que los desplazamientos frágiles y sinestrales son de edad Cretácico medio (Brown et al., 1993). La transición al comportamiento frágil se atribuye al enfriamiento de la corteza después del cierre del arco magmático (Brown et al., 1993).

Los yacimientos minerales del Mesozoico de la zona norte de Chile tienen una orientación N-S, relacionada con la traza principal del Sistema de Falla de Atacama, o una orientación ENE-WSW relacionada con un conjunto de fallas de transferencia. Estas últimas se correlacionan con lineamientos formados durante el desarrollo de arco-trasarco, o con la intersección de estos dos conjuntos de fallas, donde los desplazamientos transtensionales crearon zonas de dilatación que enfocaron el flujo de los fluidos mineralizantes (Bonson et al., 1996).

## Middle Jurassic to Early Cretaceous



**Figura 2.1:** Sección tectonomagmática esquemática del margen andino central del norte y centro de Chile. Muestra las características relevantes para la formación de la franja metalogénica del Cretácico Inferior. La Figura muestra un arco magmático extensional a transtensional, subducción pronunciada, corteza delgada y alto gradiente geotérmico, vulcanismo abundante y desarrollo de arcos magmáticos y cuencas de trasarco. En este ambiente se formaron depósitos IOCG, IOA, Cu tipo manto y pequeños pórfidos de Cu. Modificado de Escolme (2016).

## 2.2 Geología distrital

A partir de la Carta Geológica del Área Vallenar-Domeyko (Arévalo et al., 2009), será descrita la geología que caracteriza a la zona de estudio y sus alrededores. Las unidades de esta área corresponden principalmente a rocas volcánicas y volcanoclásticas, de probable edad Valanginiana, que se intercalan con rocas calcáreas. El control estructural está subordinado a el Sistema de Falla de Atacama

Los depósitos Elicena y Mariposa se encuentran hospedados en rocas andesíticas pertenecientes a la Formación Punta del Cobre, el depósito Mariposa colinda al este con el Plutón Cachiyuyito del Cretácico Inferior. Por otro lado, el depósito Imán se encuentra hospedado bajo las Gravas del Río Huasco, las cuales se emplazan sobre el Complejo Plutónico La Higuera, el cual intruyó a la Formación Punta del Cobre. Está espacialmente asociado al Sistema de Falla de Atacama, en el segmento de la Zona de Cizalle Algarrobo

### 2.2.1.1 *Formación Punta del Cobre JKpc (Jurásico Superior – Valanginiano; Segerstrom y Ruiz, 1962)*

Corresponde a una secuencia volcánica y volcánico – sedimentaria heterogénea de un espesor máximo de 3050 metros. Está compuesta por tres secciones: la inferior (2.500 m) es principalmente volcánica y se compone por lavas andesíticas, tobas y calizas. La intermedia (400 m) es clástica en su mayoría y contiene brechas, conglomerados y domos dacíticos. La sección superior (150 m) es volcánica e incluye lavas con intercalaciones menores de calizas. Una edad mínima Hauteriviana inferior está determinada por la edad Hauteriviana superior de la Formación Nantoco, que sobreyace a la unidad. Se reportó en calizas de la facies, ubicadas en las cercanías de la mina La Negra, la existencia de Ammonites Crioceratites sp a partir de los cuales se determina una edad Huateriviana superior (Mourgues, 2007). Estas calizas se correlacionan con las presentes en la formación Punta del Cobre. Debido a la falta de una edad precisa para la base de la secuencia, que se encuentra intruida por dioritas del Complejo Plutónico Infiernillo, permiten asignar a la formación un rango de edad entre el Jurásico Superior y el Hauteriviano superior (Arévalo et al., 2009). En la zona de estudio, la unidad aparece intruida por los intrusivos cretácicos: Complejo Plutónico Retamilla (Kir) y Complejo Plutónico La Higuera (Kih) (Figura 2.2).

### 2.2.1.2 *Formación Nantoco Kin (Hauteriviano Superior) (Biese-Nickel in Hoffstetter et al., 1957)*

Secuencia de calizas bien estratificadas, la formación se considera dividida en dos miembros: un miembro inferior compuesto de calcilutitas homogéneas, bien estratificadas y uno superior de brechas macizas y calcilutitas gris oscuras (Segerstrom y Parker, 1959). Aflora como una franja NS de afloramientos, al pie de la Precordillera (Figura 2.2). Contiene amonites pertenecientes a los géneros Sabaudiella y Paraspiticeras, asignándose una edad Huateriviano superior (Mourgues, 2007; Aguirre-Urreta et al., 2007). Esta formación es sobre yacida por depósitos no consolidados a moderadamente consolidados del Mioceno-Holoceno y se encuentra en contacto tectónico mediante una falla normal de orientación noroeste con la Formación Punta del Cobre.

### 2.2.1.3 *Complejo Plutónico Cachiyuyito kidcy (130 Ma) (Fox, 2000)*

El intrusivo Cachiyuyito aflora como un cuerpo alargado de 2,5 km de largo al este del depósito Mariposa (Figura 2.2). El plutón Cachiyuyito fue descrito como una intrusión zonada concéntricamente equigranular débilmente feldespática con un núcleo de tonalita y una fase de borde de diorita. Solo se observa cuarzo libre en el núcleo de tonalita (Fox, 2000; Beeson et al., 2012). La edad absoluta del intrusivo Cachiyuyito indica que es ampliamente coetánea con la estratigrafía volcánica huésped. Esto es consistente con el emplazamiento contemporáneo de plutones y vulcanismo (Sillitoe, 2003).

#### 2.2.1.4 *Complejo Plutónico Retamilla Kir (127-126 Ma) (nueva unidad)*

Corresponde a un cuerpo plutónico compuesto, granodiorítico diorítico-microgranítico, elongado en dirección NNE, que aflora desde la sierra La Sosita hacia el sur, hasta el valle del río Huasco (Figura 2.2). Afloran solo granodioritas, las que constituyen la subunidad plutónica tabular inferior del complejo. Intruye, por el este, brechas volcanoclásticas y epiclásticas de la sección media de la Formación Punta del Cobre y, por el oeste, se encuentra yuxtapuesta, a través de un contacto tectónico por falla de rumbo, con lavas y calizas de la sección inferior de la Formación Punta del Cobre.

#### 2.2.1.5 *Complejo Plutónico La Higuera Kih (ca. 122 Ma) (nueva unidad)*

Corresponde a un intrusivo compuesto, granodiorítico-diorítico, que se expone en la sierra Marañón, en la parte centro-sur de la carta (Figura 2.2). El plutón intruye brechas volcanoclásticas y epiclásticas de la sección intermedia de la Formación Punta del Cobre a través de una superficie plana de manteo leve ( $25^\circ$ ) al oeste, es concordante con la estratificación de la unidad suprayacente y, por lo tanto, constituye un techo plutónico. Está formado por una subunidad granodiorítica inferior (Kih(gd)) que subyace a otra diorítica superior (Kih(d)) a través de una superficie curva, de manteo centrífugo somero ( $20-30^\circ$ ), desde el cordón más alto de la sierra Marañón hacia el noroeste y norte. Dataciones Ar/Ar indican una edad de  $122,3 \pm 1,3$  Ma en biotita y  $124,3 \pm 1,9$  Ma en anfíbol (Valenzuela, 2002).

#### 2.2.1.6 *Gravas del Río Huasco MPligh (Mioceno - Plioceno) (Arévalo et al., 2009)*

Corresponden a gravas y ripios, con rodados generalmente imbricados, no consolidados a levemente cementados, ubicados a ambos lados del Río Huasco (Figura 2.2). Se encuentran depositados sobre los plutones del Cretácico Inferior, las rocas volcánicas huéspedes de estos intrusivos y las rocas del basamento devónico-carbonífero. Están sobreyacidos por depósitos aluviales, eólicos y litorales, todos del Pleistoceno-Holoceno.

#### 2.2.1.7 *Depósitos Aluviales y Coluviales Antiguos PIH (Mioceno Superior-Plioceno) (Arévalo et al., 2009)*

Corresponden a gravas polimícticas, mal a moderadamente consolidadas, que constituyen conos aluviales individuales o coalescentes, depósitos coluviales y llanuras de inundación adosadas a zonas topográficamente altas. Los depósitos aluviales y coluviales antiguos cubren las Gravas de Atacama (Figura 2.2) y todas las rocas que constituyen el basamento de esta última unidad.

2.2.1.8 Depósitos Fluviales PIHf (Pleistoceno-Holoceno) (Arévalo et al., 2009);

Depósitos no cohesivos a ligeramente consolidados asociados directamente al curso superficial del río Huasco, que rellenan la parte más baja del valle (Figura 2.2). Forman parte, tanto del lecho actual como de terrazas fluviales adyacentes, de espesores métricos a decimétricos.

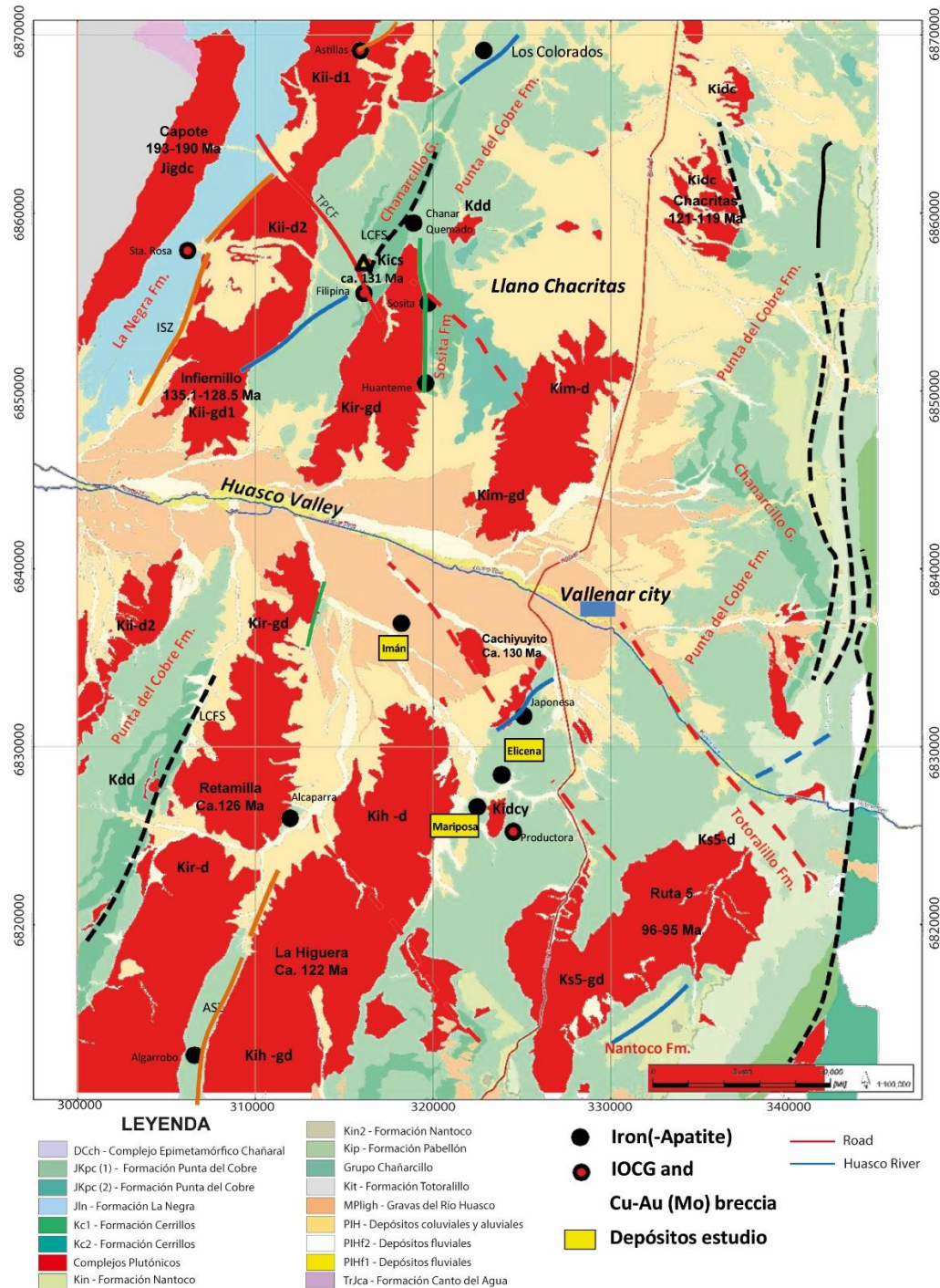


Figura 2.2: Mapa geológico de la zona. Modificado de Marquardt (2016).



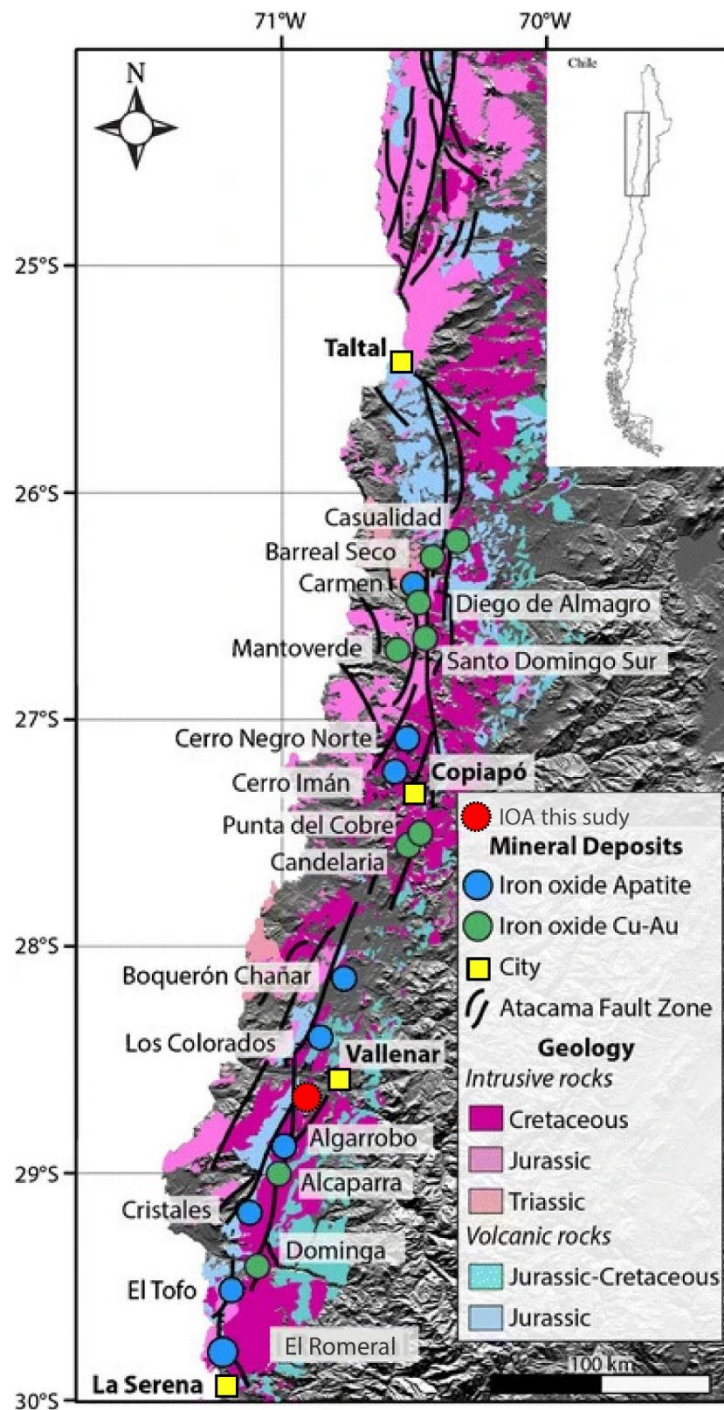
## 2.3 Marco metalogénico

La zona norte de Chile se distribuye en franjas metalogénicas longitudinales que tienen características distintivas en cuanto a edad, posición geográfica y tipo de mineralización presente. En general, las franjas tienen una orientación NS y se distribuyen de manera progresiva donde la franja de menor edad se posiciona al oeste y la de mayor edad al este (Maksaev et al., 2007).

A lo largo de la Cordillera de la Costa del norte de Chile existen diferentes tipos de depósitos metalíferos asociados a rocas del Cretácico Inferior, dentro de los cuales destacan los de la Faja de Pórfidos Cupríferos del Cretácico y los de la Franja Ferrífera Chilena (Morelli, 2008, Espinoza, 1990; Ménard, 1995). Por su ubicación espacial los depósitos Elicena, Mariposa e Imán se encuentran ubicados dentro de la Franja Ferrífera Chilena.

La Franja Ferrífera Chilena se extiende desde las localidades de Taltal a Ovalle y corresponde a una larga faja de dirección general NS, de aproximadamente 600 km de largo (entre los 26°S y 32°S) por 25 km de ancho (Ortega, 2018). Está marcada por la existencia de una gran cantidad de yacimientos del tipo IOA (Vivallo y Henríquez, 1997) y yacimientos IOCG. Estos depósitos están principalmente hospedados en formaciones volcánicas jurásicas y cretácicas como la Formación La Negra y Punta del Cobre (Ruiz et al., 1968; Bookstrom, 1977) y generalmente se encuentran asociados espacial y temporalmente a cuerpos intrusivos de composición máfica – intermedia (Hitzman, 1992). Entre los principales depósitos IOA se destacan Cerro Imán (Vivallo et al., 1994), Cerro Negro (Vivallo et al., 1993), Bandurrias, Boquerón Chañar, El Algarrobo (Montecinos, 1983), El Tofo, El Romeral (Bookstrom, 1977) y Los Colorados (Knipping et al., 2015 a, b), con recursos totales por sobre los 6.000 millones de toneladas métricas de Fe (CAP, 2014). Estos depósitos ferríferos están dentro del dominio del segmento sur del Sistema de Falla de Atacama (Ménard 1995; Espinoza 1990; Maksaev et al., 2007) (Figura 2.3).

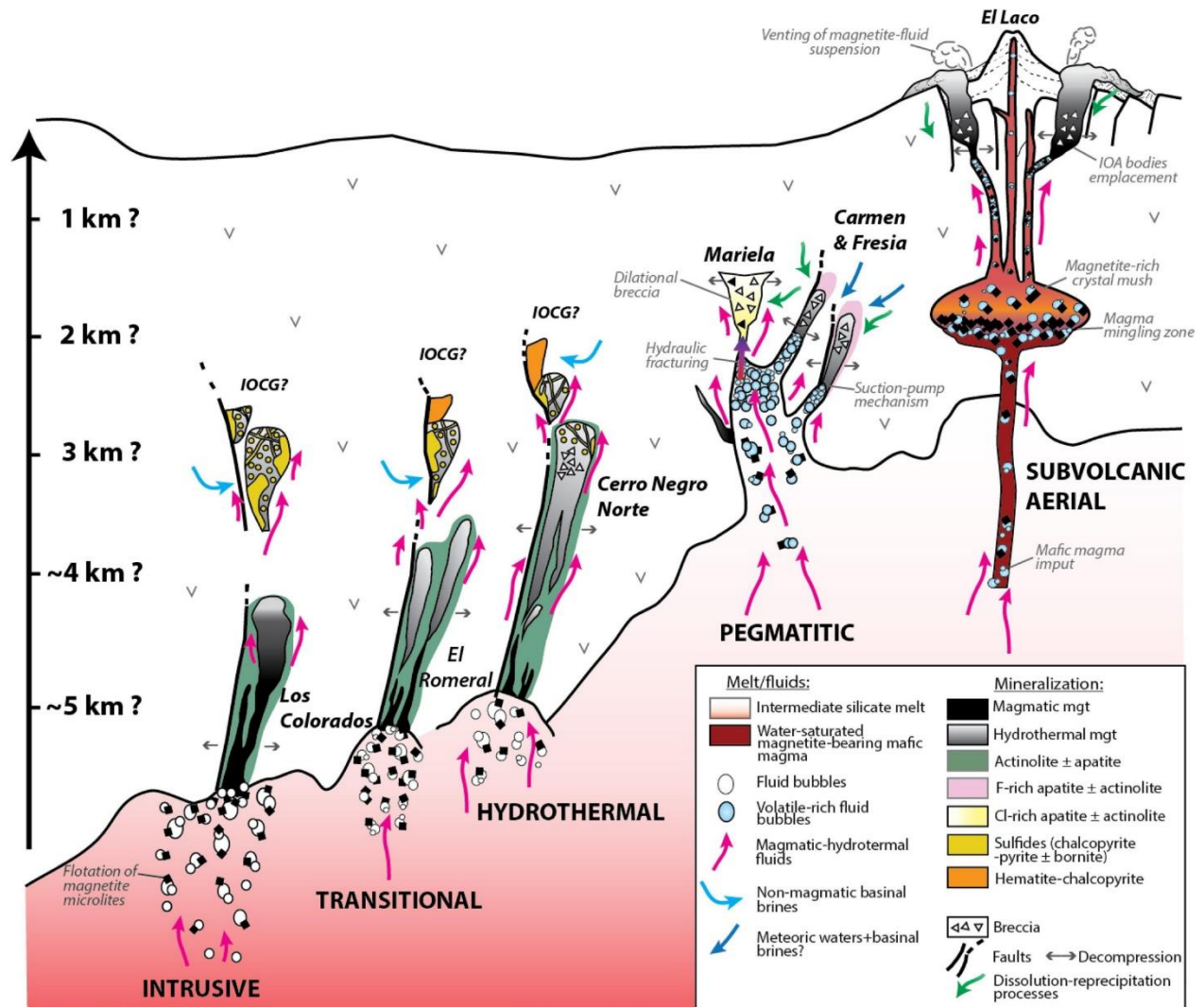
Los cuerpos de mena asociados a los depósitos IOA pueden tener las siguientes formas: maciza y diseminada en rocas volcánicas e intrusivas de edad Jurásica a Cretácica Inferior, y en menor medida, cuerpos estratiformes de magnetita hospedados en rocas sedimentarias. Con respecto a la forma de los depósitos, esta puede incluir cuerpos irregulares, tabulares de disposición subvertical (vetas y diques) y tabulares concordantes con la estratificación (Vivallo, 1997). La mena consiste en magnetita, que puede ir acompañada de cantidades variables de apatito y actinolita, ya sea de manera accesoria (p. ej., El Laco, Chile; Nyström y Henríquez, 1994) o que puede alcanzar hasta un 50% para el caso del apatito (p. ej., Mineville, Nueva York; Foose y McLelland, 1995). La mineralización también puede ir acompañada de epidota, cuarzo, calcita y sulfuros menores. Pirita y en menor cantidad calcopirita ocurren como diseminación y vetillas en los cuerpos de magnetita (Vivallo, 1997, Ruíz et al., 1965, Bookstrom, 1977, Sillitoe, 2003, Williams et al., 2005).



**Figura 2.3:** Mapa Mapa que muestra la ubicación de los depósitos de óxido de Fe-apatito (IOA) y óxido de Fe-cobre-oro (IOCG) en la Franja Ferrífera Chilena, asociados espacial y temporalmente con el Sistema de Falla de Atacama. Extraído de Rojas et al. (2018).

Existen distintos estilos o subtipos de mineralización IOA (Palma et al., 2020; Figura 2.4), los cuales fueron identificados en base a distintas observaciones y datos de depósitos pertenecientes a la Franja Ferrífera Chilena y El Laco. Estos subtipos de IOA reflejan la formación a diferentes profundidades de la corteza: profundo, de tipo intrusivo (p. ej., Los Colorados); de transición (p.

ej., El Romeral); intermedio, de tipo hidrotermal (p. ej., Cerro Negro Norte); pegmatítico, rico en apatito (Carmen, Fresia y Mariela); y depósitos subvolcánicos/subaéreos poco profundos (p. ej., El Laco). Estos subtipos de mineralización además de estar controlados por la profundidad de la formación, también lo están por la presencia de estructuras/fallas (por descompresión) y el enfriamiento, reflejado en la composición de la roca huésped, así como también en la geoquímica y microtexturas de elementos traza de magnetita que dependen de la fuente y tasa de flujo de los fluidos hidrotermales, e incluso infiltración de fluidos no magmáticos como los meteóricos, aguas y posibles salmueras de cuenca (Sillitoe, 2003; Williams et al., 2005; Ovalle et al., 2018; Rojas et al., 2018b; Salazar et al., 2020; La Cruz et al., 2020).

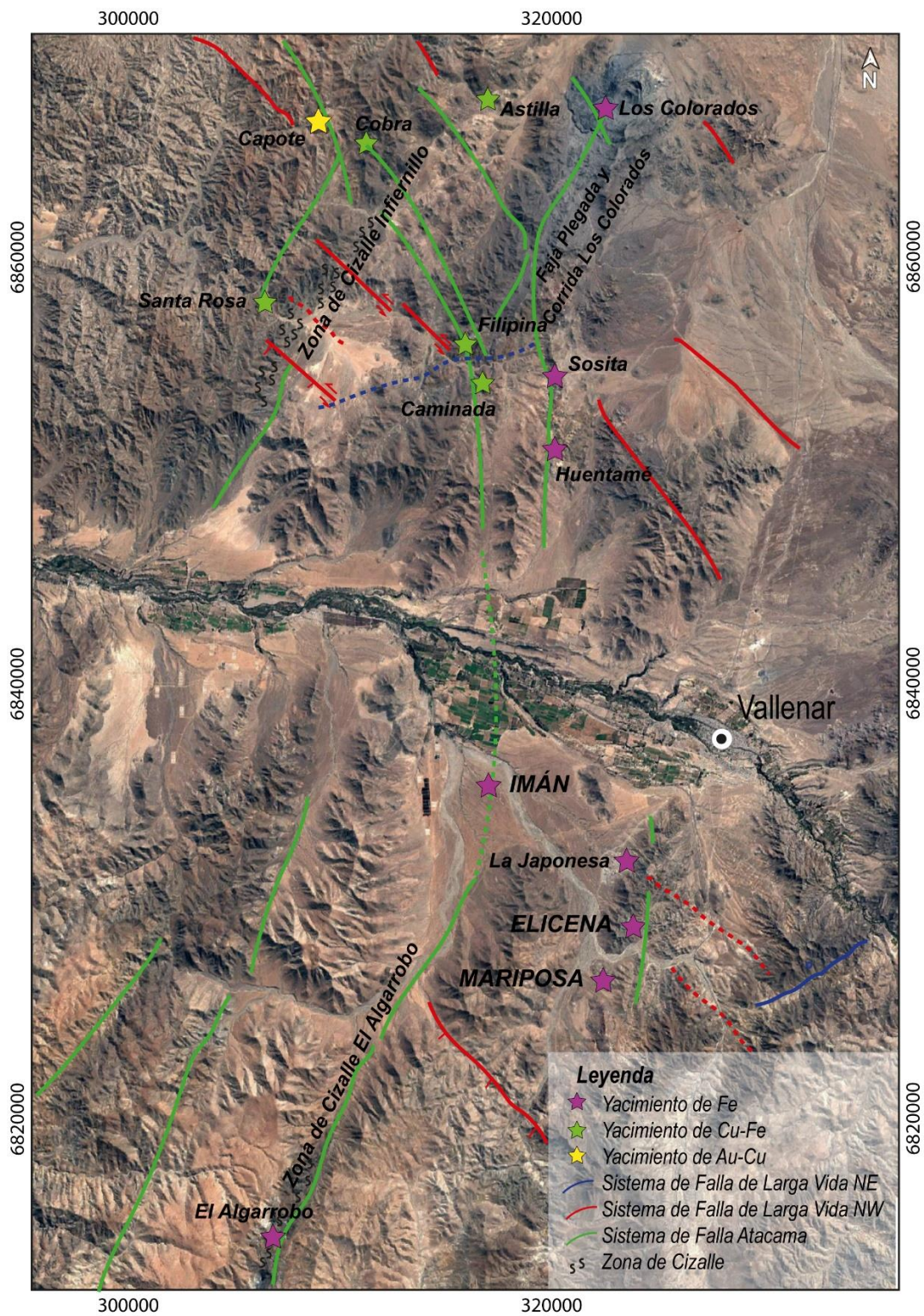


**Figura 2.4:** Modelo genético esquemático para la formación de depósitos IOA chilenos del Cinturón de Fe de Chile y El Laco. La figura muestra diferentes estilos o subtipos de mineralización IOA dependiendo de la profundidad del emplazamiento: profundo (p. ej., Los Colorados); de transición (p. ej., El Romeral); intermedio (p. ej., Cerro Negro Norte); pegmatítico (Carmen, Fresia y Mariela); y depósitos subvolcánicos/subaéreos poco profundos (p. ej., El Laco). También se muestra la ubicación de los depósitos IOA Elicena, Mariposa e Imán. El depósito Imán se ubicaría en el límite de la transición entre los depósitos IOA e IOCG. Extraído de Palma et al. (2020).

## 2.4 Geología estructural distrital

Los depósitos Elicena, Mariposa e Imán se encuentran ubicados a SW de la ciudad de Vallenar, en la parte del extremo sur del Sistema de Falla de Atacama. En este sector el Sistema de Falla de Atacama está representado por las fallas de primer orden, de rumbo NNE, llamadas Zona de Cizalle Infiernillo y Faja Plegada y Corrida Los Colorados (Thiele & Pincheira, 1987; Arévalo & Welkner, 2008; Arévalo et al, 2003). Estas estructuras registran tanto el episodio extensional (ca. 127 Ma) del Sistema de Falla de Atacama (Arévalo & Welkner, 2008), en parte sintectónico con los complejos plutónicos, como también la deformación posterior de rumbo sinistral del Cretácico Inferior (Grocott & Taylor, 2002; Valenzuela, 2000). La Faja Plegada y Corrida Los Colorados está interrumpida por un conjunto de fallas oblicuas, de segundo orden, de rumbo NW, las que forman estructuras transtensivas tipo *jog* y sonsubordinarias a la falla Sosita-Huantemé, de rumbo NS, descrito por Thiele y Pincheira (1987).

El depósito Imán se ubica en las proximidades de una traza del Sistema de Falla de Atacama, al igual que los depósitos Mariposa y Elicena (Figura 2.5). Parte del depósito Elicena también está hospedado en las proximidades de una de las estructuras pertenecientes al sistema de rumbo NW que desplaza de manera normal a la Formación Punta del Cobre (SW-ENAMI, 2011). Sin embargo, el evento mineralizador de los principales depósitos IOA e IOCG de la zona, es anterior a la generación de la megafalla Sosita-Huantemé (Thiele et al., 1984) y, por lo tanto, no está asociado a las estructuras pertenecientes al sistema de rumbo NW.



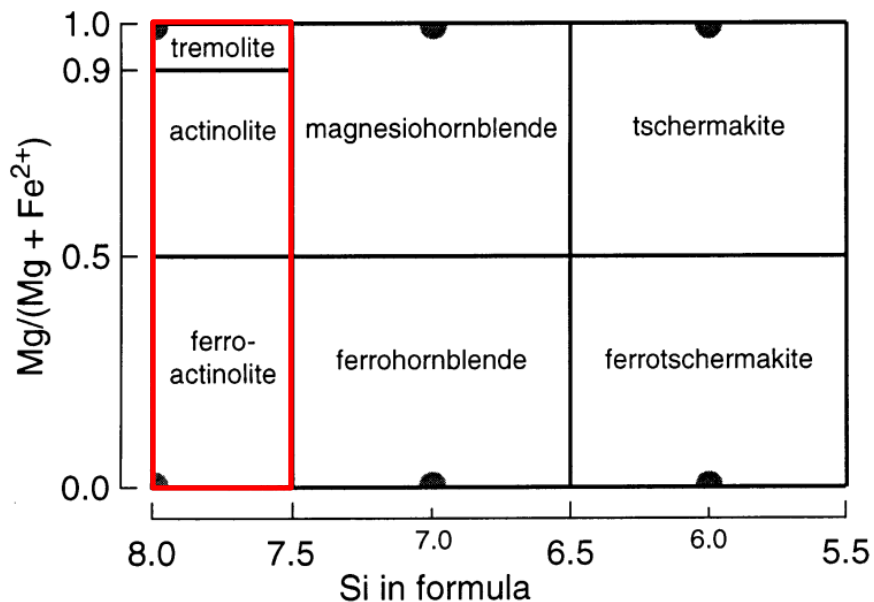
**Figura 2.5:** Imagen satelital con los principales sistemas de falla asociados espacialmente a depósitos IOCG e IOA presentes en la zona de estudio (Modificado de Perez et al., 2012).

### 3 MARCO TEÓRICO

#### 3.1 Estructura y ocurrencia de la actinolita

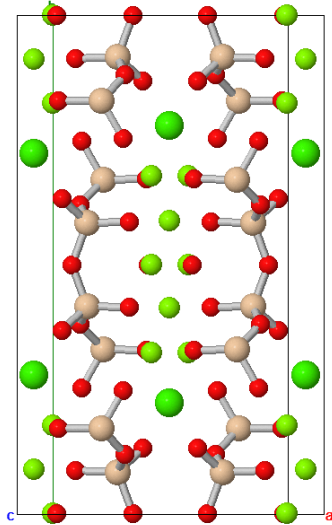
##### 3.1.1 Estructura

La actinolita es un mineral que tiene una formula general  $\text{Ca}_2(\text{Mg}_{0-4.5}\text{M}^{2+}_{0.5-5})\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{W})_2$ , donde  $\text{M} = \text{Fe}^{2+}$  o  $\text{Mn}^{2+}$  y  $\text{W} = (\text{OH}), \text{F}$  or  $\text{Cl}$ . Es un miembro intermedio de la serie tremolita - actinolita, la tremolita se define por tener una relación  $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+}) \geq 0,9$ ; la actinolita entre 0,5 a 0,9 y la ferroactinolita tiene una relación  $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+}) \leq 0,5$  (Figura 3.1).



**Figura 3.1:** Diagrama de clasificación para anfíboles cálcicos ( $\text{Ca} > 1,5$  c.p.f.u. y  $(\text{Na}+\text{K})\text{A} < 0,5$  c.p.f.u) (Leake et al., 1997). En rojo la serie tremolita – actinolita.

La serie de actinolita idealmente tiene una estructura cristalina (Figura 3.2) caracterizada por cadenas dobles de silicato paralelas a c. Las cadenas están compuestas por dos tetraedros cristalográficamente distintos, T1 y T2, y están unidas por tiras de cationes que ocupan tres octaedros no equivalentes, M1, M2 y M3 (esta nomenclatura "M" se usa para denotar un "metal" o sitio catiónico) y un poliedro óctuple coordinado, M4. (Evans & Yang, 1998).



**Figura 3.2:** Arreglo atómico de celda unitaria correspondiente a una tremolita. Donde las esferas verdes pequeñas corresponden a átomos de Mg, las verdes grandes a Ca, las de color rojo a O y por último aquellas de color piel que corresponden a átomos de Si (Cameron et al., 1973).

### 3.1.2 Ocurrencia

La actinolita es uno de los principales minerales de la facies de esquistos verde y normalmente se encuentra en rocas metamórficas de composición máfica. Corresponde también, al mineral de alteración más común presente en los depósitos de tipo IOA Andinos. Ocurre en la mayoría de los depósitos de Fe del Cretácico en Chile. Se ha encontrado en la Franja Ferrífera chilena como cristales tabulares, aciculares radiales y fibrosos de hasta 10 cm de largo, en diques pegmatíticos compuestos casi en su totalidad por actinolita y magnetita con apatito menor, también se ha encontrado como cristales subhedrales, como fenocristales en lavas y depósitos piroclásticos, como orbículos en mineral de magnetita y, como cristales fibrosos en vetas hidrotermales, entre otros. Estudios de Lledo y Jenkins (2008) postulan que la actinolita con este tipo de texturas puede ser de origen magmático.

Con respecto a las propiedades diagnósticas para la identificación del mineral, la actinolita puede poseer tonalidades que van desde incoloro, verde pálido a verde intenso en la sección delgada, un color y pleocroísmo intenso se asocia a mayor contenido de Fe en su composición. Se presenta habitualmente como cristales aciculares o aplanados que se alargan paralelos a al eje c. En ocasiones, su hábito también puede ser fibroso o asbestiforme y en otras columnar. Las secciones basales tienen forma de diamante y muestran el típico clivaje de anfíbol, perfecto en dos direcciones (en ángulos cercanos a 60° y 120°). Las secciones longitudinales (paralelas al eje e) son rectangulares y muestran solo un trazo de clivaje. Para la extinción, las secciones longitudinales o paralelas a (010) poseen extinción oblicua de 10° a 20°, mientras que las secciones paralelas a (100) muestran extinción paralela. Los ángulos de extinción muestran una disminución general con el aumento del contenido de Fe. Los colores de interferencia máximos van de primer orden superior a segundo orden medio (Nesse, 1991).

Sus productos de alteración más comunes son la clorita, el talco y los carbonatos. La ocurrencia común está en calizas de metamorfismo regional y de contacto, dolomitas, y otros sedimentos calcáreos. Los minerales comúnmente asociados son forsterita, granate, diópsido, wollastonita, calcita, dolomita, talco y miembros del grupo epidota. La tremolita y la actinolita también se encuentran en rocas metamórficas máficas, rocas ultramáficas, en esquistos glaucofanos y rocas asociadas. La uralita es un grano fino común producto de alteración de los piroxenos que suele estar compuesto principalmente por tremolita o actinolita (Nesse, 1991).



## **4 METODOLOGÍA**

El principal objetivo de este estudio es utilizar las diferencias texturales y químicas presentes en actinolitas para comprender el origen de los distintos estilos de mineralización tipo IOA, ante esto es que el presente trabajo de título está enfocado en el estudio macroscópico y microscópico de tres depósitos IOA Elicena, Mariposa e Imán. Para el estudio macroscópico se realizó trabajo de campo, donde se visitaron los depósitos Elicena y Mariposa, mientras que para Imán la descripción se llevó a cabo a partir de la observación de sondajes. En el estudio microscópico se analizaron un total de 8 cortes transparentes pertenecientes a Imán, mientras que para el depósito Elicena se estudiaron 3 y para Mariposa 4. Estas muestras fueron analizadas principalmente mediante microscopio electrónico de barrido (SEM) y con un menor enfoque en el microscopio óptico, cuyo principal objetivo fue la selección de granos a analizar mediante el SEM. A continuación, se describen las principales etapas que se llevaron a cabo para lograr un completo desarrollo del trabajo de título.

### **4.1 Recopilación de antecedentes**

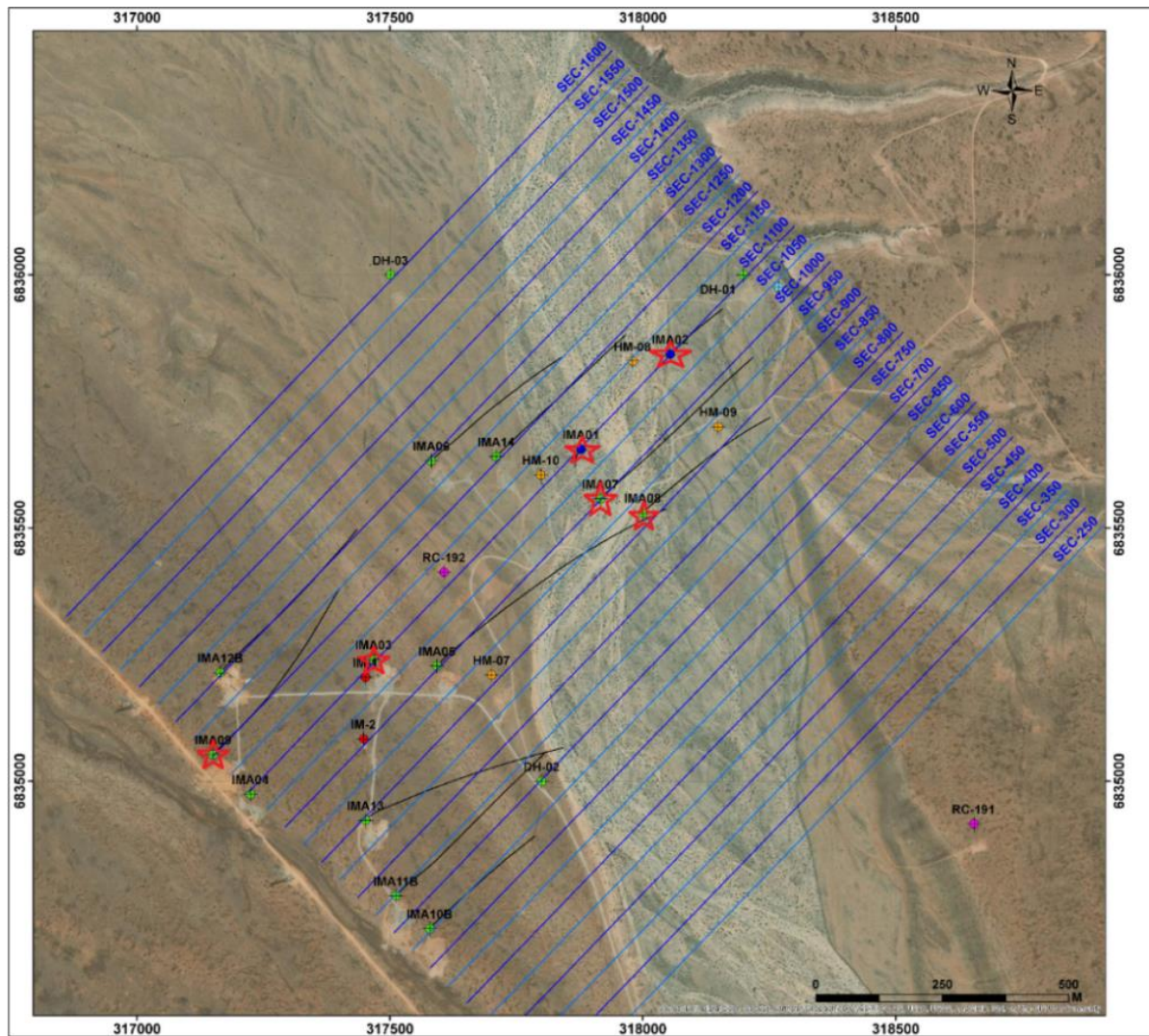
Para lograr un estudio completo de los tres depósitos en primer lugar se realizó una recopilación de antecedentes para lograr contextualizar y comprender a grandes rasgos las características de la zona de estudio y así conocer lo que se esperará observar en los distintos depósitos, para lograr que el trabajo sea mucho más eficiente. Ante esto se compilaron diferentes datos entre los que se destacan: información geocronológica, estratigráfica, geoquímica y metalogénica. Esta etapa de revisión bibliográfica se desarrolló durante todo el proceso de escritura de la tesis, ya que es importante complementar los resultados obtenidos en el estudio, para lograr consistencia al momento de las discusiones.

### **4.2 Trabajo de campo**

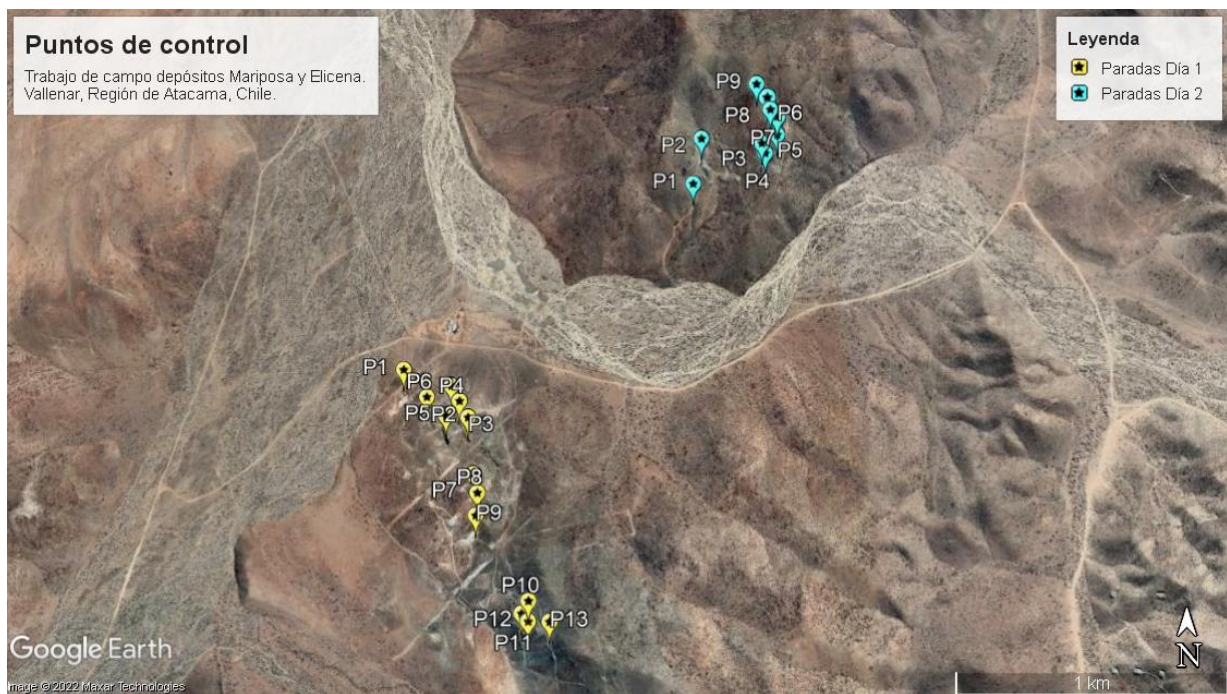
Para poder comprender el contexto geológico donde se emplazaron los tres depósitos en estudio, es que, como Práctica Profesional II, durante los meses de enero y febrero del año 2022, se realizó un trabajo que consistió en realizar un logueo de sondajes en detalle. Con el objetivo de caracterizar los estilos de alteración y mineralización del depósito Imán, así como también, identificar las diferentes texturas de actinolita asociadas a la mineralización de Fe. En este trabajo se describieron tramos pertenecientes a 6 sondajes distintos obtenidos mediante perforación diamantina (Figura 4.1).

Con respecto a los dos depósitos restantes, durante la semana del 17 de enero del año 2022, se realizó una visita principalmente a los depósitos Elicena y Mariposa (Figura 4.2) con el fin de poder caracterizarlos, debido a que se posee poca información bibliográfica de estos. Por este motivo es que en la campaña de terreno se observó y analizó la geología de la zona (fallas y

estratigrafía) y además se recogieron distintas muestras de mano, las cuales se estudiaron y clasificaron según la mineralogía presente (tanto de ganga como metálica), el estilo de mineralización y abundancia relativa, las alteraciones hidrotermales presentes en las muestras y su intensidad aparente y por último se identificaron las texturas de ganga reconocibles, para finalmente poder realizar una interpretación (en caso de ser posible) de los distintos eventos mineralizadores que caracterizan a cada depósito.



**Figura 4.1:** Imagen satelital de la ubicación de los sondajes diamantina analizados en el depósito Imán. En rojo (estrella) los 6 sondajes descritos.



**Figura 4.2:** Imagen satelital obtenida de Google Earth. Muestra los puntos de control realizados durante la campaña de terreno. Paradas Día 1: corresponde a las paradas realizadas en el depósito Mariposa, mientras que Paradas Día 2: corresponde a las paradas realizadas en el depósito Elicena.

### 4.3 Microscopio Óptico

Previo a analizar las muestras en el Laboratorio SEM se utilizaron los microscopios petrográficos (SGM) que facilita la Universidad de Chile para sus estudiantes. En este proceso se analizó y se realizó una descripción petrográfica simple del total de 16 muestras (8 de imán, 4 de Elicena y 4 de Mariposa), intentando identificar las diferencias presentes entre la mineralización y alteración de los depósitos a escala microscópica, cuyo principal énfasis fue hecho en identificar las distintas texturas de actinolita presente. Además, mediante el análisis hecho con microscopio óptico se escogieron las muestras (granos) que serían analizadas posteriormente mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM). A continuación, se describe el desarrollo de este análisis.

- 1- Se analizaron cortes transparentes al microscopio de todas las muestras disponibles (Tabla 4.1), observando mineralogía primaria, mineralogía secundaria y principalmente texturas de actinolita, etc.
- 2- Se obtuvieron fotomicrografías de los cortes con el software MSHOT, a través del microscopio óptico de polarización marca Olympus, BX51, utilizando luz transmitida. Esto se llevó a cabo en el laboratorio de microscopía óptica del Departamento de Geología de la Universidad de Chile.

- 3- Posteriormente, en el mismo microscopio se realizó una selección de las muestras más importantes para cada depósito, es decir que aportan mayor cantidad de información acerca del depósito (Tabla 4.1).
- 4- Finalmente se seleccionaron los granos más representativos de cada corte (muestra) elegido previamente y se procedió a dibujar un mapa guía sobre el corte transparente, que indique el grano seleccionado y el camino a seguir para encontrar un segundo grano en caso de existir más de uno en una misma muestra, este trazo ayuda a realizar un trabajo más eficiente en el momento de la identificación del grano mediante SEM.

**Tabla 4.1:** Resumen de las muestras analizadas mediante microscopio petrográfico y SEM de los depósitos Elicena (ELI), Mariposa (CAM) e Imán (Iman).

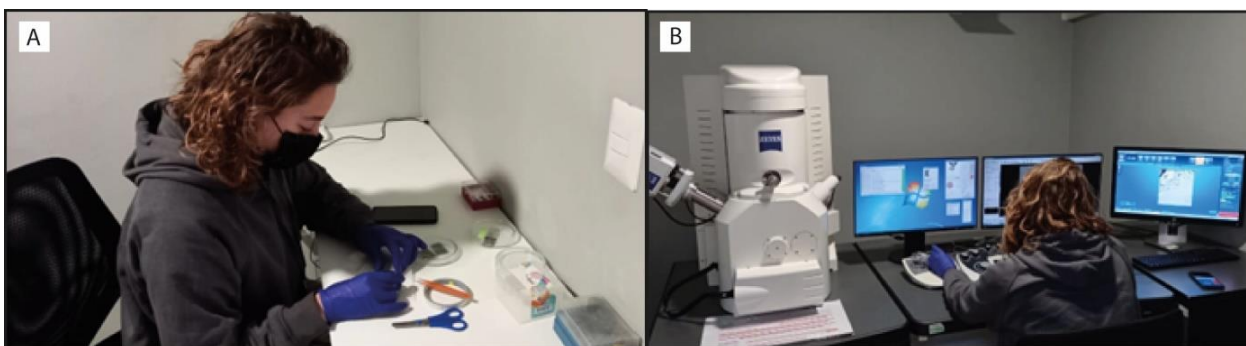
Depósito	Muestra	Análisis	
		Petrografía	SEM
Elicena	ELI-1	X	X
	ELI-2	X	
	ELI-3	X	X
	ELI-4	X	
Mariposa	CAM1	X	
	CAM2	X	X
	CAM12	X	X
Imán	Iman01-03	X	X
	Iman02-02	X	X
	Iman09-2	X	
	Iman09-4	X	
	Iman12B-6	X	
	Iman12B-7	X	
	Iman14-01	X	X
	Iman14-03	X	X

## 4.4 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

El estudio de actinolitas en SEM se llevó a cabo en la Unidad de Microscopía Electrónica de la Universidad Austral de Chile en el Campus Isla Teja de Valdivia. Fueron necesarios cinco días para realizar el análisis de un total de 8 muestras previamente seleccionadas en microscopio óptico.

El objetivo principal del análisis mediante SEM es realizar un análisis morfológico y composicional (zonación) de distintos granos de actinolita. Mediante la obtención de imágenes BSE (imágenes de composición o distribución química por Electrones Retrodispersados) es posible reconocer diferencias microtexturales en las muestras. Además, el SEM posee un detector de cátodo-luminiscencia (CL) que permite identificar en color la existencia de posibles zonaciones presentes en actinolitas. A continuación, se describe la metodología aplicada para realizar el análisis de los cortes transparentes a partir del SEM.

- 1- A los cortes se les realizó un sombreado con una capa conductora para inhibir los riesgos de carga, daños térmicos en la muestra y mejorar la señal de emisión de electrones secundarios, lo que permite generar una imagen con alto contraste. Posterior al sombreado de los cortes, se dispuso la muestra en el portamuestra y se introdujo en la cámara del SEM.
- 2- El análisis de cada corte fue hecho mediante el software AZtec 4.2 SP1. A cada grano representativo se le realizó un punteo en las zonas donde se observó una clara diferencia de color (en la escala de grises). Gracias al detector CL que posee el SEM es posible representar la variación composicional (química) presente en el mineral, mediante cambios de color, donde los colores más claros, como el blanco, representan una composición de elementos más pesados, mientras que los colores más oscuros o negros representan por su parte una composición de elementos más livianos. Debido a que la clasificación de la serie tremolita-actinolita varía en función de la concentración Fe y Mg y como el Fe posee un peso atómico mayor al Mg, dentro de un mismo grano de actinolita las áreas más claras representan una zona más enriquecida en Fe, mientras que los dominios oscuros una zona enriquecida en Mg.
- 3- Finalmente, para poder observar la variación composicional completa de la muestra, se obtuvieron imágenes panorámicas para cada corte analizado (Anexo B).



**Figura 4.3:** Metodología aplicada al SEM. A) Los cortes previamente sombreados son puestos en el portamuestras. B). Se está realizando un análisis de la información recolectada por el detector con el software AZtec 4.2 SP1, en el cual se realizó una selección de puntos de distintos tonos de grises que simbolizan las diferencias químicas composicionales presentes en cada grano seleccionado.

A continuación, se describen los aspectos técnicos considerados al momento del uso del SEM y se muestra una tabla resumen con los principales parámetros utilizados.

- 1- Se sombreadaron las muestras con 10 nm de carbón, utilizando un sombreador Leica EM ACE200.
- 2- Las observaciones y mediciones se realizaron en el microscopio electrónico de barrido EVO MA10 - Variable Pressure Scanning Electron Microscope (PVSEM) marca Zeiss, con un detector EDS marca Oxford modelo x-act.
- 3- El análisis de la información recolectada por el detector se realizó con el software AZtec 4.2 SP1.
- 4- Para la obtención de espectros puntuales, se usaron los parámetros de rango de energía, número de canales y modo de adquisición en valores automáticos, y el tiempo de proceso fue configurado igual a 6.
- 5- Para los mapas, se utilizó un tiempo de permanencia de 100 microsegundos, con una duración fija de 6 barridos.

**Tabla 4.2:** Resumen de parámetros utilizados en SEM.

Label:	. 6
Source:	Acquired
Created:	6/6/2022 3:24:04 PM
Livetime:	15.2s
Process Time:	6
Accelerating Voltage:	20.00kV
Magnification:	1596 x
Working Distance:	8.7mm
Specimen Tilt (degrees):	0.0
Elevation (degrees):	35.0
Azimuth (degrees):	0.0
Number Of Channels:	2048
Energy Range (keV):	20 keV
Energy per Channel (eV):	10.0eV
Detector Type:	x-act
Detector Type Id:	26
Window Type:	SATW
Pulse Pile Up Correction:	Succeeded
Primary Detector:	x-act
Primary Detector Serial Number:	39330

## 5 RESULTADOS

En este capítulo se presentan los principales resultados de las observaciones y descripciones realizadas a partir del trabajo de campo, logueo de sondajes, petrografía de cortes transparentes y análisis geoquímico y microtextural mediante microscopía SEM.

### 5.1 Observaciones en trabajo de campo

El estudio macroscópico de los depósitos fue hecho mediante el logueo de sondajes pertenecientes al depósito Imán, sumado a una campaña de terreno donde el principal objetivo fue recopilar la mayor cantidad de información (litología, alteración, mineralización y estructuras) de los depósitos Elicena y Mariposa. A continuación, se describen las principales características observadas para cada depósito.

#### 5.1.1 Depósito Elicena

##### 5.1.1.1 Generalidades

El depósito Elicena se encuentra hospedado en rocas volcánicas de composición andesítica de la Formación Punta del Cobre. La roca caja corresponde a una andesita porfídica que presenta silicificación y albitización ( $\pm$  albita,  $\pm$  epidota). En este depósito se observaron labores mineras en forma de túneles, que contenían grandes cantidades de bloques acoplados de los que se obtuvo información para determinar la litología de la roca caja (Figura 5.1).

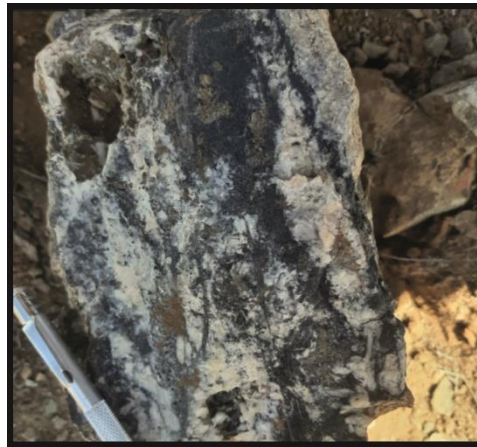


*Figura 5.1: Morfología de los piques de extracción de magnetita pertenecientes al depósito Elicena, tipo túnel o mina subterránea. Es posible observar el acopio de bloques y el ingreso al túnel, no se observan evidencias superficiales de mineralización*



### 5.1.1.2 Mineralogía de alteración

En el depósito se destaca una mayor concentración del mineral apatito por sobre la actinolita. También, se observaron alteraciones a albita (Figura 5.1 B), epidota y en menor cantidad titanita (asociada a mineralización de magnetita), turmalina, cuarzo y calcita. El cuarzo y la calcita se presentan en vetillas con leve bandeamiento y también como relleno de cavidades. Hacia las zonas más superficiales (mayor altitud) se visualiza turmalina por lo general rellenando espacios. La actinolita se presenta como finos granos (< 1 mm) reemplazando la roca caja y también en vetillas.

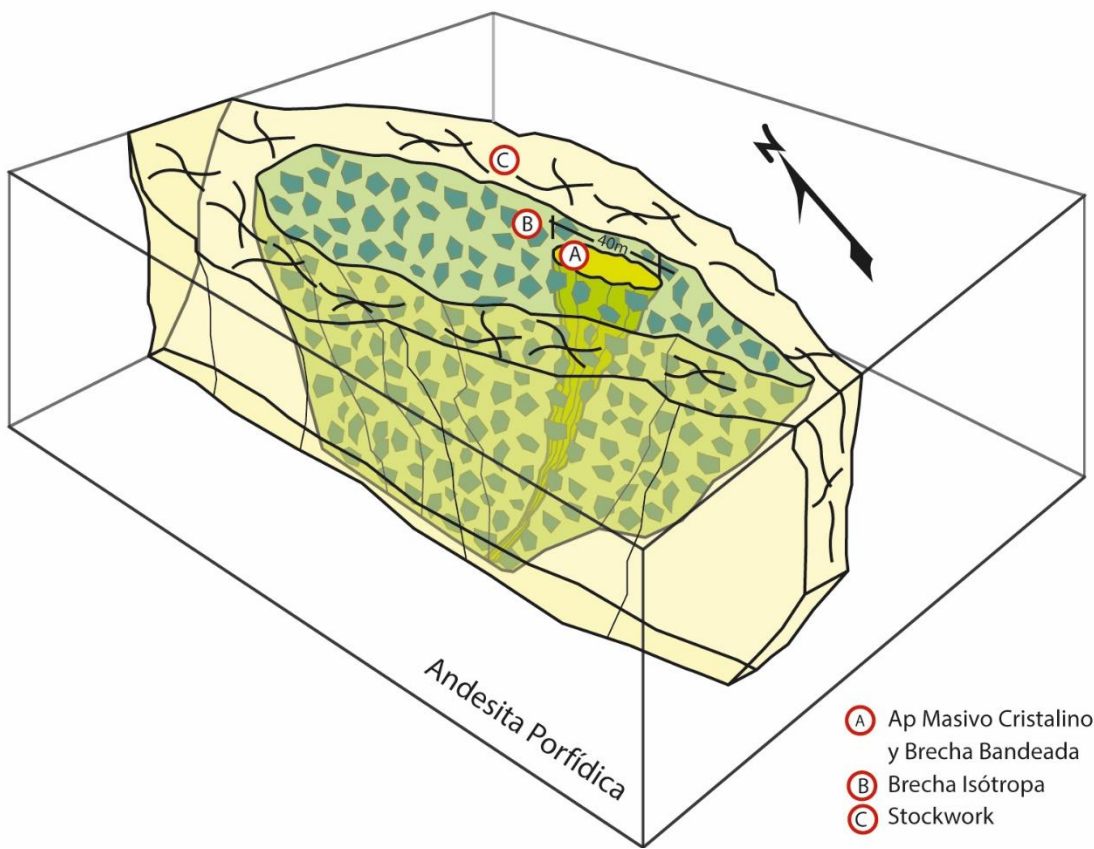
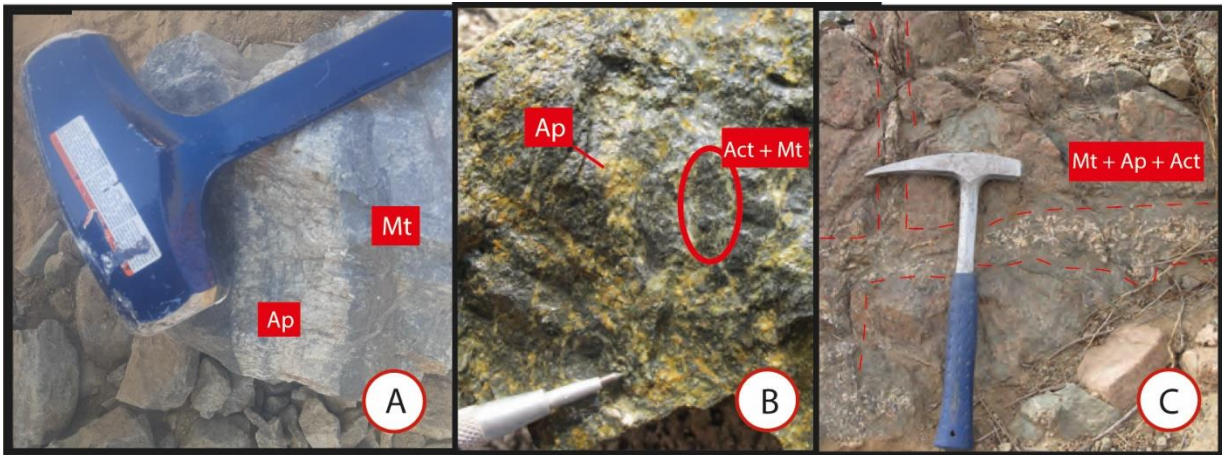


**Figura 5.2:** Roca con mineralización de magnetita y albitización (blanco) pervasiva de la roca.

### 5.1.1.3 Mineralización

La mineralización principal de este depósito está asociada a un cuerpo de brecha, apatito-magnetita-actinolita, con dimensiones estimadas de 200m x 45m x 100m (largo x ancho x profundidad) y de orientación NNW. También, se observaron algunos bloques previamente extraídos de los túneles mineros, que contienen trazas de sulfuros (pirita y calcopirita).

El cuerpo de brecha principal está compuesto en su parte central por una matriz de apatito masivo con magnetita octaédrica diseminada y por brechas bandeadas con matriz de apatito y clastos de andesita alterada de manera pervasiva a magnetita (Figura 5.3 A). Hacia las zonas más externas se observa brecha isótropa con matriz de apatito, clastos de andesita alterada a actinolita y magnetita grano fino (Figura 5.3 B). En los bordes del depósito es posible observar un enrejado de vetillas (stockwork) compuesto de magnetita, apatito y menor actinolita (Figura 5.3 C).



**Figura 5.3:** Esquema simplificado de la mineralización principal del depósito Elicena. El esquema muestra la distribución del cuerpo de brecha principal de orientación NNW y en los bordes de la mineralización la roca caja Andesita Porfídica. Extraído de Minería Activa SpA.

## 5.1.2 Depósito Mariposa

### 5.1.2.1 Generalidades

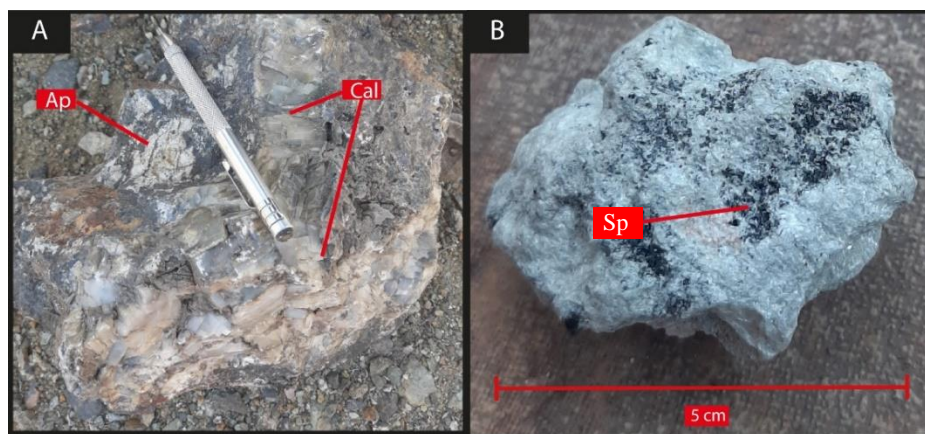
El depósito mariposa se encuentra hospedado en rocas volcánicas de composición andesítica de la Formación Punta del Cobre. La roca caja observada se encuentra obliterada (Figura 5.4), con alta presencia de actinolita y óxidos de hierro (hematita). Se presentan afloramientos con evidencias (estrías) de desplazamiento de rumbo y otro con componente vertical, también se identificaron vetillas de apatito/actinolita de orientación 40NNE y con evidencias de desplazamiento dextral.



**Figura 5.4:** Roca caja depósito Mariposa. Se observa la afloramiento obliterado y muy oxidado.

### 5.1.2.2 Mineralogía de alteración

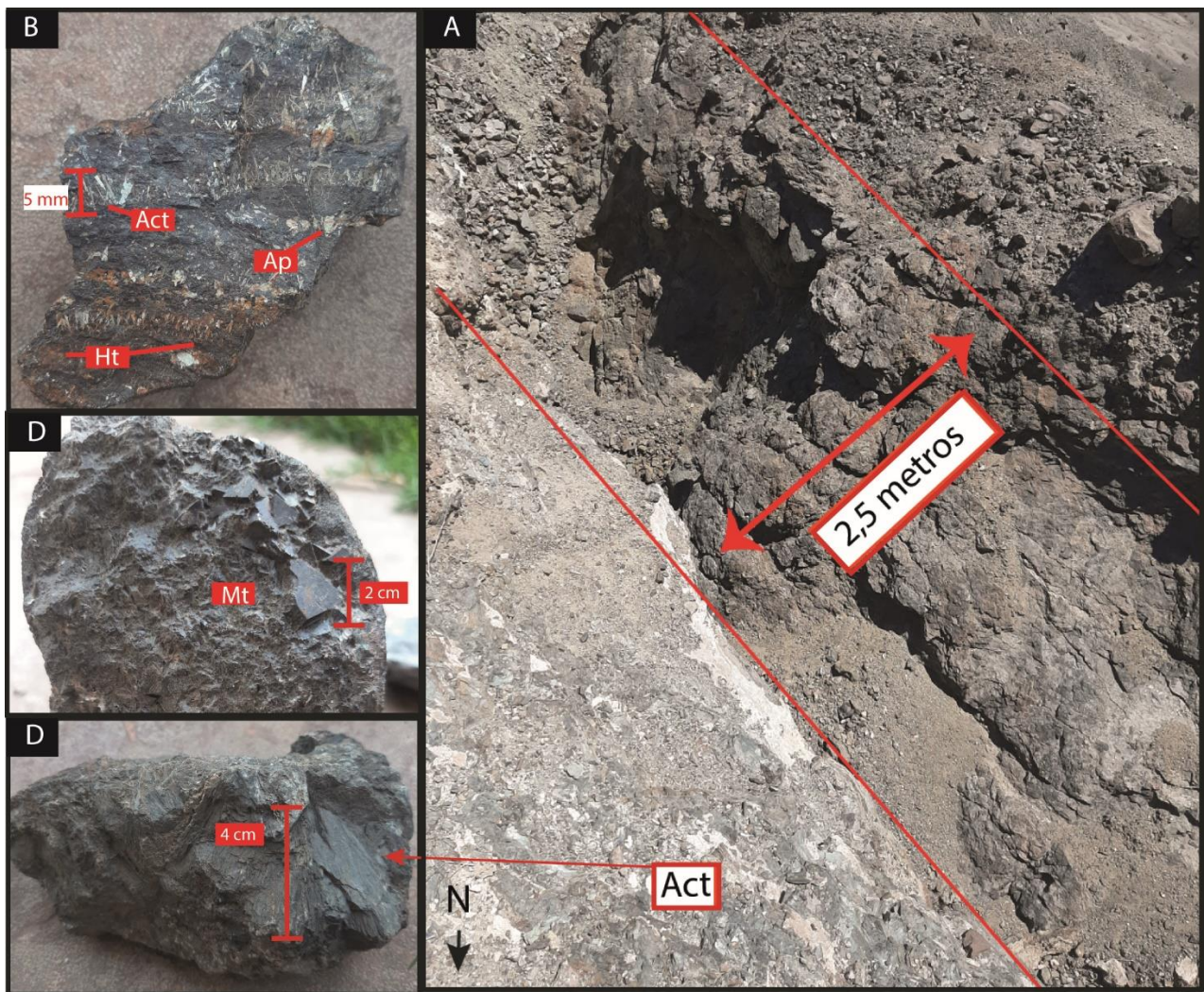
El depósito presenta principalmente silicificación, hematización y, en menor cantidad apatito y calcita (Figura 5.5 A). También, se observaron en niveles someros grandes zonas con alteración de actinolita a talco, que contenía finos granos de hematita especular diseminada (Figura 5.5 B).



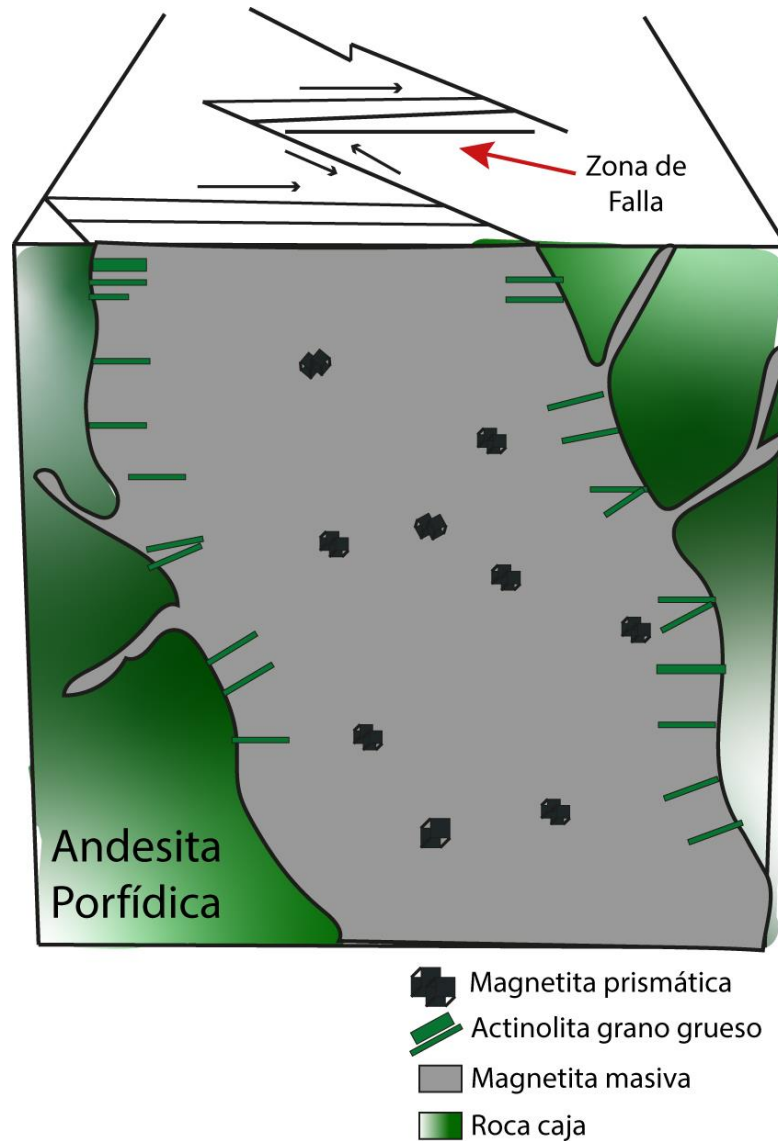
**Figura 5.5:** Alteraciones asociadas al depósito Mariposa. A) Roca con mineralización de magnetita y hematización (zona anaranjada), apatito (Ap) y cristales de calcita grano grueso (Cal). B) Muestra de actinolita alterada a talco con hematita especular diseminada (Sp).

### 5.1.2.3 Mineralización

La mineralización principal de este depósito está asociada a grandes cuerpos de vetas de magnetita – actinolita (Figura 5.6 A), de orientación preferente N40°W/45°N y dimensiones de hasta 15 m de diámetro por 20 m de profundidad. La mineralización se encuentra limitada al este por una falla NS, al igual que Elicena. La magnetita se encuentra mayormente asociada a grandes cristales de actinolita (> 4 cm) concentrados en los bordes de la mineralización vetiforme (Figura 5.6 D), también presenta cristales con una orientación preferente perpendicular a vetas (Figura 5.2 B) y otros cristales de actinolita inmersos en la matriz. En la zona de veta principal también se encontraron cristales de magnetita prismáticos de grano grueso inmersos en la mineralización de magnetita masiva (Figura 5.6 C). En menor cantidad la magnetita también se encuentra asociada a apatito, pero siempre en compañía de actinolita (Figura 5.6 B).



**Figura 5.6:** Mineralización del depósito Mariposa. A) Morfología de los piques de extracción de magnetita pertenecientes característicos del depósito, con grandes cristales de actinolita (act) en los bordes de la veta. B) Mineralogía característica del depósito en vetas (apatito (Ap), actinolita (Act) y hematita (Ht)). C) Bloque con mineralización masiva de magnetita y cristales diseminados de magnetita prismática (Mt). D) Cristales fibrosos de actinolita grano muy grueso (> 3 cm).



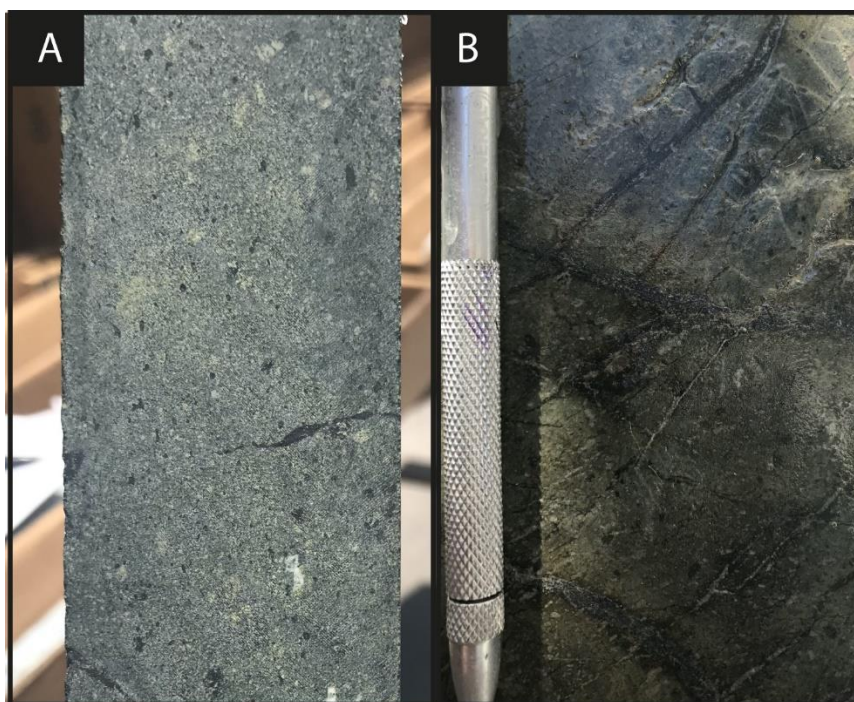
**Figura 5.7:** Esquema simplificado de la principal mineralización de magnetita en el depósito Mariposa. Modificado de Rojas (2018).

El esquema (Figura 5.7) muestra la mineralización de un gran cuerpo de veta de magnetita masiva, el cual se caracteriza por la presencia de diseminaciones de magnetita prismática y de cristales de actinolita de grano muy grueso (> 3 cm) en los bordes, los cuales presentan una orientación perpendicular a las paredes de la veta.

### 5.1.3 Depósito Imán

#### 5.1.3.1 Generalidades

El depósito Imán se encuentra hospedado bajo las Gravas del Río Huasco, las cuales se emplazan sobre el Complejo Plutónico La Higuera, el cual intruyó a la Formación Punta del Cobre. Se identificaron dos litologías distintas para la roca huésped de este depósito. Una de tipo andesita porfídica (Figura 5.8 A), con fenocristales de plagioclasas de hasta 5 mm y en menor cantidad cristales de biotita de 3 mm. en una masa afanítica de color verdosa a verde oscura. La segunda litología corresponde a una diorita (Figura 5.8 B) con textura granular o fanerítica, con cristales de plagioclasas de 5 mm. y cristales de biotita de 2 mm.

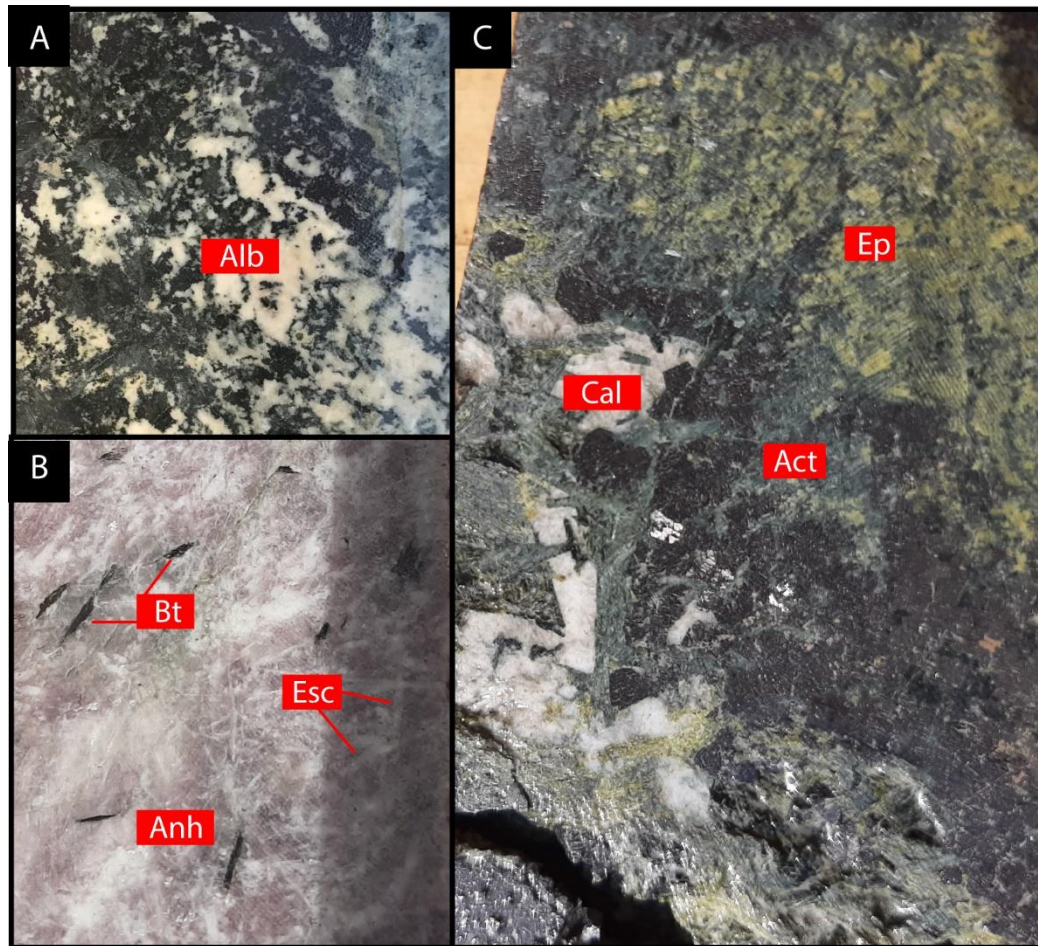


**Figura 5.8:** Litologías de roca caja presente en el depósito Imán. A) Andesita porfídica. B) Diorita muy obliterateda.

#### 5.1.3.2 Mineralogía de alteración

El depósito Imán a diferencia de los otros dos depósitos previamente descritos, posee una variada mineralogía de alteración. El mineral de alteración principal del depósito corresponde a la actinolita (Figura 5.9 C) que se presenta en distintas texturas con tamaños que van desde grano muy fino (< 1 mm) a grano grueso (5 mm – 3 cm), estas texturas están directamente asociadas a la mineralización.

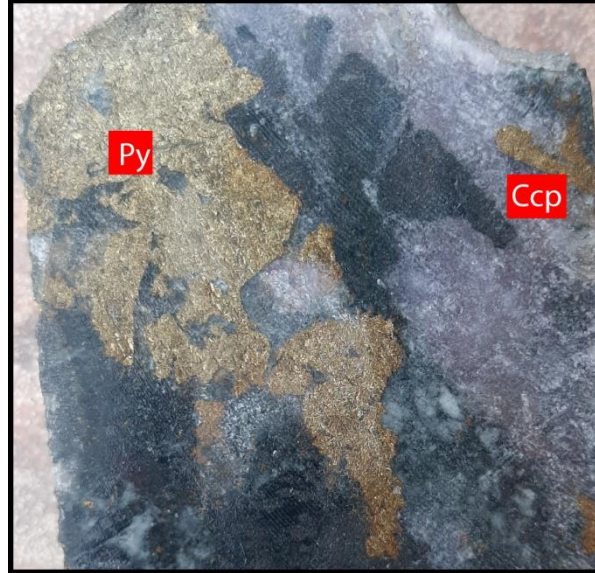
Dentro de la mineralogía secundaria se observó apatito grano grueso, abundante biotita secundaria, cristales aciculares de escapolita en los bordes de la mineralización, anhidrita en vetillas y brechas (Figura 5.9 B), cuarzo secundario, titanita diseminada, turmalina, feldespato potásico y calcita (Figura 5.9 C). También, se observó sericita, arcillas, albita (Figura 5.9 A), clorita y epidota en mayor concentración (Figura 5.9 C).



**Figura 5.9:** Mineralogía de alteración asociada al depósito Imán. En A) albita (Alb), en B) anhidrita (Anh), escapolita (Esc) y biotita secundaria (Bt), y en C) actinolita (act), epidota (Ep) y calcita (Cal).

### 5.1.3.3 Mineralización

La mineralización corresponde principalmente a magnetita que ocurre como diseminaciones, vetillas, stockworks, matriz de brechas hidrotermales y/o cuerpos masivos. Donde la magnetita está frecuentemente asociada a actinolita en distintas texturas según la intensidad de la mineralización (Tabla 5.1). También, acompañando la mineralización de magnetita se presenta en menor concentración pirita y calcopirita con intensidad débil (Figura 5.10).

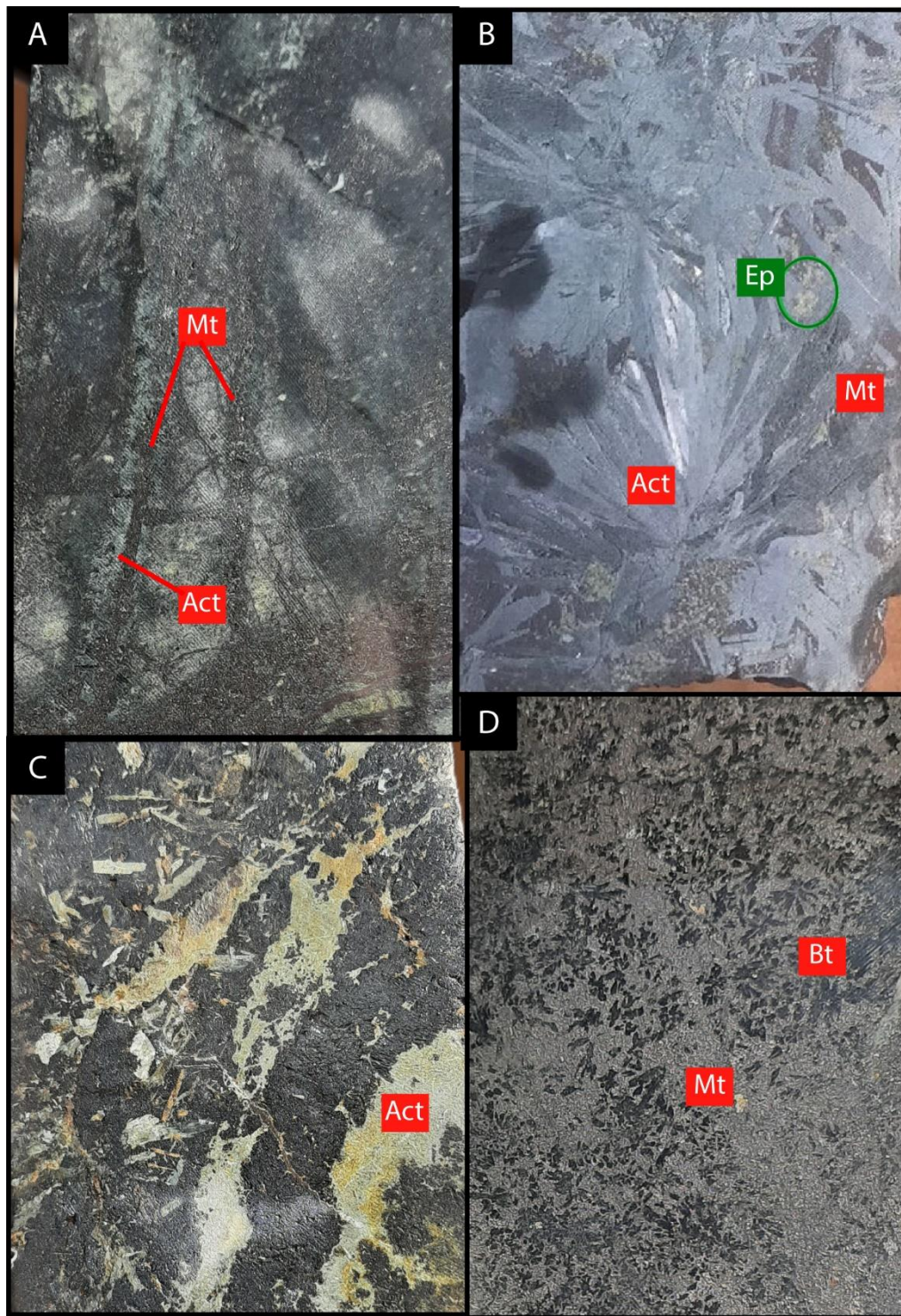


**Figura 5.10:** Mineralización de sulfuros en el depósito Imán. calcopirita (Ccp) amarillo latón y pirita (Py) de color dorado.

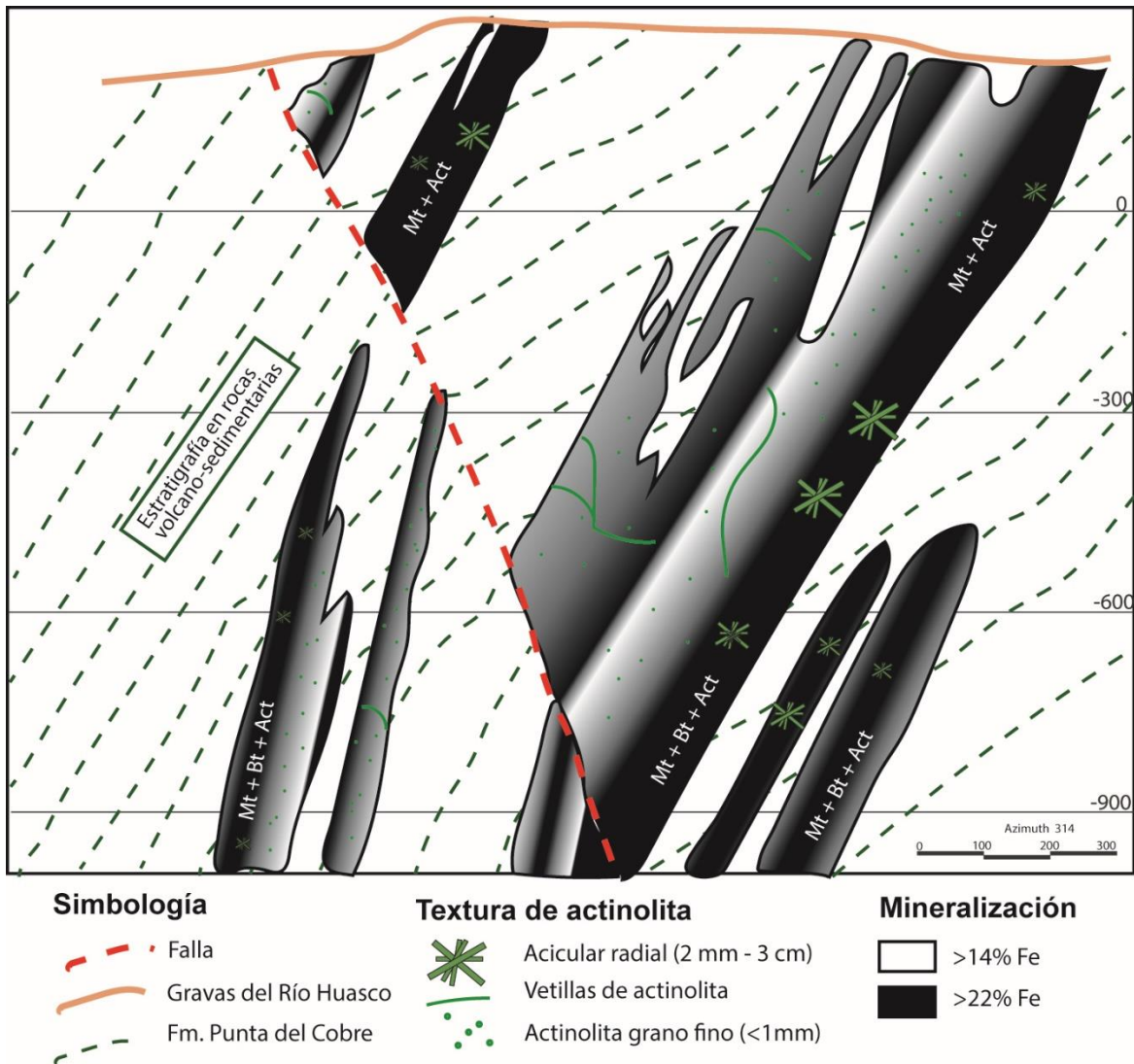
**Tabla 5.1:** Texturas de actinolita según leyes de Fe.

Ley de magnetita	Textura de actinolita
<b>Baja</b> ( $< 14\%$ )	Grano muy fino ( $< 1$ mm) reemplazando la roca caja volcánica, de color verde oscuro. A altas profundidades se encuentra presente en vetas de anhidrita junto con biotita. En esta zona se presentan concentraciones intermedias ( $\geq 30 < 60$ %) de actinolita.
<b>Intermedia</b> ( $\geq 14 < 22$ %)	Al igual que en la zona de baja ley se presenta actinolita de grano fino ( $< 1$ mm) con reemplazo moderado de la roca caja, así como también de grano fino diseminada o en vetillas y/o en vetas actinolita de grano medio (1 mm -5 mm) intercrecida con magnetita (Figura 5.11 A). La concentración de actinolita en esta zona es cercana al 60 %.
<b>Alta</b> ( $\geq 22 < 40$ %)	De grano medio a grueso (1 mm – 3 cm), con habito acicular radial (Figura 5.11 B) intercrecida con magnetita, también en vetas y/o cemento de brechas con magnetita. A mayores profundidades ( $> 500$ m) la actinolita intercrecida con magnetita presenta tonos más pálidos (Figura 5.11 C).
<b>Muy alta</b> ( $\geq 40 < 100$ %)	En zonas de magnetita masiva se observan bajas concentraciones de actinolita ( $< 30$ %), se presentan en vetillas con tamaño de grano fino (Figura 5.11 C) y en ocasiones a altas profundidades cristales de actinolita de grano medio están siendo reemplazados por biotita (Figura 5.11 D).





**Figura 5.11:** Mineralización de magnetita depósito Imán. A) Mineralización en vetillas (Mt) con actinolita acicular grano fino (Act). B) Intercrecimiento de magnetita (Mt) con actinolita acicular radial grano grueso (Act). C) Mineralización masiva de magnetita con actinolita grano muy fino en vetillas (Act). D) Mineralización masiva de magnetita con biotita secundaria (Bt) reemplazando granos de actinolita. Todas las imágenes mostradas tienen un grosor de 5 cm.



**Figura 5.12:** Esquema simplificado de la mineralización mantiforme del depósito Imán. Modificado de Marquardt (2016).

El esquema (Figura 5.12) muestra como la mineralización se distribuye con un ángulo de manto preferente, además muestra las distintas texturas de actinolita observadas según la ley de Fe asociada. Se puede observar que en las zonas más profundas se tiene una asociación magnetita – biotita – actinolita (Mt + Bt + Act), mientras que en las zonas más someras hay ausencia de biotita (Mt + Act).

## 5.2 Petrografía de muestras

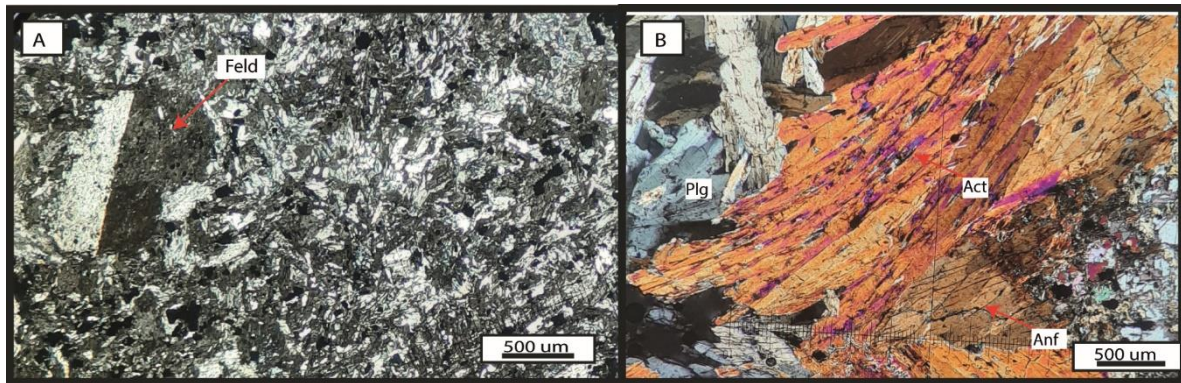
En esta sección se mostrarán los resultados obtenidos a partir de análisis petrográfico realizado en el microscopio óptico. Se analizaron un total de 15 cortes transparentes, de los cuales: 8 corresponden a Imán, 4 a el depósito Elicena y 3 a Mariposa.

### 5.2.1 Depósito Elicena

A continuación, se presenta un resumen de las principales características identificadas en los cortes analizados pertenecientes al depósito Elicena. En el Anexo A se muestran las descripciones expandidas.

#### 5.2.1.1 Roca de caja

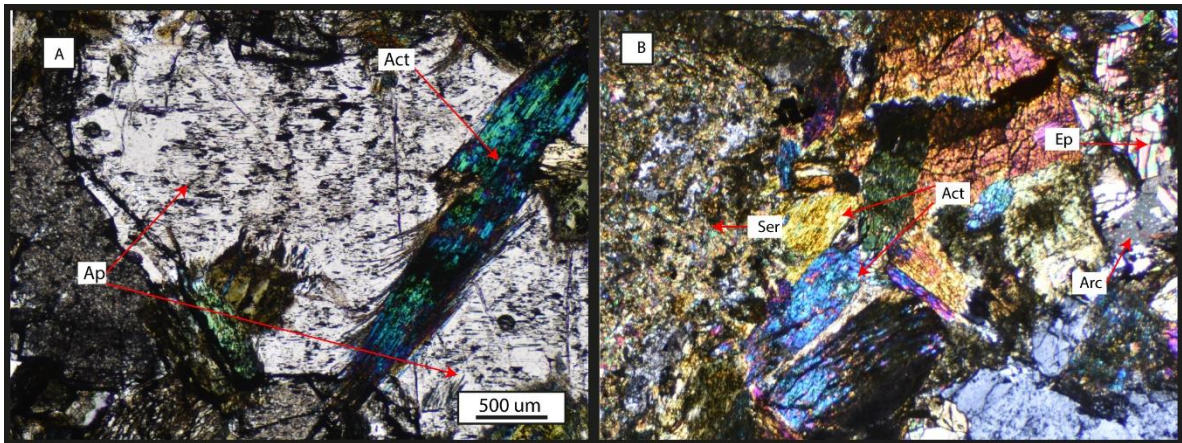
Corresponde a una roca ígnea volcánica. Posee una textura porfídica, en la cual se observan fenocristales inmersos en una masa microcristalina. Como mineralogía primaria se reconocen fenocristales de plagioclasa y feldespato, así como también son observados en la masa fundamental donde poseen un tamaño microcristalino (Figura 5.13 A). También, se encuentran presentes fenocristales de hornblenda (Figura 5.13 B) y cristales biotita como mineral accesorio. Por su composición y textura, la roca huésped de este depósito corresponde a una andesita, esta posee silicificación, feldespatización (albita) y epidotización.



**Figura 5.13:** Imágenes muestran la mineralogía principal que compone la roca caja del depósito Elicena. A) Fenocristal de feldespato (Feld) en una masa microcristalina de plagioclasa (Plg) y feldespato. B) Fenocristales plagioclasa (Plg) y hornblenda (Anf), estos últimos siendo alterados a actinolita (Act).

### 5.2.1.2 Mineralogía de alteración

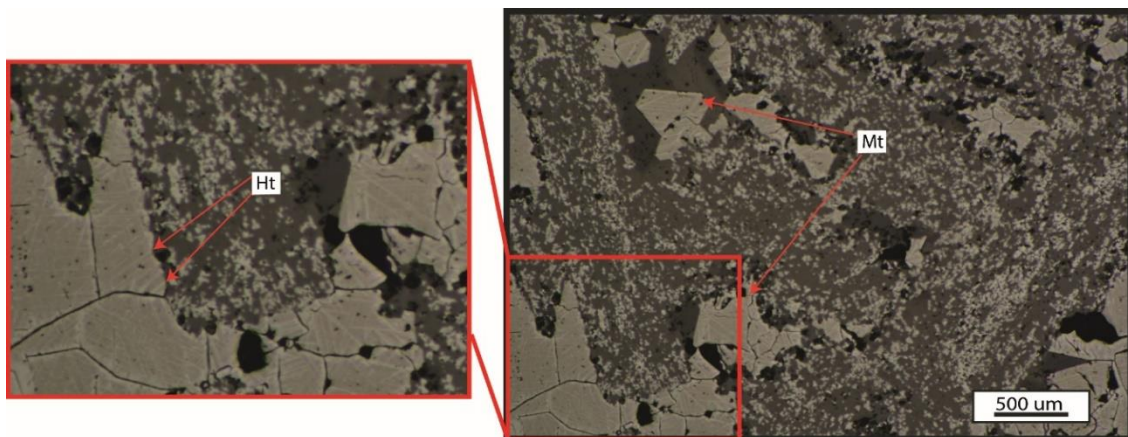
La mineralogía de alteración se compone principalmente de cristales de apatito subhedrales de grano medio a grueso presentes principalmente en vetillas junto con una concentración menor de actinolita fibrosa grano medio que corta los cristales de apatito (Figura 5.14 A), estos se encuentran asociados a cristales epidota y clorita en baja proporción y presentes en vetillas. También, se observa presencia de albita por feldespatización de minerales de la roca caja. La matriz presenta una fuerte alteración a sericita (Figura 5.14 B).



**Figura 5.14:** Imágenes muestran la mineralogía de alteración que presenta el depósito. A) Fenocristal de apatito (Ap) cortado por actinolita (Act) de hábito fibroso. B) Actinolita subhedral asociada a epidota (Ep), arcilla (Arc) y sericita (Ser) en la masa.

### 5.2.1.3 Mineralización

La mineralización observada corresponde principalmente magnetita masiva y diseminada asociada a relleno de cavidades dejadas por la lixiviación de minerales de la roca caja. Esta presenta leve martitización (Figura 5.15).



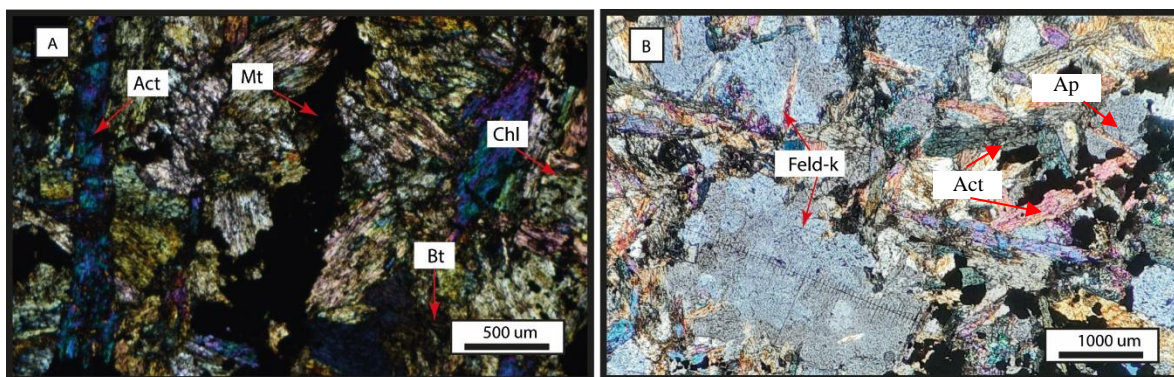
**Figura 5.15:** Muestra la mineralización de magnetita (Mt) que presenta el depósito. En la ampliación de la izquierda se pueden observar las líneas de hematita (Ht).

## 5.2.2 Depósito Mariposa

A continuación, se presenta un resumen de las principales características identificadas en los cortes analizados pertenecientes al depósito Mariposa. En el Anexo A se muestran las descripciones expandidas.

### 5.2.2.1 Roca caja

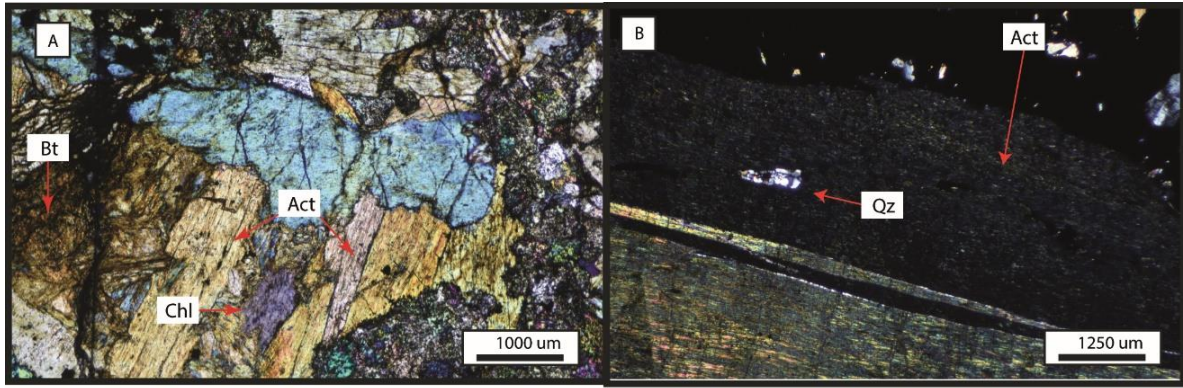
Corresponde a una lava, presenta textura porfídica, donde se reconoce mineralogía primaria de anfíbol (hornblenda) con alteración a actinolita (Figura 5.16 A) y feldespato-k como mineral accesorio (Figura 5.16 B). Realizando observaciones a luz reflejada se permitió reconocer la presencia de cristales anhedrales de magnetita cuyo porcentaje modal puede alcanzar hasta un 20 %. Por su composición y textura, la roca huésped de este depósito corresponde a una andesita porfídica.



**Figura 5.16:** Imágenes muestran la mineralogía principal que compone la roca caja del depósito Mariposa. A) Se observa hornblenda alterada a actinolita (Act) y biotita (Bt) alterada a clorita (Chl). B) Se observa mineralogía de roca caja correspondiente principalmente a ortoclasa (Feld-k).

### 5.2.2.2 Mineralogía de alteración

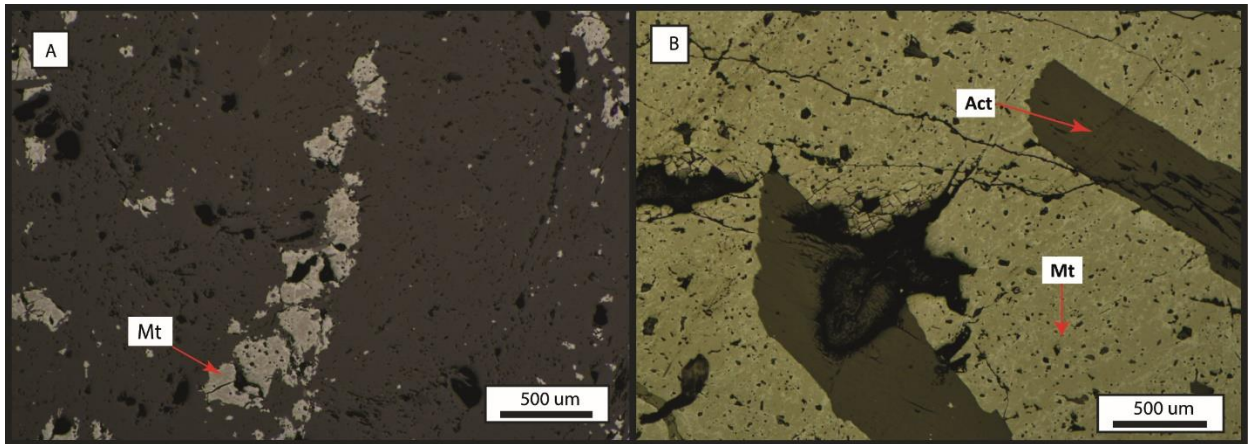
La actinolita corresponde al mineral de alteración que predomina en la zona, se encuentra principalmente como agregado monomineral asociado a magnetita, donde el tamaño de grano va de medio a grueso, alcanzando dimensiones centimétricas (>2 cm). En estas zonas la actinolita no se encuentra mayormente alterada (Figura 5.17 B). También, se observan zonas de asociación de feldespato-k anhedral con actinolita grano fino, la actinolita se presenta intercrecida con otros cristales de actinolita de distintas morfologías, que van de cristales anhedrales a fibrosos y de grano medio a grano fino. Algunos agregados de actinolita parecen estar parcialmente alterados. En la zona de mineralización menor se puede observar una alteración local con clorita, sericita y epidota (Figura 5.17).



**Figura 5.17:** Mineralogía de alteración que caracteriza al depósito Mariposa. A) Fenocristales de clorita (Chl), biotita (Bt) y actinolita (Act) rodeados por una masa sericitizada junto a epidota. B) Gran cristal de actinolita (Act) con cuarzo secundario (Qz) en sus en sus intersticios.

### 5.2.2.3 Mineralización

La mineralización está representada principalmente por magnetita, la cual se encuentra intercrecida con actinolita, en forma masiva o diseminada. En zonas de alta mineralización (>70% de Fe) la magnetita se encuentra intercrecida con cristales de actinolita que van de tamaño medio a grueso (Figura 5.18 B). Mientras que en las zonas de mineralización menor la magnetita es anhedral y se encuentra diseminada (5.18 A).



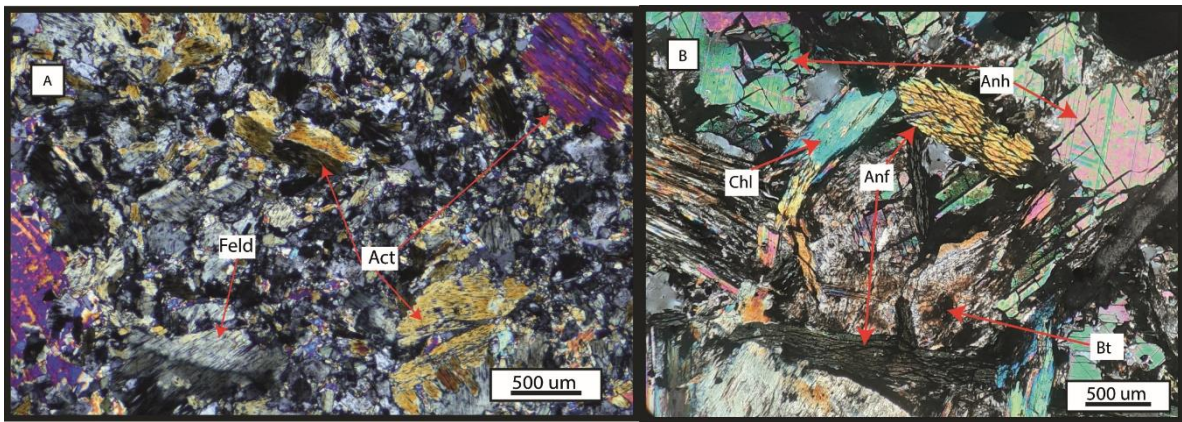
**Figura 5.18:** Mineralización principal del depósito Mariposa. A) Magnetita (Mt) diseminada. B) Magnetita (Mt) masiva intercrecida con cristales de actinolita (Act) grano grueso.

### 5.2.3 Depósito Imán

A continuación, se presenta un resumen de las principales características identificadas en los cortes analizados pertenecientes al depósito Imán. En el Anexo A se muestran las descripciones expandidas.

### 5.2.3.1 Roca de caja

A partir de la observación de las muestras menos alteradas se pudieron identificar dos litologías distintas para la roca caja del depósito. En primer lugar, se identificó una roca ígnea volcánica de textura porfídica (Figura 5.19 A), donde se reconocen principalmente fenocristales de plagioclasas y hornblenda alterada a actinolita, mientras que la matriz está compuesta por microcristales de plagioclasa y máficos, por sus características esta se clasifica como una andesita porfídica. También se identificó una segunda litología correspondiente a una roca ígnea intrusiva de composición diorítica (Figura 5.19 B), la cual presenta cristales que van de tamaño medio a grueso, donde la mineralogía primaria está compuesta por plagioclasa que presenta alteración de epidota y clorita, cristales máficos de biotita y hornblenda, los cuales se encuentran fuertemente alterados por clorita y/o biotita secundaria.



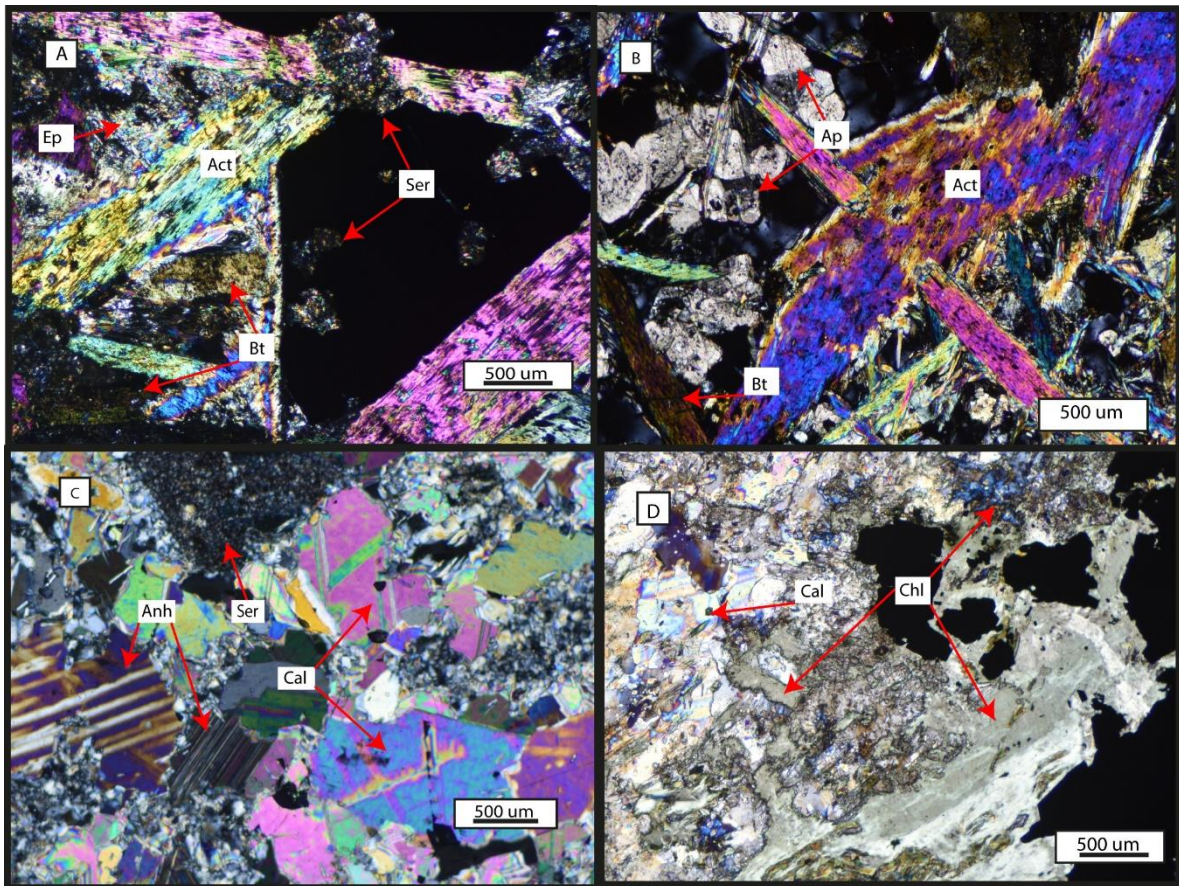
**Figura 5.19:** Muestra la mineralogía primaria que compone la roca caja. A) Roca de textura porfídica, con fenocristales de feldespato-k (Feld) como mineral accesorio y cristales de hornblenda alterados a actinolita (Act) inmersos en una masa microcristalina de plagioclasa, mineralogía característica de andesita. B) Roca de textura fanerítica, con cristales de anhidrita (Anh), clorita (Chl) y cristales de biotita (Bt) y hornblenda (Anf) siendo alterados, mineralogía característica de diorita.

### 5.2.3.2 Mineralogía de alteración

La actinolita corresponde al mineral de alteración que predomina en las muestras, puede estar asociada a la mineralización masiva de magnetita (Figura 5.20 A) o se encuentra reemplazando fenocristales y microcristales máficos de la masa fundamental (Figura 5.20 B). Otro mineral de alteración que se observa corresponde a biotita secundaria, que se encuentra reemplazando principalmente actinolitas y alterando pervasivamente la roca caja.

En vetillas y cúmulos se observa calcita, asociada principalmente a anhidrita (Figura 5.20 C) y en menor cantidad a cuarzo secundario, se presenta también llenando espacios intersticiales de agregados de apatito grano medio. El apatito, también se encuentra mayoritariamente como microcristales aciculares en asociación con anhidrita y en ocasiones como finos cristales subhedrales asociados a actinolita en bordes de mineralización de magnetita (Figura 5.20 B). También se observa clorita que se presenta en reemplazo de cristales de la roca caja (Figura 5.20

D) y biotita secundaria, mientras que cristales de epidota reemplazan a actinolita como parte de un evento de alteración hidrotermal tardía. Sericita se forma por reemplazo de biotita secundaria preexistente y relictos minerales de roca caja.

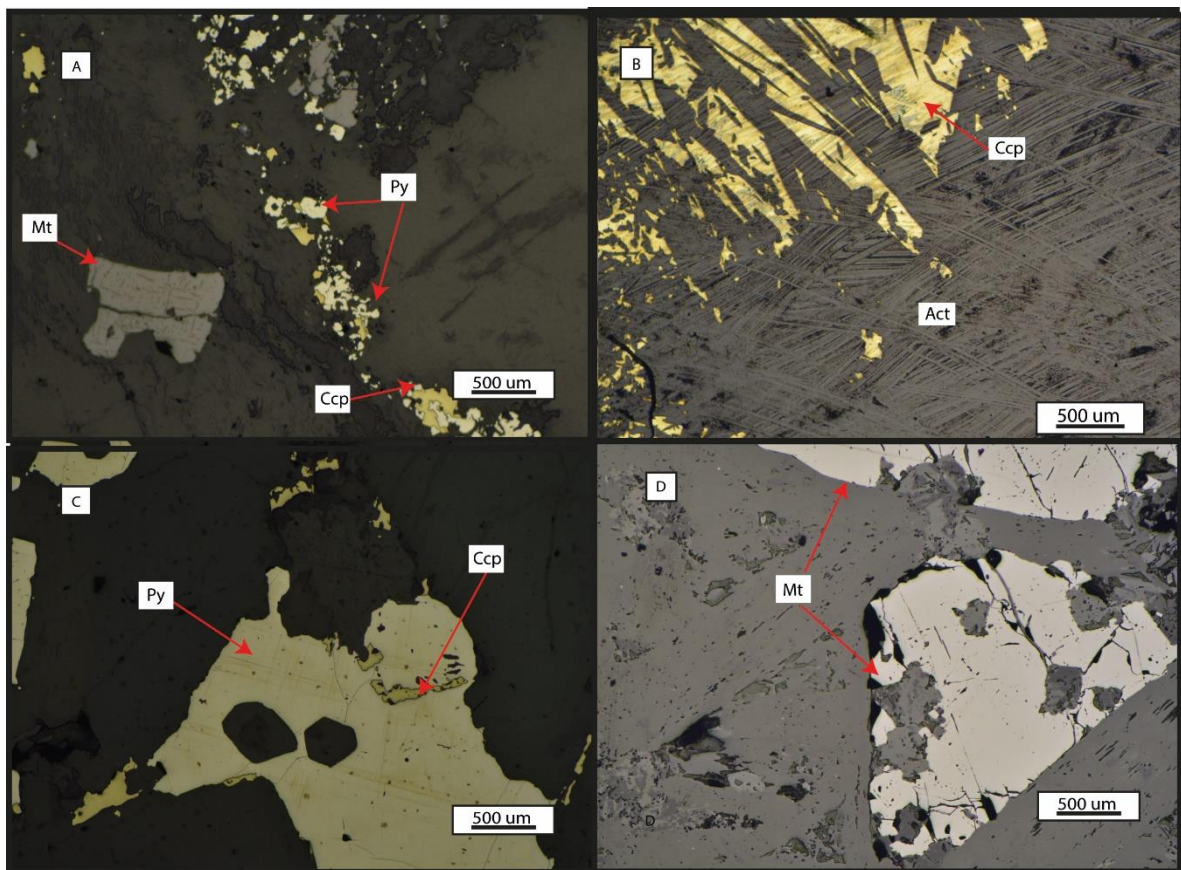


**Figura 5.20:** Mineralogía de alteración que caracteriza al depósito Imán. A) Sericita (Ser) alterando segmentos medios de cristales de actinolita (Act), biotita (Bt) y epidota (Ep) alterando bordes. B) Cristales de apatito (Ap), actinolita (Act) y biotita secundaria (Bt) intercrecidos. C) Veta de calcita (Cal) y anhídrita (Anh) en andesita. D) Alteración pervasiva de clorita (Chl) y también calcita (Cal) intersticial.

### 5.2.3.3 Mineralización

La mineralización del depósito Imán está caracterizada por magnetita y en menor proporción por los sulfuros pirita y calcopirita. La mineralización pirita y calcopirita se encuentran asociadas y se pueden presentar en vetillas, diseminadas (Figura 5.21 A) o como mineralización masiva (Figura 5.21 B y C). La pirita presenta formas subhedrales a anhedrales, y puede presentar inclusiones o intercrecimientos de calcopirita (Figura 5.21 C), por otro lado, la calcopirita se presenta de forma anhedral. Se encuentran asociadas a etapas de alteración clorita-epidota y en mayor proporción a la etapa calcita-anhídrita. Con respecto a la mineralización de magnetita se presenta mayoritariamente de forma masiva intercrecida con actinolita (Figura 5.21 D) y en relleno de espacios dejados por minerales alterados (Figura 5.21 A), existen zonas con leve martitización.





**Figura 5.21:** Mineralización principal del depósito Imán. A) Diseminaciones de pirita (Py) y calcopirita (Ccp), magnetita (Mt) relleno de cavidades. B) Mineralización masiva de calcopirita (Ccp) fracturando cristales de actinolita (Act). C) Mineralización masiva de pirita (Py) con inclusiones de calcopirita (Ccp). D) Mineralización masiva de magnetita euhedra (Mt) intercrecida con cristales de actinolita.

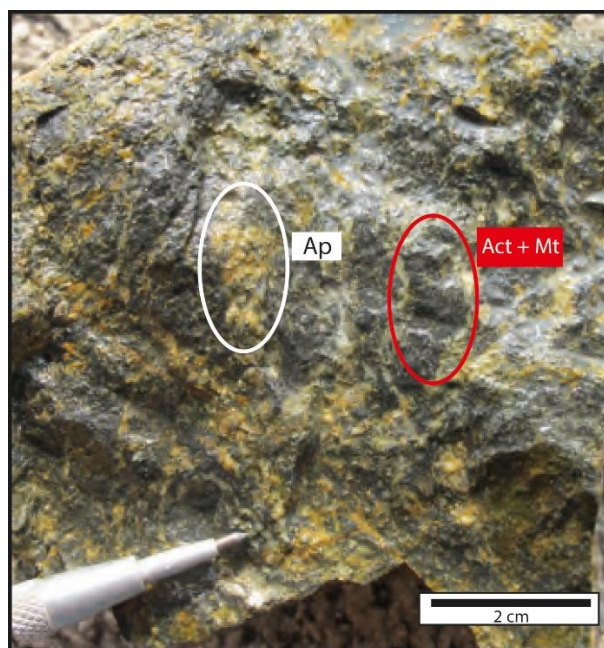
## 5.3 Morfología de actinolitas

Las actinolitas de los depósitos IOA Elicena, Mariposa e Imán exhiben diferentes texturas asociadas al tipo de mineralización. En esta sección se describen las macrotexturas, microtexturas y zonaciones observadas a partir de trabajo de campo y análisis microscópico.

### 5.3.1 Macrotexturas

A partir del análisis de muestras de mano y logueo de sondajes se pudieron reconocer diferentes texturas de actinolitas a nivel macroscópico. A continuación, se presenta una breve descripción de las macrotexturas más representativas para cada depósito estudiado.

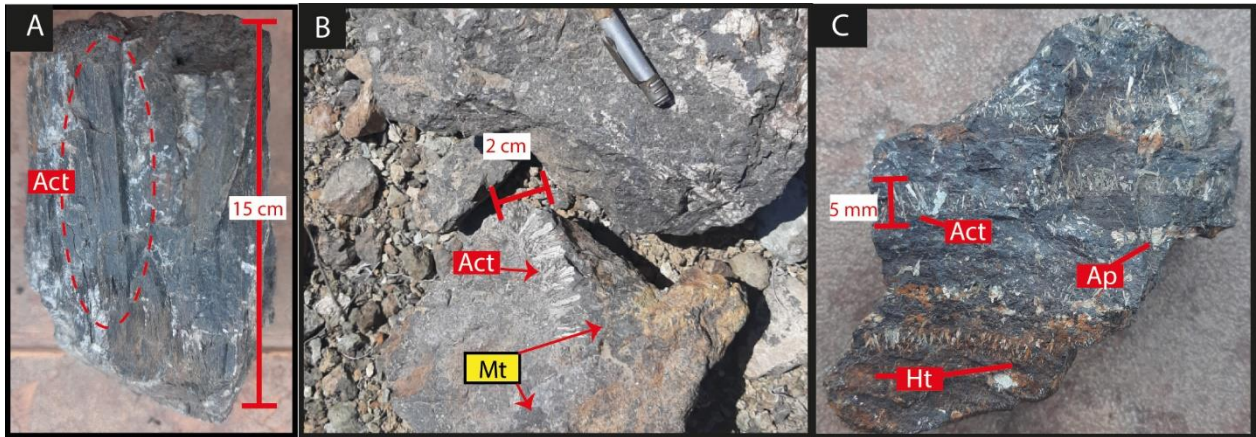
El depósito Elicena presenta una baja concentración de actinolita en comparación con porcentaje de apatito observado, las principales texturas reconocidas en muestra de mano se reducen a finos granos (< 1 mm) anhedrales o subhedrales intercrecidos con magnetita, los cuales cristalizaron por reemplazo pervasivo de la roca caja (Figura 5.22), o en enrejados de vetilla junto a apatito y magnetita.



**Figura 5.22:** Actinolita grano grano fino junto a magnetita como reemplazo pervasivo de roca caja.

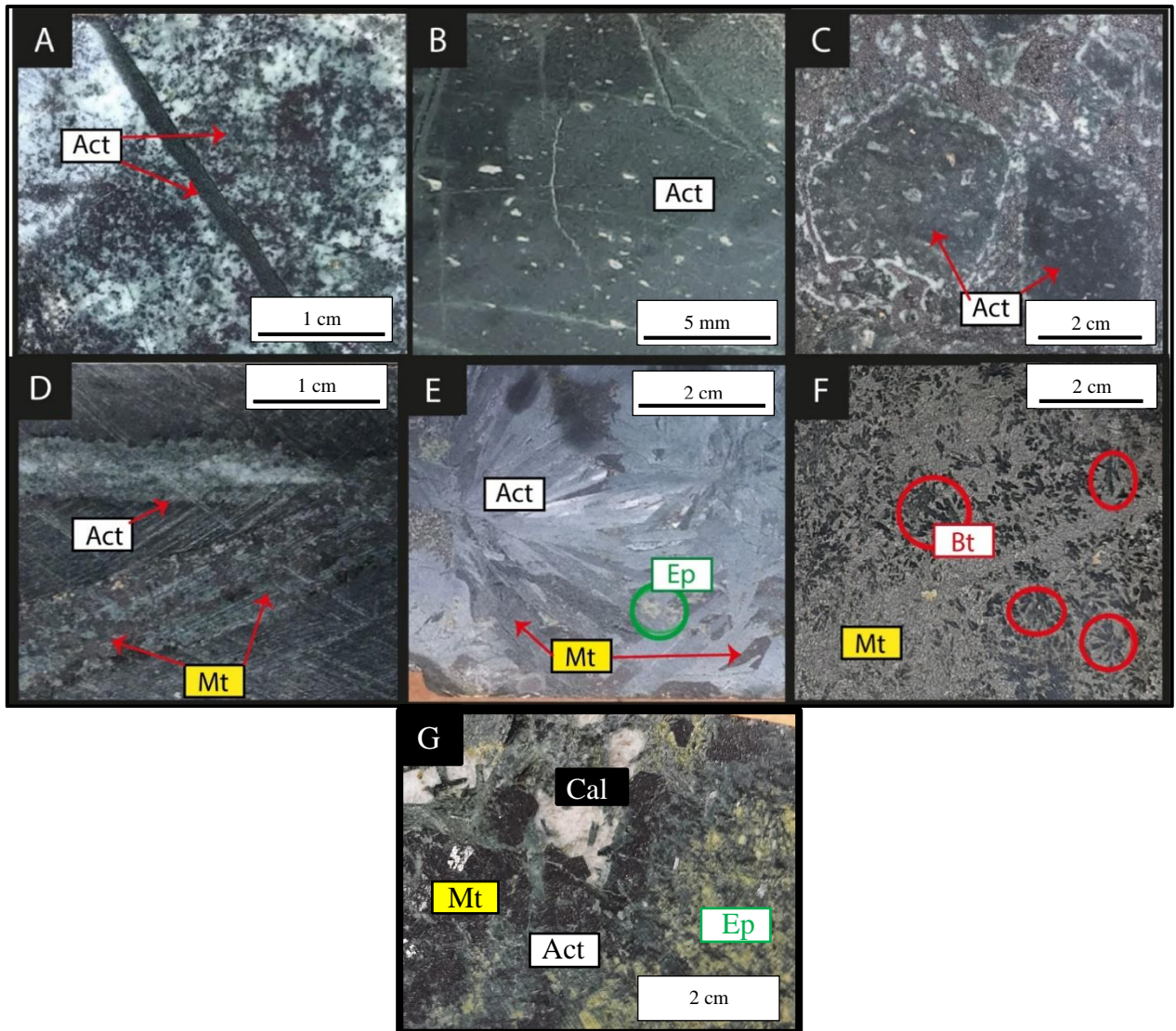
En Mariposa las principales texturas reconocidas corresponden a cristales de grano grueso (5 mm – 3 cm) a muy grueso (> 3 cm) que se caracterizan por presentar un hábito fibroso (Figura 5.23 A) y estar intercrecidos con magnetita masiva en los bordes de la veta, estos cristales presentan una disposición preferente perpendicular a la veta (Figura 5.23 B). También, se observan en menor concentración actinolitas de grano fino (< 1 mm) a medio (1 – 5 mm), fibrosas euhedrales

en vetillas que se encuentran en asociación con cristales de apatito grano fino (Figura 5.23 C), ya sea como halo radial en torno a los cristales o intercrecidos, algunas actinolitas se encuentran asociadas a finos cristales de clorita.



**Figura 5.23:** Macrottexturas de actinolitas representativas del depósito Mariposa. A) Actinolita (Act) fibrosa de grano muy grueso (10 cm). B) Actinolita fibrosa grano grueso (2 cm) con disposición preferente en roca de magnetita masiva. C) Actinolita grano fino a medio (<1 mm – 5 mm) en finas vetas asociadas con apatito.

El depósito Imán se caracteriza por presentar un gran porcentaje de cristales de actinolita con hábito acicular radial en las zonas de mineralización intensa. Por otro lado, en zonas de mineralización menor, el depósito exhibe una gran variedad de texturas, se observan actinolitas microcristalinas o de grano fino (< 1 mm) anhedrales a lo largo de vetillas que cortan la roca caja (Figura 5.24 A) de color verde intenso y también se distingue este tipo de actinolita como reemplazo moderado a intenso de roca caja (Figura 5.24 B) y en clastos de brecha de igual composición (Figura 5.24 C). La actinolita grano medio (1 – 5 mm) se encuentra principalmente reemplazando minerales máficos de rocas intrusivas y en vetas con hábito acicular intercrecida con magnetita (Figura 5.24 D), en algunas zonas con orientación perpendicular a la veta. Actinolitas grano grueso (5 mm – 3 cm) se observan mayormente con un hábito acicular radial, intercrecidas con magnetita masiva (Figura 5.24 E). También, se distinguieron algunos cristales grano medio reemplazados por biotita secundaria, pseudomorfa de la actinolita (Figura 5.24 F) y otro grupo de cristales de grano medio a grueso se encuentran en asociación con otros minerales de alteración, como clorita, calcita y epidota (Figura 5.24 G).



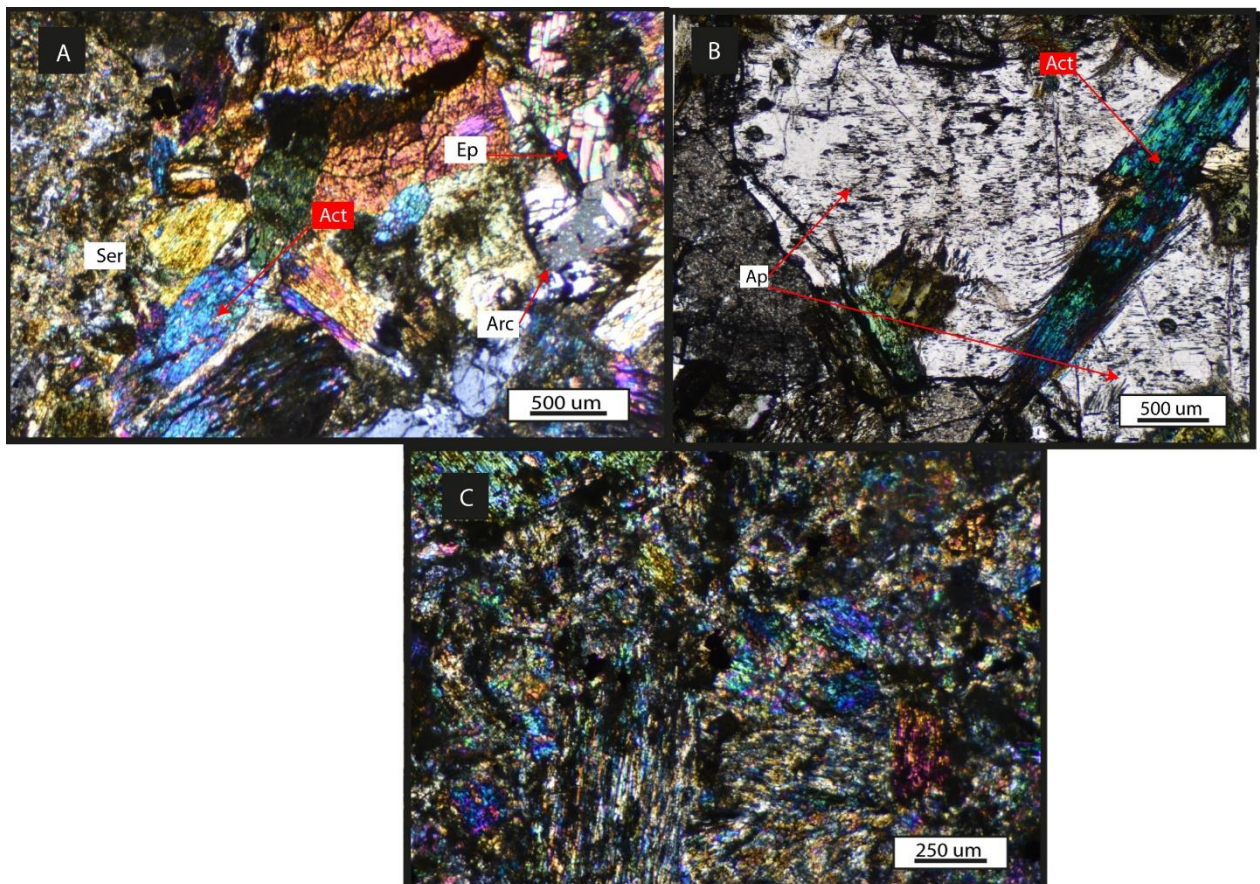
**Figura 5.24:** Macrottexturas de actinolitas representativas del depósito Imán. A) Vetilla de actinolita grano fino cortando la roca, mientras que cerca a esta veta se observan cristales de grano medio. B) Roca caja con su masa fundamental alterada a actinolita (Act) y/o clorita. C) Clastos en brecha cuya composición corresponde a una roca volcánica que fue alterada a actinolita (Act). D) Veta curva de magnetita (Mt) intercrecida con cristales de actinolita (Act) grano medio. E) Cristales pálidos de actinolita (Act, posible tremolita) grano grueso con hábito radial intercrecidos con magnetita (Mt). F) Magnetita (Mt) intercrecida con biotita secundaria (Bt) reemplazando actinolita. G) Cristales grano medio de actinolita (Act) en asociación con epidota (Ep), calcita (Cal), clorita alterando a actinolita y magnetita (Mt).

### 5.3.2 Microtexturas

En esta sección se describen las principales texturas de actinolita observadas tanto por el microscopio petrográfico, como en el SEM.

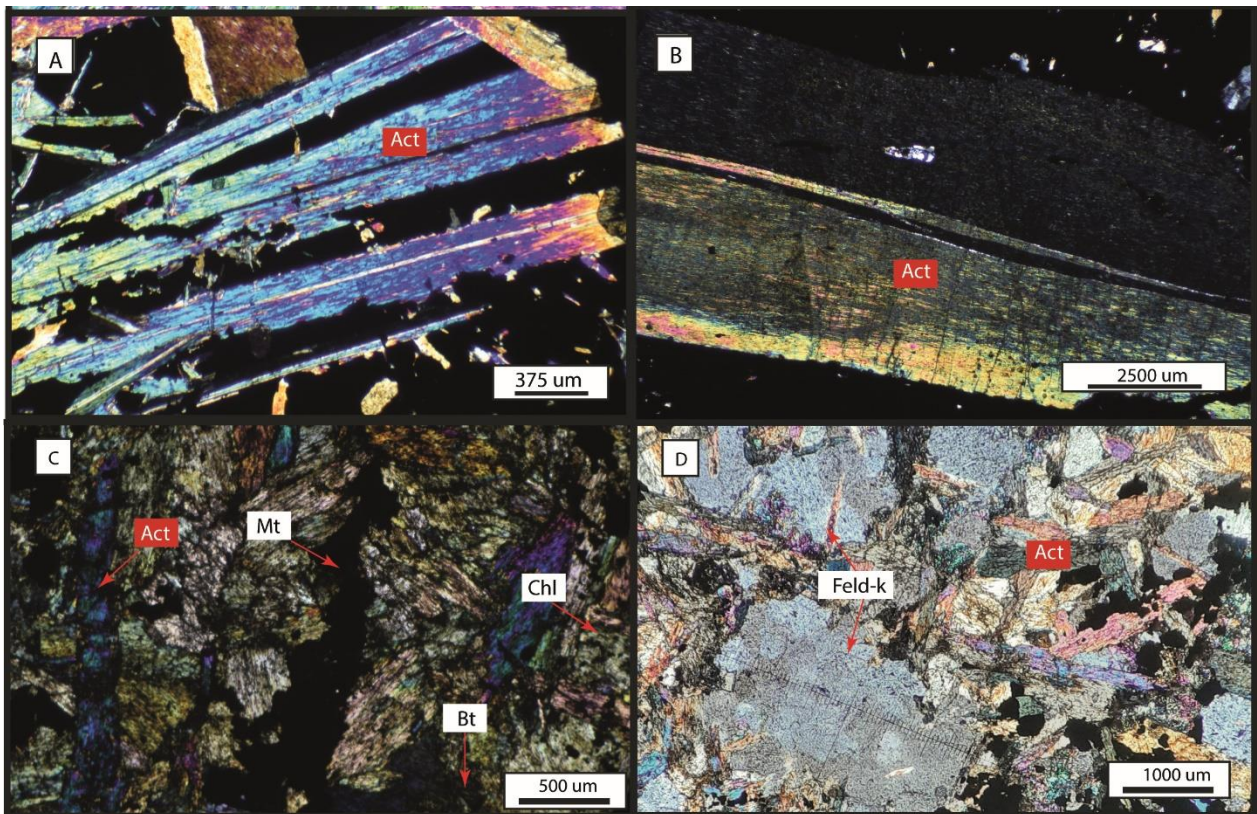
#### 5.3.2.1 Microscopio petrográfico

En el depósito Elicena se encontraron principalmente cristales de actinolita fibrosa y subhedral grano medio (1 - 5mm) en vetillas, en asociación con otros minerales (Figura 5.25 A y B) de preferencia con apatito, mientras que las actinolitas de grano muy fino (<< 1 mm) principalmente en la masa fundamental (Figura 5.25 C), acompañada de epidota y un porcentaje menor de magnetita diseminada.



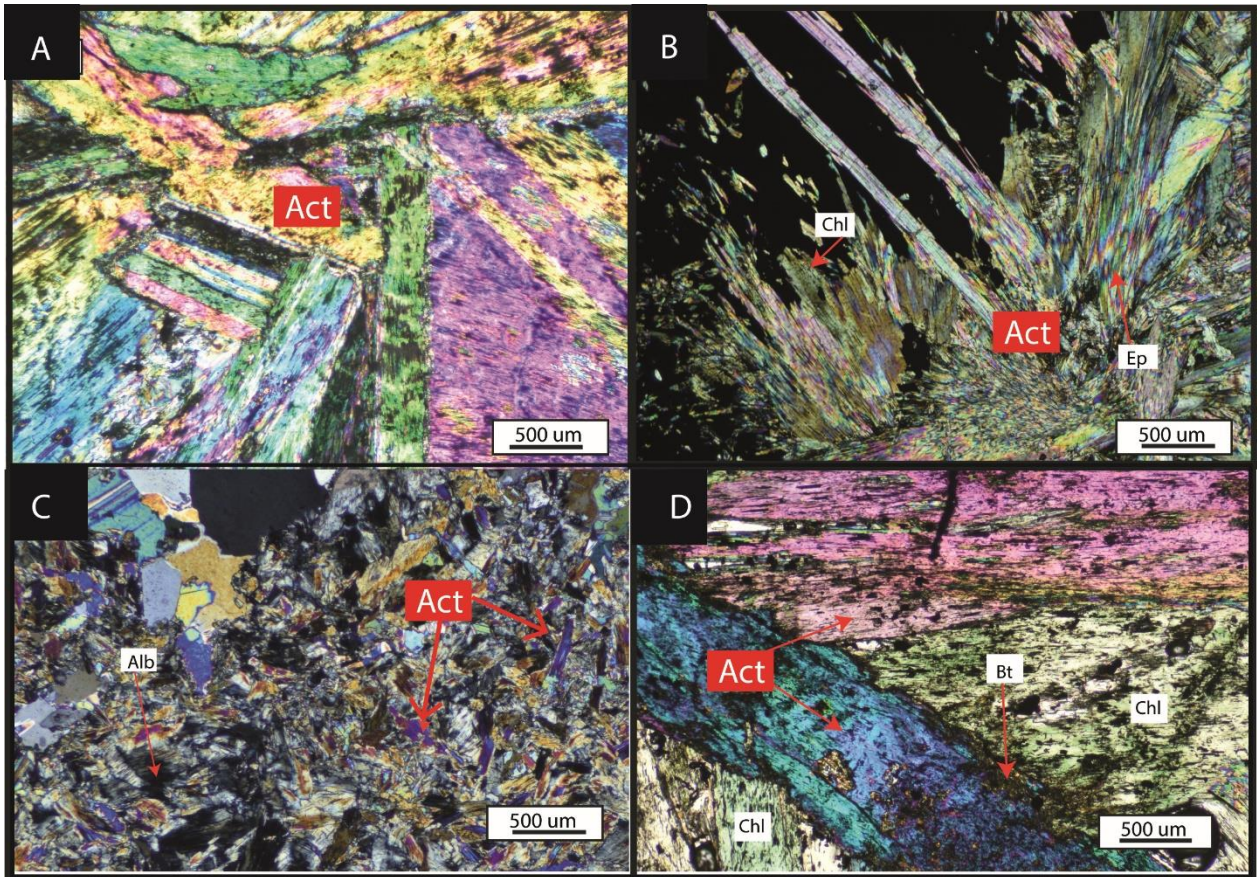
**Figura 5.25:** Microtexturas de actinolitas características del depósito Elicena. A) y B) Actinolita (Act) subhedral grano medio en asociación con otros minerales de alteración como epidota (Ep), sericita (Ser), arcillas (Arc) y apatito (Ap). B) Microcristales de actinolita como reemplazo pervasivo de roca caja.

El depósito Mariposa posee diversas de texturas de actinolita que están relacionadas con el tipo de mineralización de magnetita y su abundancia. En las zonas de abundante mineralización o magnetita masiva se presentan principalmente cristales fibrosos de grano grueso (5 mm – 3 cm) a muy grueso (>3 cm) (Figura 5.26 B), otro grupo de cristales grano medio (1 - 5 mm) con hábito fibroso y prismático (Figura 5.26 A) que en su mayoría se encuentran orientados perpendicular a la veta y un tercer grupo de cristales aciculares de grano muy fino (<< 1 mm) inmersos en la magnetita. En zonas de mineralización diseminada de magnetita, se observa un grupo de cristales anhedrales de grano fino (< 1 mm) diseminados en la matriz (Figura 5.26 D), así como también cristales grano fino (< 1 mm) a medio (1 – 5 mm) subhedrales en asociación con clorita (Figura 5.26 C).



**Figura 5.26:** Microtexturas de actinolita características del depósito Mariposa. A) Actinolitas (Act) grano medio hábito fibroso y prismático con orientación preferente. B) Actinolita (Act) grano muy grueso inmersa en magnetita masiva. C) Actinolita (Act) grano medio a fino en asociación con clorita (Chl) asociada a veta de magnetita. D) Actinolita grano fino (Act) diseminada, alterando roca caja con mineralización de magnetita (Mt) diseminada .

Para el depósito Imán se distinguen cristales aciculares radiales grano grueso (5 mm – 3 cm), estos últimos en ocasiones alterados a clorita (Figura 5.27 D), otra población de cristales grano medio (1 - 5 mm) fibroso y también de hábito acicular radial (Figura 5.27 A), este tamaño de grano es el que presenta mayor alteración ya sea de biotita secundaria, clorita o epidota (Figura 5.27 B). Los cristales de hábito acicular radial se encuentran próximos a mineralizaciones masivas. Por último, en menor cantidad se observa una familia de cristales aciculares grano fino inmersos en la matriz (Figura 5.27 C).



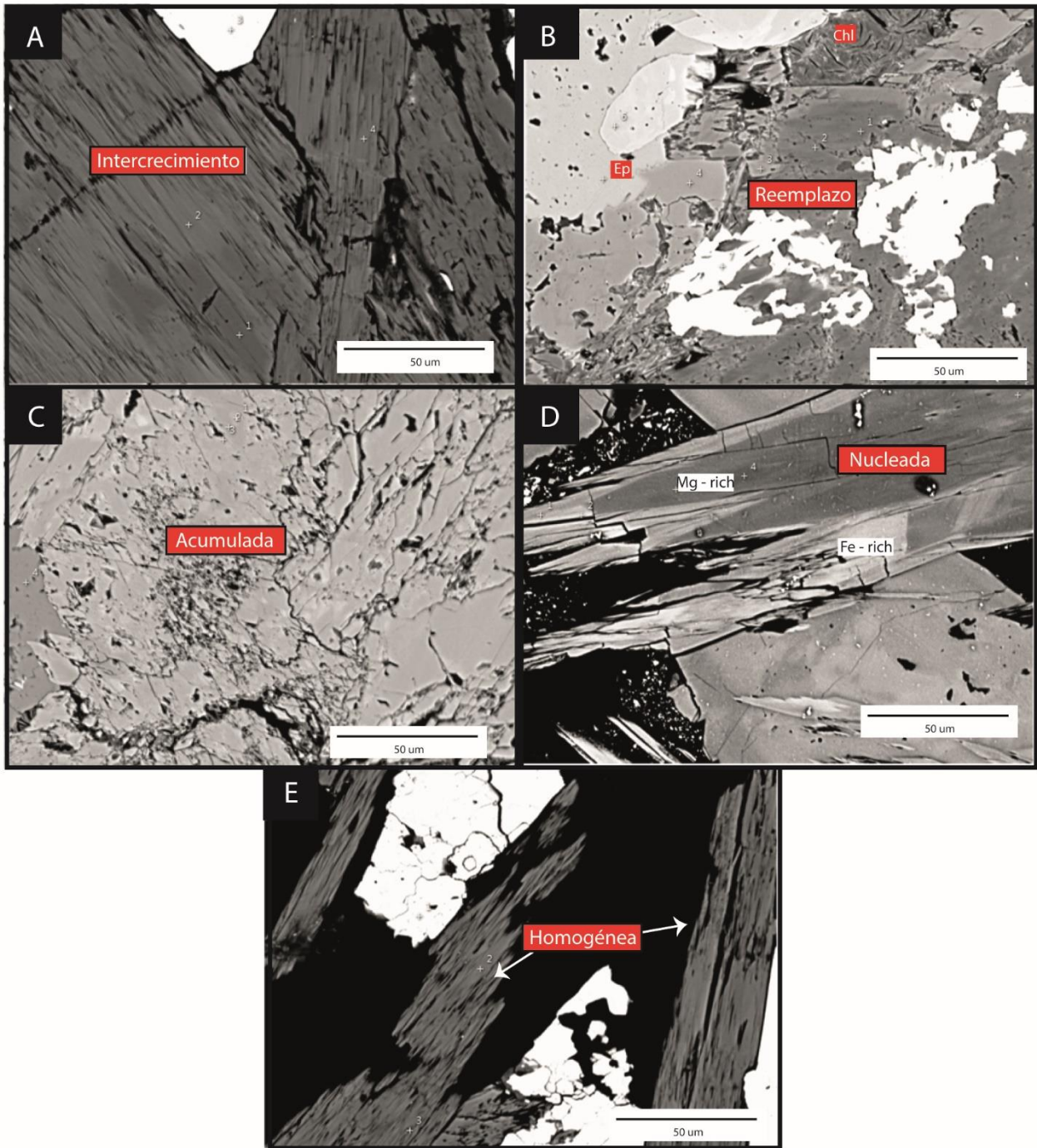
**Figura 5.27:** Microtexturas de actinolita características del depósito Imán. A) Actinolita (Act) grano grueso acicular radial. B) Actinolita (Act) grano medio acicular radial, con alteración a clorita (Chl) y epidota (Ep). C) Microcristales y cristales aciculares grano fino de actinolita (Act) en matriz. F) Actinolita (Act) grano medio acicular radial con reemplazo insipiente de clorita (Chl) y biotita (Bt).

### 5.3.2.2 SEM

A partir del análisis de imágenes BSE se pudieron reconocer cinco texturas diferentes a nivel micrométrico, las cuales se presentan en los tres depósitos estudiados con distinta abundancia. A continuación, una breve descripción de las diferentes texturas observadas.

- Intercrecimiento: Cristales de actinolita que se muestran intercrecidos con granos anteriores, produciendo fracturas en el cristal (Figura 5.28 A).
- Reemplazo: Actinolitas que presentan variación composicional localizada y amorfa generalmente en los bordes del cristal, por lo general se observa esta textura cuando la actinolita se asocia a otros minerales de alteración (Figura 5.28 B).
- Acumulada (o masiva): Corresponde a agregados de pequeños cristales de actinolita en su mayoría amorfos (Figura 5.28 C), o zonas donde no existe distinción entre los cristales de actinolita asociado a microcristales de actinolita en masa fundamental.
- Nucleada: Actinolitas que muestran una notoria zonación de núcleo a borde, donde se puede identificar un abrupto cambio composicional (Figura 5.28 D).
- Homogénea: Tal como su nombre lo indica, corresponde a las actinolitas de apariencia uniforme, que no presentan zonación y muestran tonalidades oscuras. (Figura 5.28 E).



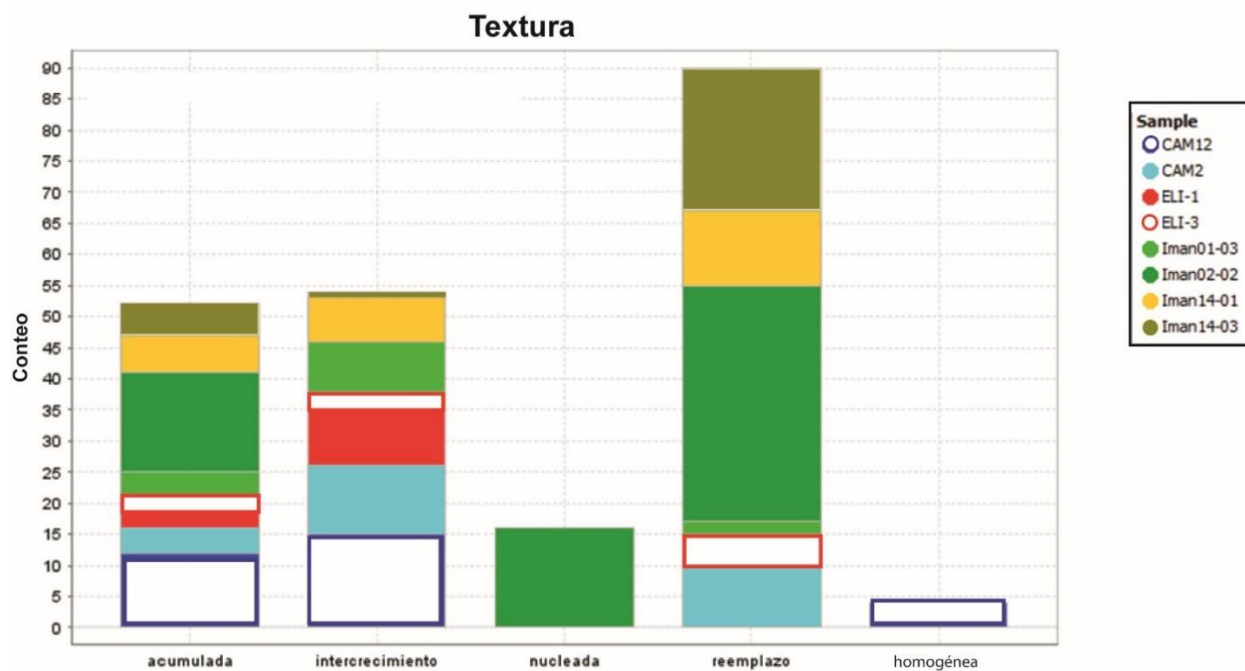


**Figura 5.28:** Imágenes BSE de microtexturas observadas en SEM. A) Actinolitas con textura de intercrecimiento (depósito Mariposa). B) Textura de reemplazo con bordes de reacción color claro, que implica un reemplazo insipiente de actinolita (depósito Mariposa). C) Textura acumulada, muestra como cristales amorfos de actinolita se asocian (depósito Elicena). D) Textura nucleada, muestra como actinolita posee una zonación marcada (depósito Imán). E) Textura homogénea, actinolitas no presentan cambios composicionales y se encuentran asociadas a mineralización de magnetita masiva (depósito Mariposa).

Con respecto al porcentaje de ocurrencia de las texturas antes mencionadas, por depósito se muestran algunas tendencias (Figura 5.29). En el depósito Elicena predominan los granos con textura de intercrecimiento para actinolitas grano fino fibrosas. Estas actinolitas se encuentran cercanas a la mineralización diseminada de magnetita y se reconocen principalmente en la muestra ELI-1. Le sigue la presencia de granos con textura acumulada (por igual para ambas muestras) en zonas donde domina la actinolita de grano muy fino y solo muestra granos con textura de reemplazo para actinolitas de grano medio presentes en vetas de la muestra ELI-3.

El depósito Mariposa exhibe mayormente granos de actinolita con textura de intercrecimiento y acumulada, estas texturas se presentaron en mayor proporción para las actinolitas de grano grueso a muy grueso pertenecientes a muestra CAM12, las cuales están inmersas en magnetita pobre en inclusión. La textura de reemplazo solo se exhibe en actinolitas de la muestra CAM2 y la textura homogénea solo en actinolitas de grano muy fino pertenecientes a CAM12.

El depósito Imán presenta una mayor cantidad de granos con textura de reemplazo donde predominan las actinolitas de la muestra Iman02-02, seguida por la muestra Iman14-03, Iman14-01 y por último la muestra Iman01-03. A las actinolitas con textura de reemplazo le siguen las con textura acumulada, donde la con mayor cantidad de granos corresponden a Iman02-02, luego Iman14-01, Iman14-03 y por último Iman01-03. La textura de intercrecimiento se exhibe por igual en actinolitas de la muestra Iman01-03 y Iman14-01, mientras que solo se observa un grano con esta textura en la muestra Iman14-03. Finalmente, la textura nucleada solo se observó en actinolitas de la muestra Iman02-02, esta muestra no presenta actinolitas con textura de intercrecimiento.

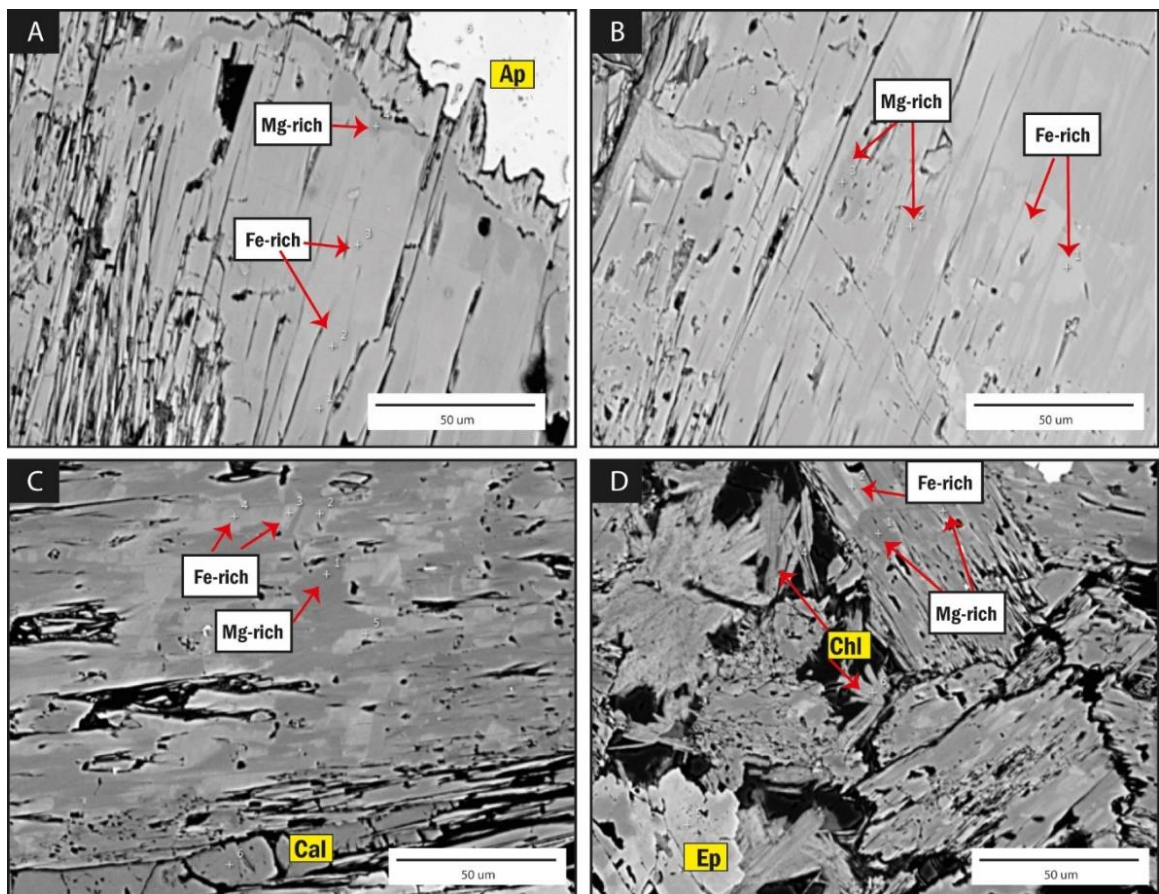


**Figura 5.29:** Gráfico de texturas por muestra. Indica la cantidad de puntos en actinolitas de cada muestra que presenta cierta textura. Las muestras ELI-1 y ELI-3 pertenecen al depósito Elicena, CAM2 y CAM12 pertenecen al depósito Mariposa y las muestras Iman01-03, Iman02-02, Iman14-01 e Iman14-03 pertenecen al depósito Imán.

### 5.3.3 Zonaciones

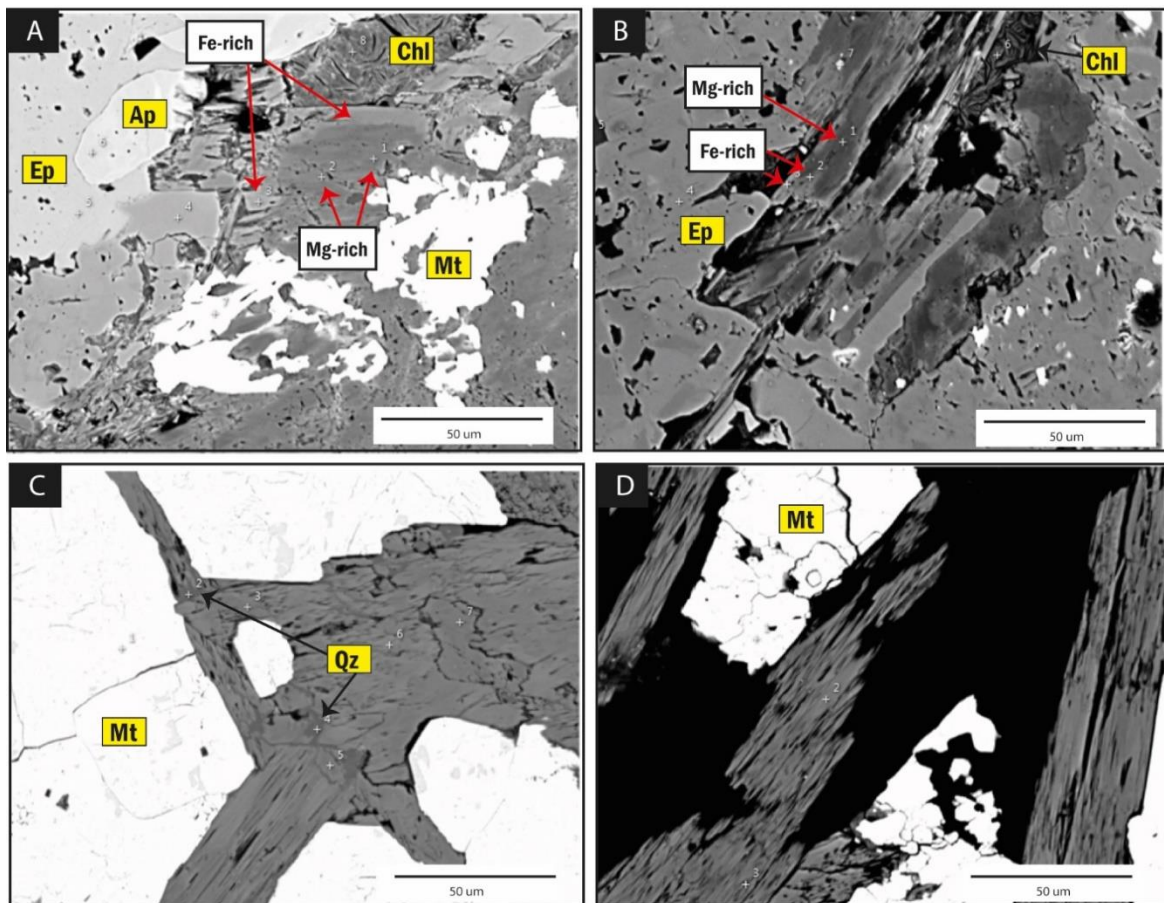
La zonación química en actinolitas está asociada principalmente a la variación en la concentración de Fe y Mg en un grano (Del Real et al., 2021), como se mencionó en la metodología, esta zonación es identificada con los cambios de color observados en imágenes BSE. Dentro de un mismo grano de actinolita las áreas claras representan una zona más enriquecida en Fe (Fe-rich), mientras que los dominios oscuros una zona enriquecida en Mg (Mg-rich). A continuación, se describen las principales zonaciones observadas en los granos de actinolitas de los tres depósitos estudiados.

Las actinolitas del depósito Elicena exhiben mayormente una zonación irregular en forma de parches (Figura 5.30 B), sin embargo, en la muestra ELI-1 es posible observar actinolitas fibrosas de grano medio (1 – 5 mm) con zonación localizada en los bordes del grano. Donde se observa que el mismo grano muestra un borde interno rico en Mg con sobrecrecimiento compuesto de actinolita rica en Fe (Figura 5.30 A), se destaca que la actinolita analizada presenta textura de reemplazo y se encuentra asociada a apatito. Con respecto a la muestra ELI-3 presenta mayormente una zonación irregular en parches (Figura 5.30 C), donde no es posible determinar límites entre actinolita rica en Fe y actinolita rica en Mg. La actinolita perteneciente a esta muestra se encuentra preferentemente asociada a mineralogía de alteración de clorita, epidota y calcita (Figura 5.30 C y D).



**Figura 5.30:** Imágenes BSE de zonaciones presentes en cristales de actinolitas pertenecientes al depósito Elicena. A) Actinolita de la muestra ELI-1 con leve zonación inversa, exhibe bordes de distinta composición asociada a una textura de reemplazo, asociada a apatito (Ap). B) Actinolita de la muestra ELI-1 con zonación en parches, la esquina superior izquierda muestra intercrecimiento. C) Zonación en parches en actinolita de la muestra ELI-3 con textura acumulada (masiva) asociada a vetilla de calcita (Cal) D) Zonación en parches en actinolita de la muestra ELI-3 con textura de intercrecimiento, asociada a clorita (Chl) y epidota (Ep).

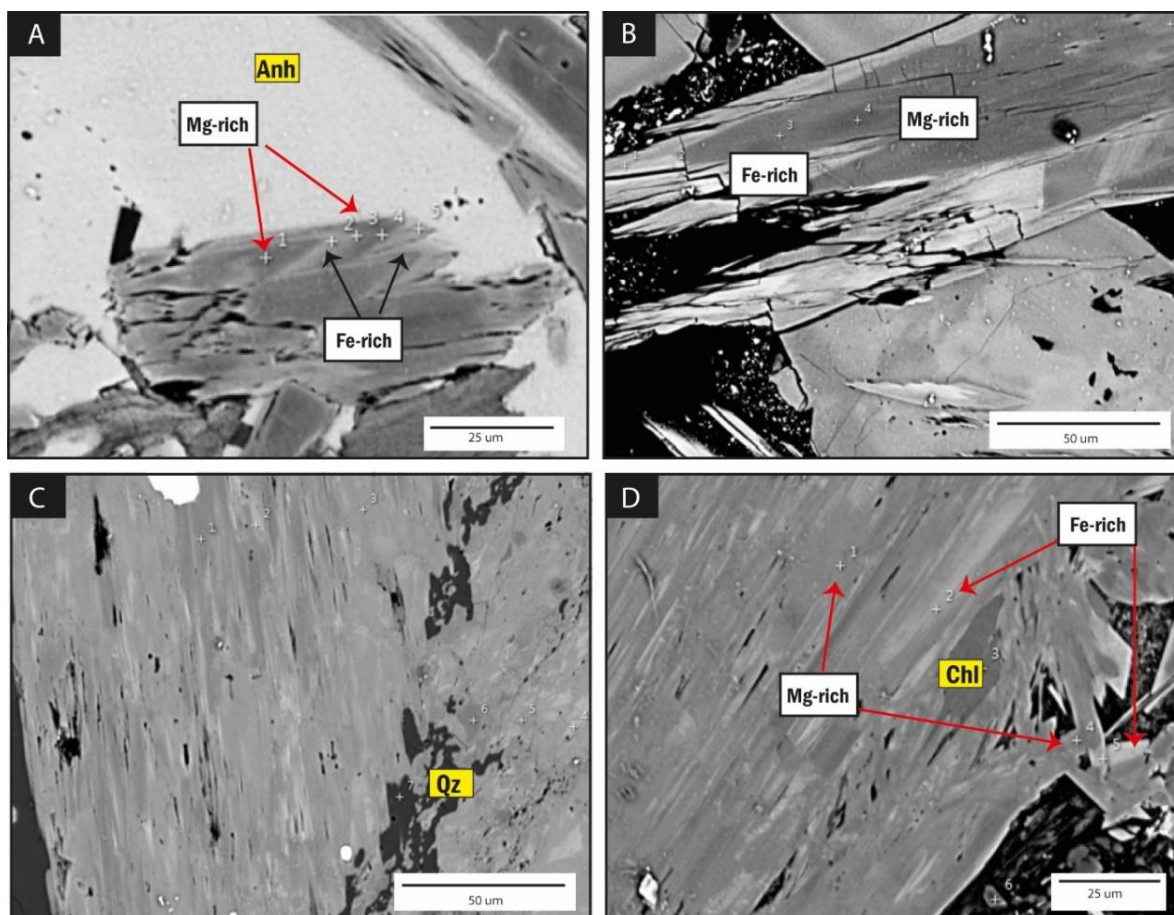
En el depósito Mariposa se observa una variación composicional menor de actinolita en comparación con Elicena e Imán, sin embargo, esta difiere entre las dos muestras analizadas. Por una parte, está la muestra CAM2, la cual presenta una zonación normal para actinolitas con textura de reemplazo (Figura 5.31 A y B) que por tanto se encuentran asociadas a minerales de alteración como clorita, epidota y apatito (Figura 5.31 A y B). Mientras que en la muestra CAM12 las actinolitas de mayor tamaño con textura acumulada y de intercrecimiento presentan leve zonación tipo parche y se encuentran asociadas a la mineralización masiva de magnetita (Figura 5.31 C), también se observa mineralogía de cuarzo rellenando intersticios entre actinolitas (Figura 5.31 C). La muestra CAM12 también posee actinolitas con textura homogénea, que tampoco presentan zonación (Figura 5.31 D).



**Figura 5.31:** Imágenes BSE de zonaciones presentes en cristales de actinolita pertenecientes al depósito Mariposa. A) y B) Actinolitas de la muestra CAM2 exhiben zonación normal, posiblemente presente en su composición concentración de elementos asociados a los minerales colindantes, como clorita (Chl),

apatito (Ap), epidota (Ep). C) y D) Actinolitas de la muestra CAM12 asociadas a mineralización masiva de magnetita (Mt) con ausencia de zonación y cuarzo (Qz) como cemento.

En las actinolitas del depósito Imán se distingue una mayor zonación en comparación con la observada en las actinolitas de los depósitos Elicena y Mariposa. Para la muestra Iman01-03 se presenta un tipo de zonación oscilatoria (Figura 5.32 A), donde se observa una transición nítida entre los dos tipos de actinolita, sin embargo, no es posible definir un núcleo o borde rico en Fe o Mg. Localmente, la muestra Iman02-02 exhibe actinolitas con zonación normal (Figura 5.32 B) de textura nucleada, donde las zonas oscuras (rica en Mg) son en su mayoría los núcleos de actinolita, mientras que las áreas claras (rica en Fe) ocurren en los bordes de los granos (Figura 5.32 B). La muestra Iman14-01 presenta actinolitas con zonación irregular tipo parche (Figura 5.32 C), asociada a textura de reemplazo, donde no es posible determinar límites entre la transición de actinolita rica en Fe a actinolita rica en Mg. La muestra de Iman14-03, también presenta mayormente actinolitas con zonación irregular, mientras que los agregados fibrosos grano fino ubicados en los bordes de la actinolita más gruesa, exhiben una zonación normal (Figura 5.32 D).



**Figura 5.32:** Imágenes BSE de zonaciones presentes en cristales de actinolita pertenecientes al depósito Imán. A) Actinolita de la muestra Iman01-03 con textura de reemplazo posee zonación oscilatoria, se encuentra asociada a anhidrita intersticial. B) Actinolita de la muestra IMAN02-02 con textura nucleada, exhibe zonación normal. C) Actinolita de la muestra IMAN14-01 con textura de reemplazo presenta zonación en parches, al igual que la actinolita de la muestra IMAN14-03 en D.

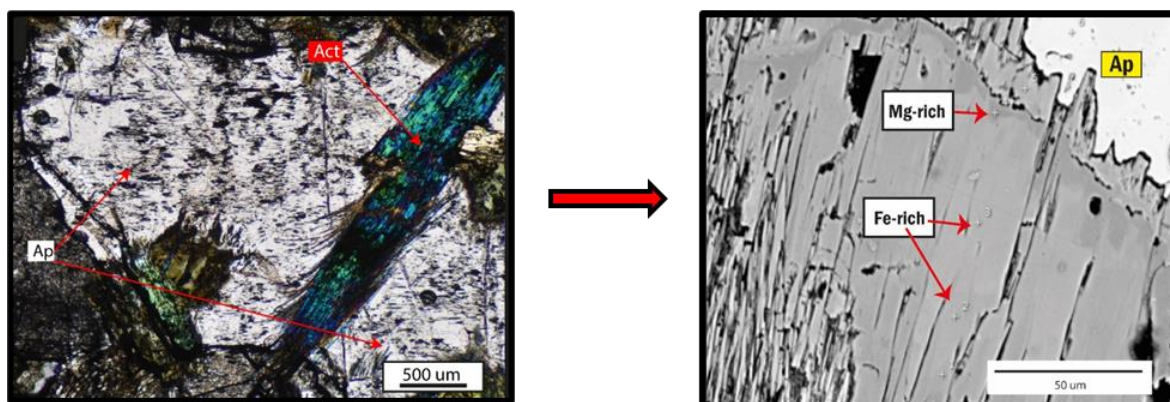
## 5.4 Caracterización textural

A partir de las distintas texturas de actinolitas previamente descritas, se identificaron relaciones a distintas escalas. A continuación, se describen los tipos de actinolita identificados para cada depósito, su microtextura y tipo de zonación característica.

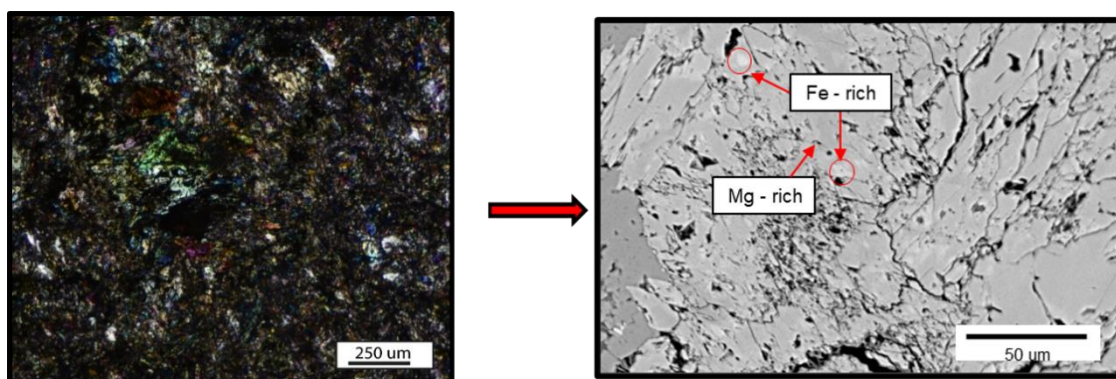
### 5.4.1 Elicena

El depósito Elicena exhibe dos macrotexturas principales de actinolita, estas corresponden actinolitas de grano muy fino como reemplazo de roca caja en asociación con magnetita (Figura 5.22), mientras que la otra textura corresponde a actinolitas de grano medio principalmente en vetillas en asociación con apatito y magnetita. Mediante el análisis microscópico también se observaron estas dos texturas, pero ambas cristalizan en ausencia de magnetita o en asociación con bajas concentraciones (diseminaciones) de magnetita.

A partir del análisis mediante microscopio petrográfico y SEM se definió que la actinolita de grano medio en vetillas (Figura 5.33) está caracterizada por presentar textura de reemplazo, con una variación composicional localizada y amorfa en los bordes, asociada a otros minerales de alteración (Figura 5.33). Por otro lado, la actinolita de grano muy fino anhedral (en masa fundamental) está caracterizada por presentar textura acumulada con zonación en parches (Figura 5.34).

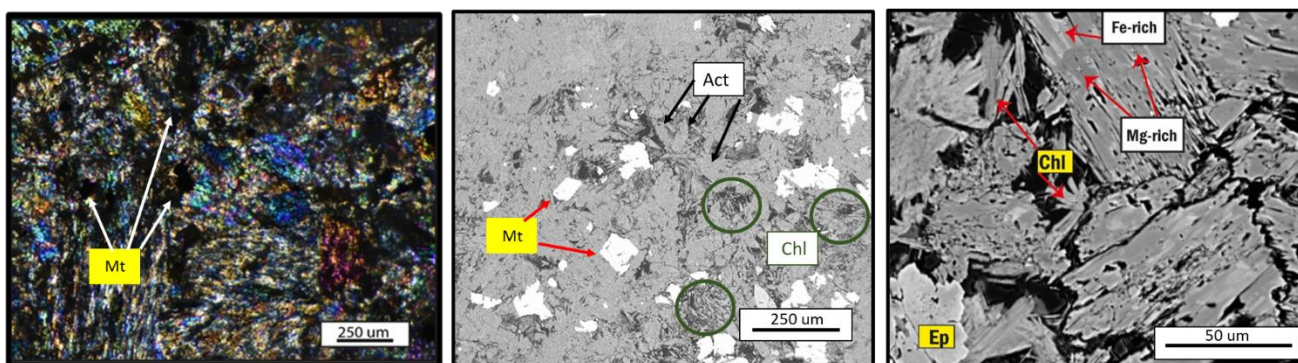


**Figura 5.33:** Actinolita de grano medio en vetillas (depósito Elicena). Izquierda: Actinolita (Act) en asociación con apatito (Ap). Derecha: Actinolita con textura de reemplazo asociada a apatito (Ap) y zonación amorfa (derecha).



**Figura 5.34:** Actinolita anhedral de grano muy fino (depósito Elicena). Izquierda: Actinolita como reemplazo de roca caja. Derecha: Actinolita con textura acumulada y zonación irregular en parches.

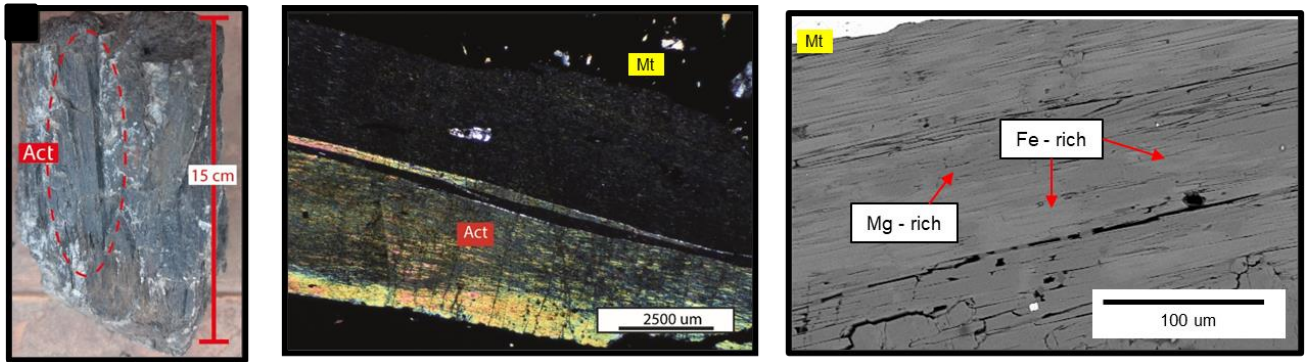
Se identificó un tercer tipo de actinolita asociada a la actinolita de grano muy fino, sin embargo, esta cristaliza en los bordes de los granos de magnetita diseminada (Figura 5.35) y se encuentra asociada a clorita. Esta última actinolita es fibrosa de grano muy fino y presenta textura de intercrecimiento con leve zonación en parches.



**Figura 5.35:** Actinolita fibrosa de grano muy fino (depósito Elicena). Izquierda: Actinolita (Act) en los bordes de las diseminaciones de magnetita (Mt). Centro: Igual a figura de la izquierda, pero imagen BSE. Derecha: Actinolita con textura de intercrecimiento y zonación irregular en parches.

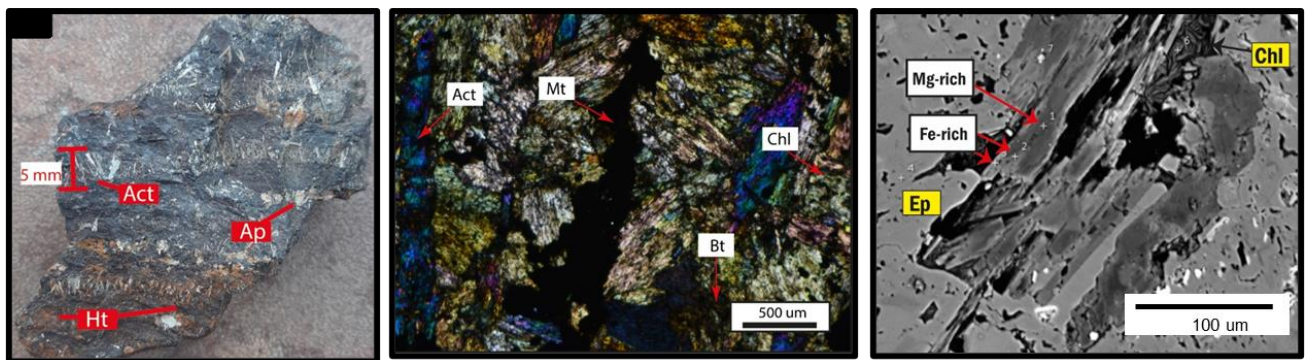
## 5.4.2 Mariposa

Para el depósito Mariposa se reconoce a diferentes escalas una textura principal asociada a la mineralización masiva de magnetita pobre en inclusión, esta textura corresponde a actinolita de grano grueso a muy grueso dispuesta de manera perpendicular a las paredes de la veta (Figura 5.36). Esta actinolita presenta mayormente textura de intercrecimiento y acumulada, pero exhibe leve zonación en parches.



**Figura 5.36:** Actinolita de grano grueso a muy grueso (depósito Mariposa). Izquierda: Actinolita en muestra de mano. Centro: Actinolita (Act) inmersa en magnetita (Mt) masiva. Derecha: Actinolita con textura acumulada (masiva) y leve zonación irregular en parches.

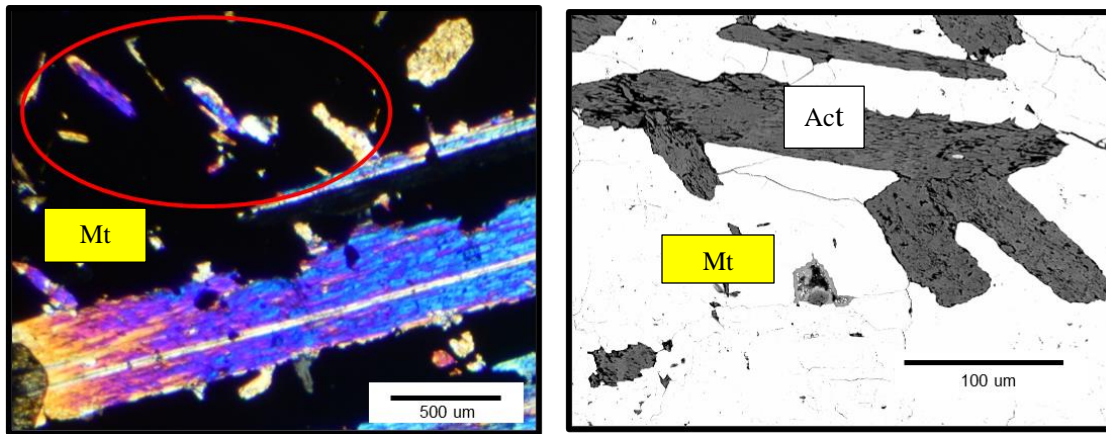
La segunda textura identificada está asociada a las actinolitas de grano fino a medio que se encuentran en asociación con otros minerales de alteración como clorita y/o apatito menor y se encuentran en finas vetillas con magnetita diseminada (Figura 5.37) que cortan la mineralización mayor de magnetita. Esta actinolita se caracteriza por presentar texturas de reemplazo asociadas a zonación normal.



**Figura 5.37:** Actinolita de grano fino a medio en vetillas (depósito Mariposa). Izquierda: Actinolita (Act) en muestra de mano asociada a apatito (Ap). Centro: Actinolita (Act) asociada a magnetita (Mt) y clorita (Chl). Derecha: Actinolita con textura de reemplazo y zonación normal.

También se identificó una tercera textura importante a partir de la observación en microscopio óptico y SEM, esta textura corresponde a la actinolita acicular de grano muy fino que se encuentra principalmente inmersa en magnetita rica en inclusión (Figura 5.38), esta actinolita presenta textura homogénea y ausencia de zonación.

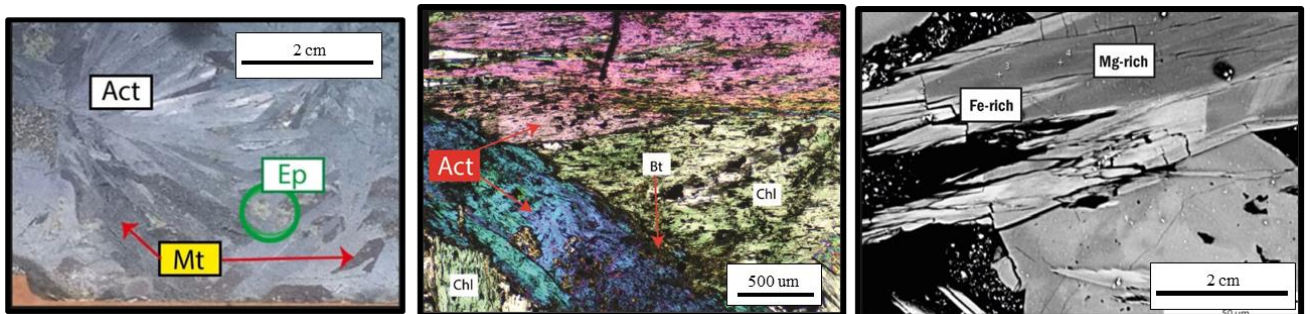




**Figura 5.38:** Actinolita de grano muy fino (depósito Mariposa). Izquierda: Actinolita (Act) inmersa en magnetita (Mt) masiva. Derecha: Actinolita (Act) con textura homogénea y ausencia de zonación, inmersa en magnetita (Mt).

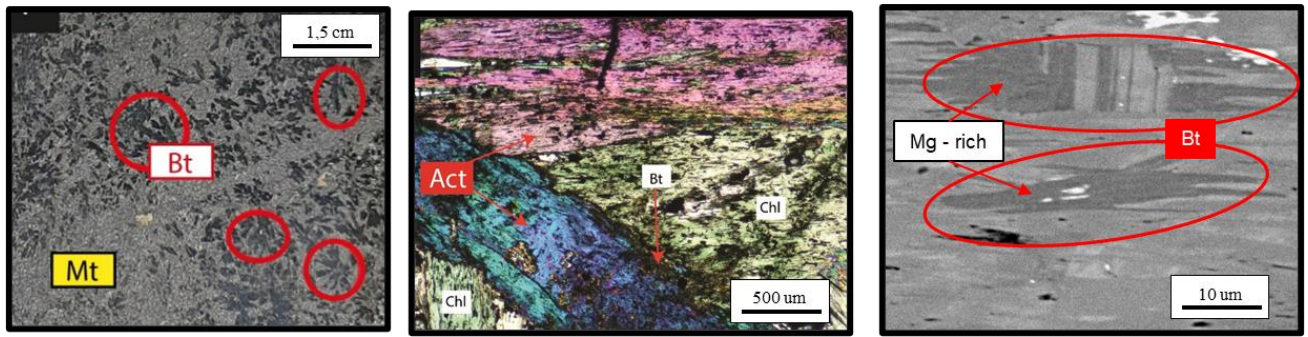
### 5.4.3 Imán

Para el depósito Imán a escala macroscópica (mediante logueo de sondajes) se identificaron diversas texturas las cuales se encuentran o no asociadas a la mineralización de magnetita. De estas texturas se destaca la actinolita de grano grueso acicular radial (Figura 5.39), esta textura también fue observada bajo el microscopio petrográfico y al ser analizada mediante SEM exhibe preferentemente una textura nucleada con zonación normal mostrando una variación composicional notoria entre núcleo y borde.

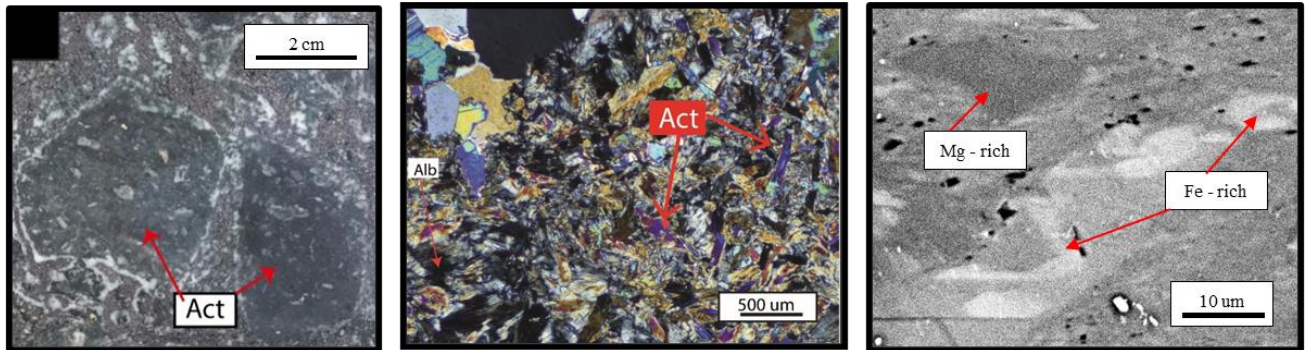


**Figura 5.39:** Actinolita acicular radial (depósito Imán). Izquierda: Actinolita (Act) en asociación con magnetita (Mt) y epidota (Ep). Centro: Actinolita (Act) en asociación con clorita (Chl). Derecha: Actinolita (Act) con textura nucleada y zonación normal.

Otro tipo de actinolita representativa de este depósito es la de grano medio que sufre reemplazo por biotita secundaria (Figura 5.40), esta textura también se observa bajo el microscopio petrográfico, pero mediante SEM solo se muestra un tipo de zonación localizada que muestra un aumento en la concentración de Mg. Un tercer tipo de actinolita corresponde a la de grano fino (Figura 5.41) alterando pervasivamente la roca caja o clastos de brecha, esta actinolita al igual que la actinolita de grano muy fino en el depósito Elicena exhibe una textura acumulada con zonación en parches.

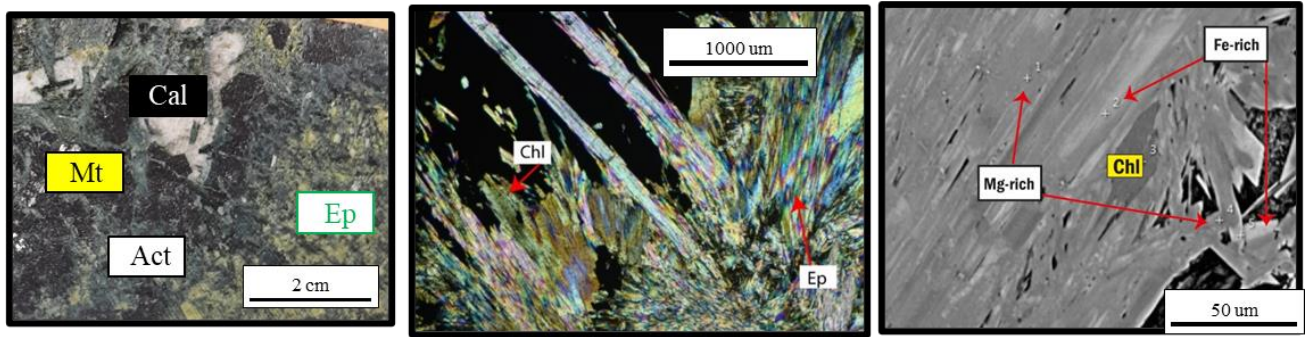


**Figura 5.40:** Actinolita de grano medio reemplazada por biotita (depósito Imán). Izquierda: Actinolita reemplazada (Bt) en asociación con magnetita (Mt). Centro: Actinolita (Act) en asociación con clorita (Chl) y con alteración a biotita (Bt). Derecha: Actinolita (Act) con textura masiva y zonación localizada (Bt).



**Figura 5.41:** Actinolita de grano fino (depósito Imán). Izquierda: Actinolita (Act) en clastos de brecha alterados. Centro: Actinolita (Act) reemplazando pervasivamente la roca caja. Derecha: Actinolita con textura acumulada (masiva) y zonación en parches.

Un cuarto tipo de actinolita fibrosa de grano medio está asociada a otros minerales de alteración (Figura 5.42) y se encuentran alterando la roca. Esta actinolita presenta textura de reemplazo y exhibe regularmente zonación normal e irregular en parches. Por último, se identificaron actinolitas grano fino a medio en vetillas que cortan la roca caja, algunos casos con granos de disposición perpendicular a las paredes de las vetas, sin embargo, no se reconoció esta textura en los cortes transparentes.



**Figura 5.42:** Actinolita fibrosa de grano medio (depósito Imán). Izquierda y centro: Actinolita (Act) de grano medio en asociación con magnetita (Mt), calcita (Cal) y epidota (Ep). Derecha: Actinolita con textura de reemplazo y zonación normal e irregular en parches.

## 6 DISCUSIONES

Se reconocieron múltiples diferencias entre los tres depósitos IOA estudiados, que van desde los resultados macroscópicos obtenidos en las observaciones de campo, como morfologías de los depósitos, mineralización y mineralogía, hasta los resultados más microscópicos, como microtexturas y zonaciones de actinolitas. A continuación, se discute como los distintos estilos de mineralización están asociados a la profundidad de emplazamiento del depósito y su relación con las distintas facies de alteración IOA que dan origen a las múltiples texturas de la actinolita observadas. Por último, se buscará integrar esta información en un modelo genético para cada uno de los subtipos de depósitos IOA estudiados.

### 6.1 Estilo de la mineralización

A continuación, en base a la información bibliográfica recopilada y las principales observaciones realizadas durante el trabajo de campo, se discute acerca de los distintos estilos de mineralización exhibidos por los tres depósitos IOA estudiados y su conexión con la geología del norte de Chile. Además, se espera obtener información adicional sobre la formación de los depósitos a partir de estas morfologías.

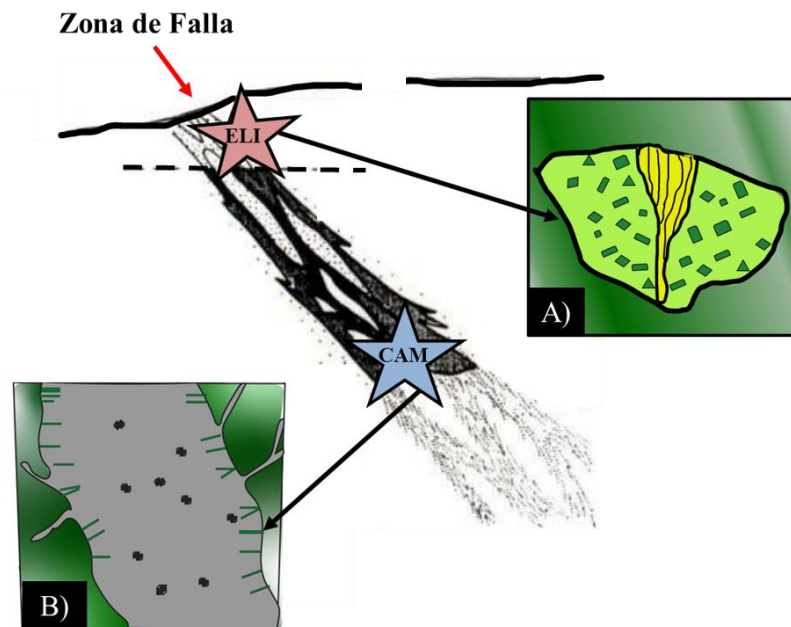
Los tres depósitos estudiados están ubicados en la Cordillera de la Costa del norte de Chile. En particular, los depósitos Elicena y Mariposa se encuentran hospedados en rocas andesíticas mientras que Imán en rocas andesíticas y dioríticas, todas pertenecientes a la Formación Punta del Cobre del Cretácico Inferior. Vivallo y Henríquez (1997) afirman que las rocas volcánicas del Jurásico y del Cretácico Inferior, principalmente aquellas ubicadas en la Cordillera de la Costa, representan un ambiente favorable para la ocurrencia de depósitos de tipo IOA. El ambiente geológico que alberga a las rocas huésped de los depósitos está asociado a regímenes tectónicos extensionales, dentro de un marco de subducción (Mpodozis & Ramos 1990). La principal estructura que domina la zona corresponde al Sistema de Falla de Atacama (Ménard 1995; Espinoza 1990; MaksaeV et al., 2007).

Diversos autores (Frietsch, 1978; Nyström & Henriquez, 1994; Vivallo & Henriquez, 1997) afirman que existen distintos estilos de mineralización de Fe que caracterizan a los depósitos IOA y que consisten principalmente en cuerpos masivos de magnetita, vetas, cuerpos lenticulares, stockworks, mantos y brechas con actinolita, apatito menor (generalmente <1% modal) y trazas de sulfuros como pirita y calcopirita. Los tres depósitos estudiados están ubicados a pocos kilómetros de distancia, entre Elicena y Mariposa solo existe 1 km que los separa, mientras que Imán está a 9 kilómetros de ambos, no obstante, estos poseen estilos de mineralización totalmente distintos. La mineralización del depósito Elicena está concentrada principalmente en un gran cuerpo de brecha magnetita – apatito – actinolita, por otro lado, en el depósito Mariposa la mineralización se encuentra asociada a grandes cuerpos de veta de magnetita-actinolita y en cuanto a Imán, la mineralización corresponde a magnetita masiva de tipo manto, acompañada en menor cantidad de sulfuros. Estudios previos (Allen et al., 1996; Palma et al., 2021) afirman que los estilos de mineralización previamente mencionados son evidencia de emplazamientos

subvolcánicos a profundos, por lo que los tres depósitos IOA estudiados podrían estar asociados a estos eventos.

Sumado a lo anterior, la geometría de estos depósitos nos entrega información sobre el tipo de ambiente geológico que formó a los minerales. Que la mineralización de Elicena corresponda a un gran cuerpo de brecha podría estar asociado a que el depósito se hospeda en una zona que experimentó un evento de deformación frágil, asociado al Sistema de Fallas de Atacama. La deformación frágil se produce principalmente a profundidades someras, donde la baja presión litostática y la interacción de fluido hidrotermal con la roca huésped permite el fracturamiento hidráulico y la posterior brechización (Phillips, 1972). Por otro lado, Mariposa presenta una mineralización en forma de veta, lo que sugiere que el depósito se habría formado en una zona de transición entre la deformación frágil y dúctil. En esta zona, la deformación se distribuye de manera uniforme a través de una masa rocosa sin pérdida de cohesión, por lo que la roca se deforma plásticamente, se recristaliza, pero no se fractura (Carmona, 2000).

Entonces, dada la forma de los depósitos, se puede interpretar que Elicena al ser un cuerpo de brecha se habría formado a una profundidad más somera (Figura 6.1 A), mientras que Mariposa, que es una veta se habría formado a mayor profundidad (Figura 6.1 B). Por otro lado, el depósito Imán corresponde a un depósito tipo manto, este depósito estaría asociado a un reemplazo de un horizonte favorable a la mineralización, donde el mineral de magnetita habría formado por reemplazo pervasivo de roca caja a partir de fluidos ricos en Fe provenientes de fuentes magmáticas-hidrotermales (Sillitoe & Burrows, 2002).



**Figura 6.1:** Esquema simplificado de una zona de falla (sin escala) que muestra cual sería la posible ubicación de los depósitos Elicena (ELI) y Mariposa (CAM) (si ambos depósitos estuvieran genéticamente asociados a una misma falla) en función de la profundidad. A) Elicena: cuerpo de brecha magnetita-apatito-actinolita hospedada en andesita porfídica. B) Mariposa: gran cuerpo de veta de magnetita-actinolita hospedado en andesita porfídica. Modificado de Sibson (1977).

## 6.2 Eventos de mineralización y alteración

Fueron identificados distintos minerales de alteración presentes en los tres depósitos (feldespato-k, biotita, clorita, epidota, etc), así como también, distintos tipos de mineralización (óxidos de hierro y sulfuros). A partir de lo cual, se definieron los posibles eventos de mineralización y alteración que dieron origen a los depósitos y a las diferencias texturales y composiciones en las actinolitas.

### 6.2.1 Elicena

El principal evento de mineralización está caracterizado por un episodio de deformación frágil que generó la brechización y fractura de rocas de caja, dando como resultado el cuerpo de brecha hidrotermal principal (Figura 5.3 B) con matriz de apatito y clastos de la andesita alterada a actinolita de grano muy fino anhedral (Figura 5.34), magnetita y actinolita de grano muy fino fibrosa (Figura 5.35) en los bordes de la mineralización diseminada de magnetita, mientras que hacia zonas más externas del depósito se generaron stockworks de magnetita – apatito – actinolita (Figura 5.3 C). Este evento está asociado a la facies de alteración Ca – Fe, con temperaturas que pueden ir desde los 800° a los 400°C (debido a la presencia de actinolita en lugar de hornblenda) (Corriveau, et al., 2016). En esta facies, una zona de reemplazo con mayor concentración de apatito por sobre actinolita y magnetita como se observa en el depósito Elicena, está dada a profundidades más someras que las zonas de reemplazo con dominio de actinolita y magnetita (Corriveau et al., 2016).

Hacia los bordes del depósito, se reconocieron asociaciones minerales de alteración como albita, epidota ( $\pm$  clorita) y sericita posiblemente formados por un evento de temperatura intermedia a baja (600° a 250 °C) asociado a la facies de alteración Na-Ca-K (Corriveau, et al., 2016). Este evento estaría caracterizado por la cristalización de actinolita de grano medio presente en vetillas que cortan grandes cristales de apatito (Figura 5.33). La presencia de actinolita (300° a 280°C) puede ser indicador de una zona de alteración propilítica interior (Barton & Skinner, 1979). Otro evento posterior está caracterizado por la silicificación de la roca caja y el reemplazo penetrativo de vetillas por parte de turmalina y cuarzo que estaría dado por una facies de alteración de baja temperatura Si – Qz ( $< 250$  °C) (Corriveau, et al., 2016).

### 6.2.2 Mariposa

El principal evento de mineralización de este depósito está asociado los grandes cuerpos de veta magnetita - actinolita. Estos cuerpos están caracterizados por la presencia de actinolita de grano grueso a muy grueso ( $> 3$  cm) dispuesta en los bordes del cuerpo de veta de manera perpendicular y también, por la presencia de magnetita prismática junto a actinolita acicular de grano muy fino ( $< 1$  mm) inmersas en mineralización masiva de magnetita. De acuerdo con la

asociación mineral magnetita – actinolita antes descrita, este evento estaría dado por la fase inicial más profunda de la facies de alteración Ca – Fe de alta temperatura (Mumin et al., 2010).

La fase profunda de la facies de alteración Ca – Fe en su inicio se expresa como vetas que varían en ancho de milímetros a metros, compuestas de actinolita y magnetita ± apatito (Corriveau et al., 2016). La evolución desde la facies de Na – Ca (albita) a la facies Na-Ca-Fe habría permitido la generación de sobrecrecimientos de los cristales de actinolita de Mariposa, provocando tamaños de grano muy grueso (Figura 5.6 A y D), esto habría promovido una transición de cuerpos de veta de unos pocos centímetros de ancho hasta cuerpos sobre los 15 metros de diámetro. Este tipo de mineralización presenta características similares a las observadas del principal evento mineralizador del depósito El Romeral, con cuerpos masivos de magnetita (~ 60% modal) pobre en inclusión y grandes cristales (> 1 cm) aciculares de actinolita intercrecidos con la magnetita, generalmente en los márgenes del depósito (Rojas, 2018).

Un segundo evento de mineralización está caracterizado por magnetita diseminada en vetillas que cortan la mineralización principal de magnetita masiva, por lo que se considera como un segundo pulso de mineralización. Donde las vetillas están compuestas principalmente por actinolitas de grano fino a medio, junto con clorita y apatito (Figura 5.37), característica de una mineralización rica en Ca - Mg, de temperatura moderada (Montreuil et al., 2016).

Un tercer evento está caracterizado por la gran zona de alteración de actinolita a talco, que posee diseminaciones de hematita especular y trazas de feldespato-K (Figura 5.5 B), este evento estaría dado por una facies de alteración K – Fe de baja temperatura (Hitzman et al. 1992; Skirrow, 2010). La transición más común de una zona alteración K - Fe de alta a baja temperatura es la alteración de magnetita a través del reemplazo por hematita, que también es observada en este depósito (Figura 5.6 B).

### **6.2.3 Imán**

Este depósito se distingue de los demás por su alta concentración de biotita, variada mineralogía de alteración y por las concentraciones importantes de pirita y calcopirita. Además, la magnetita, actinolita y apatito están caracterizados por reemplazar tanto secuencias volcano-sedimentarias, como también, clastos o cementos de brechas andesíticas. El primer evento de alteración está caracterizado por la mineralización de magnetita en conjunto con albita (Figura 5.9 A), asociado a una facie de alteración Na-Ca de alta temperatura (> 500°) (Corriveau et al., 2016).

El segundo evento de alteración y principal evento de mineralización de magnetita está asociado a la cristalización de actinolita de grano grueso y habito acicular radial intercrecida con magnetita masiva (Figura 5.39). En este evento se genera un reemplazo pervasivo de la roca caja caracterizado por la presencia de actinolita de grano muy fino. Localmente, en los bordes de la mineralización la magnetita se observa una baja concentración de apatito y trazas de titanita. Como parte final del evento, caracterizada por una transición a una zona rica en K, abundante

biotita secundaria reemplaza a actinolita de grano medio, la cual se distribuye en la roca caja de manera pervasiva, intercrecida o no con magnetita. Este evento es característico de facies de alteración Ca – Fe de alta temperatura (Hayward & Corriveau, 2014; Corriveau et al., 2016).

En la facies de alteración Ca – Fe de alta temperatura, posterior a la fase inicial profunda que caracteriza a Mariposa, están las zonas de reemplazo con dominio de actinolita caracterizadas por el reemplazo de vetas y brechas, tal como lo exhiben algunas texturas de actinolita en Imán (Figura 5.24 A, B y C). Por otro lado, a menor profundidad están las zonas de reemplazo con dominio de magnetita que se encuentra reemplazando minerales de roca caja, vetas y rellenos de brechas, junto a actinolita y apatito, texturas que también fueron observadas en sondajes pertenecientes al depósito Imán (Figura 5.24 C, D, E y F).

Un tercer evento está marcado por la presencia de feldespato - K, biotita y cuarzo secundario (con menor intensidad). En este evento ocurre una mineralización importante de sulfuros (pirita y calcopirita) que pueden presentarse diseminados o en vetillas en asociación con los minerales previamente mencionados (Figura 5.10). Este evento se encuentra dominado por una facies alteración K-Fe de alta temperatura (450° a 350°C), facies característica de un sistema IOCG de alta temperatura (Corriveau et al., 2016). También, se observa anhidrita junto a escapolita y turmalina (en menor concentración), en vetillas y brechas sobreimpuestas a las asociaciones anteriores (Figura 5.9), mineralogía que sugiere una facies de alteración K – Fe de baja temperatura (350° a 250°C) (Mumin et al., 2010; Corriveau et al., 2016).

Un cuarto evento tardío está caracterizado por la presencia de actinolita de grano medio fibrosa que está siendo alterada a clorita y epidota (Figura 5.42). También, es posible observar en menor concentración calcita, sericita y algunas arcillas, que indicarían una alteración hidrotermal de baja temperatura posiblemente propilítica.



## **6.3 Ocurrencia de actinolita**

De acuerdo con el estilo de mineralización que caracteriza a cada depósito, se espera que las texturas de actinolitas observadas estén asociadas a estos estilos y, por lo tanto, se hayan formado por distintos eventos de alteración y mineralización. Además, en estudios anteriores se ha interpretado que la variación en la composición de la actinolita está principalmente relacionada a los cambios de temperatura (Lledo & Jenkins, 2017; Del Real et al., 2021). A continuación, se discute acerca de las texturas de las actinolitas y de los distintos factores que podrían originarlas.

### **6.3.1 Elicena**

Para el depósito Elicena se identificaron dos macrotexturas principales asociadas a la mineralización masiva de magnetita (actinolita en clastos de brecha y stockworks), sin embargo, mediante el estudio microscópico no fue posible analizar la textura de actinolita de grano medio asociada a stockworks de magnetita-apatito-actinolita, ya que no se dispuso de cortes correspondientes a esa mineralización. Por lo que solo identificaron texturas de actinolitas de grano muy fino asociadas al reemplazo pervasivo de roca caja.

La actinolita de grano medio en vetillas posee una textura de reemplazo con una zonación localizada en los bordes. Se puede interpretar que esta textura y zonación estarían dadas por condiciones de reequilibrio asociadas a procesos de alteración y/o reequilibrio hidrotermal de baja temperatura (Bookstrom, 1975, 1977; Guilbert & Park, 1986). Además, esta actinolita fue previamente asociada a un evento de alteración Na-Ca-K de temperatura intermedia a baja (300° a 280°C), lo que respalda el hecho de que fue formada en un ambiente hidrotermal de menor temperatura.

Por otro lado, está la actinolita de grano muy fino en masa fundamental, que al estar asociada al reemplazo pervasivo de la roca caja genera una cristalización masiva de actinolita de grano muy fino que se observa como textura acumulada bajo el SEM, mientras que la zonación en parches indicaría cambios en la composición y/o condiciones externas durante la cristalización, atribuidas a fluctuaciones de temperatura en el sistema (Del Real et al., 2021).

### **6.3.2 Mariposa**

El depósito Mariposa está caracterizado por la presencia de actinolitas de grano muy grueso y de hábito fibroso con orientación perpendicular a la veta. Estudios anteriores (Giese et al., 2017; Eichhubl et al., 2009) confirman que la evolución del flujo puede ser rastreada a partir de la mineralización a lo largo de las fracturas, entonces, la orientación perpendicular a la veta que presentan estas actinolitas podría estar asociada a una veta de extensión, donde los cristales de actinolita indicarían la dirección de dilatación de las vetas (Herrera et al., 2005). Durante el

periodo de mineralización de los depósitos IOA (~130 Ma) la cinemática del Sistema de Falla de Atacama era del tipo transtensional sinestral (Arabasz, 1971), lo que generó fallas de transferencia NNE por las cuales potencialmente se habría formado la mineralización de magnetita-apatito (Bonson et al., 1996, Rojas et al. 2018b).

Además de las evidencias estructurales previamente mencionadas, se determinó que la actinolita de grano grueso se encuentra intercrecida con magnetita pobre en inclusión que se puede interpretar como de origen hidrotermal, basado en estudios previos texturales en magnetita (Rojas, 2018), lo que sugiere una cristalización simultánea para la magnetita y actinolita en un ambiente hidrotermal. Esta actinolita también se caracteriza por presentar una textura acumulada y de intercrecimiento, con una leve zonación irregular en parches que, sumado a los eventos de mineralización y alteración previamente descritos, se podría interpretar que esta textura fue formada partir de un evento hidrotermal de alta temperatura, asociado a la facies Ca-Fe de alta temperatura (Corriveau et al., 2016), donde el ambiente de formación no presenta grandes variaciones composicionales.

La otra textura de actinolita que crece en paragénesis a la mineralización de magnetita corresponde a la de grano medio presente en vetillas que cortan la mineralización principal de magnetita y se encuentra asociada principalmente a minerales como clorita y/o apatito. Esta actinolita presenta textura de reemplazo marcada en los bordes, donde los núcleos ricos en Mg indicarían temperaturas tempranas más altas y los crecimientos excesivos en los bordes ricos en Fe temperaturas tardías más bajas (Lledo & Jenkins, 2008). Un tercer tipo de actinolita de grano muy fino habría cristalizado como inclusión dentro de magnetita rica en inclusiones, esta actinolita posee textura homogénea con ausencia de zonación, lo que sugiere que hubo un solo evento de formación para este tipo de actinolita. Debido a que las actinolitas observadas en el depósito presentan en su mayoría leve zonación y en ocasiones ausencia de esta, se podría interpretar que cristalizaron a partir de uno o dos eventos de alteración hidrotermal.

### **6.3.3 Imán**

Para el depósito Imán fueron identificadas múltiples texturas de actinolita, de las cuales se destacan dos texturas principales asociadas a la mineralización masiva de actinolita (con leyes de Fe > 22 %). La primera corresponde a actinolita de grano grueso acicular radial, que exhibe preferentemente una textura nucleada con zonación normal mostrando una variación composicional notoria entre núcleo (rico en Mg) y borde (rico en Fe). Esto podría indicar un cambio abrupto en la composición de los fluidos, probablemente asociada a variaciones de temperatura, donde un fluido inicial de alta temperatura sugerido por la presencia de mayores concentraciones de Mg en el núcleo, interactuó con un segundo fluido de menor temperatura sugerido por la presencia de una mayor concentración de Fe en el borde (Lledo & Jenkins, 2017; Del Real et al., 2021).

Otro tipo de actinolita asociada a la mineralización masiva es la actinolita de grano medio que ha sido reemplazada por biotita secundaria, este tipo de textura muestra una zonación irregular

localizada con aumento en la concentración de Mg en la zona de reemplazo posiblemente asociada a la presencia de biotita que cristalizó en un evento hidrotermal posterior. Por otro lado, las actinolitas de grano fino formadas por reemplazo de la roca caja, al igual que en el depósito Elicena, exhiben una textura acumulada (o masiva) con zonación en parches por lo que se podría interpretar que esta textura es característica para actinolitas de grano muy fino presentes en masa fundamental y en clastos de brechas, que cristalizaron por reemplazo pervasivo de minerales máficos de la roca caja.

Imán posee una mayor cantidad de granos con textura de reemplazo (Figura 5.15 B), los cuales exhiben regularmente zonación normal (Figura 5.19 B) e irregular en parches (Figura 5.19 C). Esta textura de reemplazo domina en actinolitas fibrosas de grano medio que cristalizan junto a otros minerales de alteración, cuya asociación es característica de una alteración hidrotermal tardía de baja temperatura. También, se observaron granos de actinolita con un tipo de zonación exclusiva del depósito Imán, que corresponde a la zonación oscilatoria (Figura 5.32 A), donde existe una alternancia en la composición que podría interpretarse como una cristalización en pulsos con diferentes condiciones de temperatura (Del Real, 2021).

Debido a la variedad de texturas observadas y que las zonaciones evidenciarían constantes cambios en la temperatura del sistema, se podría interpretar que la mineralización de Imán fue formada en distintas etapas. Este hecho es respaldado por los distintos eventos de alteración hidrotermal que caracterizan al depósito y que fueron descritos previamente.

## 6.4 Síntesis e interpretaciones

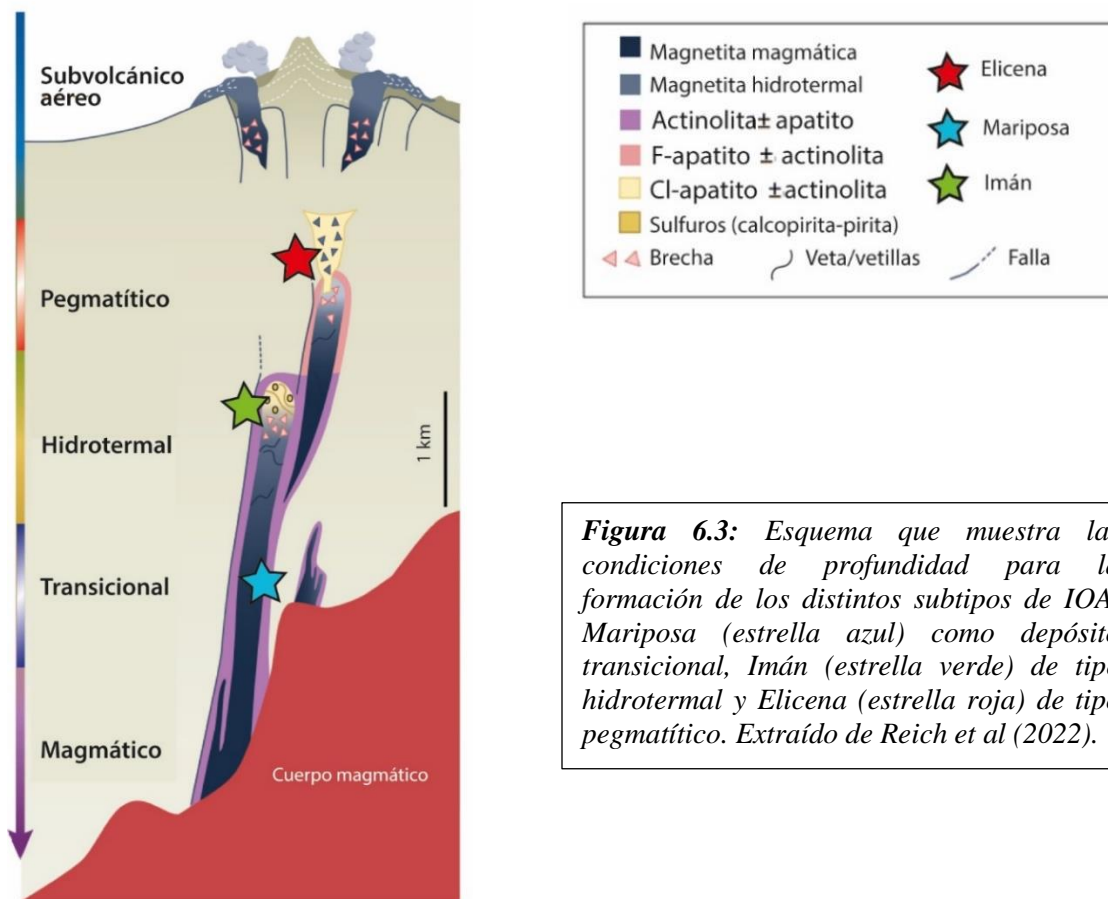
A partir de las discusiones realizadas sobre los estilos de mineralización, eventos de mineralización/alteración y de la ocurrencia de actinolita. Es posible clasificar a cada depósito estudiado según el modelo para la formación de los distintos subtipos de IOA definidos en base a observaciones y estudios de la Franja Ferrífera Chilena y El Laco (Palma et al., 2020). Los cuales reflejan la formación de los depósitos a diferentes profundidades de la corteza (Figura 6.4). A continuación, se describen las principales características que permiten la clasificación de los depósitos, entre las cuales se destacan: profundidad de formación y evidencias texturales de actinolitas.

Se determinó que el principal evento mineralizador para los tres depósitos estudiados estaría asociado a la facies de alteración Ca – Fe de alta temperatura. Sin embargo, cada depósito mostró texturas de actinolita diferentes asociadas a esta facies, que estarían dadas por el estilo de la mineralización y tendría relación directa con la profundidad de formación de cada depósito.

Como fue previamente discutido, el estilo de mineralización brechiforme que caracteriza al depósito Elicena evidencia un ambiente de depositación frágil, además la mineralización principal del depósito está dada por la facies de alteración Ca-Fe de alta temperatura asociada a una zona de reemplazo con dominio de apatito, lo que sugiere una profundidad de formación somera para este depósito, que permitiría clasificar Elicena como un depósito IOA pegmatítico, rico en apatito (Figura 6.3). Además, la presencia de estructuras de brechas con alto porcentaje de apatito (que puede alcanzar grandes dimensiones) en Elicena, indicaría condiciones de alta volatilidad en las partes superficiales del depósito (Treloar & Colley, 1996; Palma et al., 2019), características que también fueron observadas en los depósitos Mariela, Carmen y Fresia, también definidos como IOA pegmatíticos (Palma et al., 2020). Este subtipo de IOA se formaría debido a una descompresión causada por fracturamiento o inyección de fluidos magmático-hidrotermales de alta temperatura y salinidad, que habría inducido la precipitación de minerales dependientes de la solubilidad como magnetita y apatito (Palma et al., 2020).

El estilo de mineralización vetiforme del depósito Mariposa, evidencia un ambiente de formación frágil-dúctil, cuyo principal evento de mineralización estaría caracterizado por la facies de alteración Ca-Fe de alta temperatura en fase profunda, lo que sugiere que este depósito se habría formado a mayores profundidades que Elicena e Imán. Además, las actinolitas asociadas a la mineralización principal de Mariposa están caracterizadas por presentar leve zonación o en algunos casos estar ausentes de esta, lo que sugiere condiciones de formación asociada a un solo evento de alteración hidrotermal. Lo anterior, sumado a la profundidad de formación sugerida para Mariposa, permite clasificar a este depósito como IOA transicional, con características magmático-hidrotermales (Figura 6.3), cuyas similitudes encontradas con el estilo de mineralización y alteración presente en el depósito El Romeral definido por Rojas (2018) respaldarían esta clasificación.

La mineralización para el depósito Imán fue previamente definida como de tipo manto, estilo que ha sido asociado al reemplazo metasomático de la roca huésped por fluidos ricos en Fe provenientes de fuentes magmáticas-hidrotermales (Sillitoe & Burrows, 2002). Según el principal evento de mineralización asociado a la facies Ca-Fe que caracteriza al depósito Imán, este depósito se habría formado a mayor profundidad que el depósito Elicena y menor que Mariposa. Las múltiples texturas de actinolitas exhibidas (hábito, tamaño y zonación) dadas por distintos eventos de alteración hidrotermal, evidencian que este depósito es el que presenta mayor actividad hidrotermal de los tres estudiados. Lo anterior, sumado a que Imán posee una concentración importante de sulfuros y minerales de alteración asociados a la facies de alteración K - Fe característica de un sistema IOCG de alta temperatura, permitiría clasificar a este depósito como un IOA hidrotermal (Figura 6.3), de profundidad intermedia, que estaría transicionando a IOCG.



**Figura 6.3:** Esquema que muestra las condiciones de profundidad para la formación de los distintos subtipos de IOA. Mariposa (estrella azul) como depósito transicional, Imán (estrella verde) de tipo hidrotermal y Elicena (estrella roja) de tipo pegmatítico. Extraído de Reich et al (2022).

## 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir del estudio enfocado en las diferencias que presenta el mineral de alteración actinolita, se lograron identificar texturas exclusivas para cada depósito y se pudo caracterizar a Elicena, Mariposa e Imán según su estilo de mineralización, por lo tanto, se cumplió con el objetivo general de este estudio. Además, se concluye que el estudio de las zonaciones presentes en las diferentes texturas de actinolita y su asociación con la mineralización de magnetita permitió obtener información acerca de los distintos eventos de alteración y mineralización que las habrían formado. A continuación, se presenta un resumen con la caracterización de los tres depósitos IOA estudiados.

El depósito Elicena se encuentra emplazado en las andesitas porfídicas albitizadas y epidotizadas, pertenecientes a la Formación Punta del Cobre. La mineralización principal corresponde a un cuerpo de brecha de magnetita-apatito-actinolita con orientación NNW y vetas menores de orientación preferente N50°W/75°N. Las observaciones realizadas en terreno, junto con los estudios petrográficos otorgan a este depósito una mineralogía principal de abundante apatito masivo y de actinolita de grano fino como reemplazo pervasivo de la roca caja en paragénesis con magnetita. Como mineralogía secundaria o de alteración se presenta titanita, turmalina, cuarzo, calcita y sulfuros menores (pirita y calcopirita). Dado el estilo de mineralización brechiforme que caracteriza a Elicena se sugiere que el depósito fue formado a profundidades someras esto junto con las características previamente descritas permitirían la clasificación de este depósito como IOA pegmatítico, rico en apatito.

Al igual que el depósito Elicena, el depósito Mariposa también se encuentra emplazado en andesitas porfídicas pertenecientes a la Formación Punta del Cobre. La mineralización principal corresponde a vetas de orientación N40°W/45°N. Con respecto a la mineralogía principal que caracteriza al depósito, corresponde a actinolita de grano muy grueso asociada a la mineralización masiva de magnetita, ubicada con disposición perpendicular en los bordes de las vetas y como mineralogía secundaria o de alteración se destaca la presencia de apatito, cuarzo, calcita, talco y hematita. Para las actinolitas del depósito Mariposa se identificaron texturas que evidencian un fuerte control estructural asociado al Sistema de Falla de Atacama. También, se determinó que el depósito se habría formado a una profundidad mayor que Elicena e Imán, lo que permitiría clasificar a Mariposa como un depósito IOA transicional. Esta clasificación es consistente con las similitudes observadas con el depósito El Romeral y con el ambiente de depositación dúctil – frágil que induce la formación de vetas.

El depósito Imán se encuentra emplazado bajo las Gravas del Río Huasco, en rocas andesíticas de la formación Punta del Cobre y dioríticas del Complejo Plutónico La Higuera (ca. 122 Ma; Valenzuela, 2002). La mineralización principal es masiva, tipo manto entre las andesitas y dioritas. La mineralogía que caracteriza al depósito está dada por actinolita acicular radial intercrecida con la magnetita, así como también por la presencia de mineralización masiva de pirita y en menor cantidad calcopirita. Como mineralogía secundaria o de alteración se tiene biotita secundaria, epidota, clorita, albita, escapolita, anhidrita, calcita, titanita y turmalina. Las diferentes texturas de actinolita identificadas se asocian a múltiples eventos de alteración

hidrotermal, que junto con la variada mineralogía de alteración presente sugieren para Imán una clasificación como depósito IOA hidrotermal. Además, las alteraciones K – Fe identificadas y la presencia de mineralización masiva de sulfuros, permitieron ubicar a Imán en una zona de transición entre depósito IOA y depósito IOCG pobre en Cu. El depósito Imán posee un control litológico que estaría dado por el emplazamiento del Plutón La Higuera bajo la Formación Punta del Cobre, lo que provocó un aumento en la temperatura del sistema y el reemplazo metasomático posterior. Esto es consistente con la mineralización tipo manto o estratiforme, asociada al reemplazo metasomático de roca caja por acción de fluidos hidrotermales de alta temperatura.

Los resultados exhibidos en este trabajo podrían ser mejorados con un análisis cuantitativo de la composición química de las actinolitas a partir de herramientas de medición con alta resolución como Microsonda Electrónica (EPMA), LA-ICP-MS o fluorescencia de rayos X (XRF), cuyos límites de detección permitan identificar variaciones composicionales con bajo rango de error. También, se podría complementar con estudios texturales y composicionales en magnetita y/o apatito para comprobar si muestran resultados similares a otros estudios de depósitos IOA basados en estos minerales. Esto nos permitirá definir algunos principios para la exploración de depósitos IOA a partir del análisis textural de actinolita.

Como recomendación para futuras campañas de terreno en la zona, se sugiere para Mariposa la realización de perforaciones, para poder estimar leyes de Fe contenidas y determinar una potencial explotación, debido a que en la actualidad solo se han realizado extracciones superficiales de la magnetita. Debido a la ausencia de investigaciones hechas en torno a los depósitos Elicena, Mariposa e Imán, este trabajo constituye una de las principales fuentes de información para el estudio de estos tres depósitos IOA. Por lo que se espera que sirva como base para la exploración futura de depósitos IOA andinos.

## 8 BIBLIOGRAFÍA

1. **Aguirre-Urreta, M. B., Mourgues, F. A., Rawson, P. F., Bulot, L. G., & Jaillard, E.** (2007). The Lower Cretaceous Chañarcillo and Neuquén Andean basins: ammonoid biostratigraphy and correlations. *Geological Journal*, 42(2), 143-173.
2. **Afshooni, S. Z., Mirnejad, H., Esmaily, D., & Haroni, H. A.** (2013). Mineral chemistry of hydrothermal biotite from the Kahang porphyry copper deposit (NE Isfahan), Central Province of Iran. *Ore Geology Reviews*, 54, 214-232.
3. **Allen, R. L., Weihed, P., & Svenson, S. A.** (1996). Setting of Zn-Cu-Au-Ag massive sulfide deposits in the evolution and facies architecture of a 1.9 Ga marine volcanic arc, Skellefte District, Sweden. *Economic geology*, 91(6), 1022-1053.
4. **Arabasz, Walter Joseph, Jr.,** (1971). *Geological and Geophysical Studies of the Atacama Fault Zone in Northern Chile*. Dissertation (Ph.D.), California Institute of Technology. doi:10.7907/1QCV-NG11
5. **Arévalo, C., Creixell, C.** (2009). The Atacama Fault System and its role on the migration and deposition of Iron Oxide Copper Gold and Magnetite-Apatite ores: an evaluation from the Los Choros and Huasco valleys. 21th Colloquium on Latin American Geosciences. Alemania, p.23-25
6. **Arévalo, C., Mourgues, O., Chávez, R.** (2009). Geología del área Vallenar-Domeyko. Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica No. 120, mapa escala 1:100.000. p. 7-20. 5.
7. **Arévalo, C., Welkner, D.** (2008). Geología del Área Carrizal Bajo-Chacritas Región de Atacama. Carta Geológica de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería. Escala: 1:100.000. Serie Geológica Básica, p.111. 4.
8. **Arévalo, C.; Grocott, J.; Welkner, D.** (2003). The Atacama Fault System in the Huasco Province, Southern Atacama Desert, Chile. In Congreso Geológico Chileno, No. 10, CDROM. Concepción. 3.
9. **Audétat, A., & Keppler, H.** (2005). Solubility of rutile in subduction zone fluids, as determined by experiments in the hydrothermal diamond anvil cell. *Earth and Planetary Science Letters*, 232(3-4), 393-402.
10. **Barra, F., Reich, M., Selby, D., Rojas, P., Simon, A., Salazar, E., Palma, G.** (2017). Unraveling the origin of the Andean IOCG clan: A Re-Os isotope approach: *Ore Geology Reviews*, v.81, p.62-78
11. **Barton, M. D., & Johnson, D. A.** (1996). Evaporitic-source model for igneous-related Fe oxide-(REE-Cu-Au-U) mineralization. *Geology*, 24(3), 259-262.



12. **Barton, M. D.** (2013). Iron oxide (-Cu-Au-REE-P-Ag-U-Co) systems. In *Geochemistry of mineral deposits* (pp. 515-541). Elsevier Inc.
13. **Barton, P. B., & Skinner, B. J.** (1979). Sulfide mineral stabilities. in “*Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*”, HL Barnes, ed.
14. **Beeson, H. W., & McCoy, S. W.** (2022). Disequilibrium river networks dissecting the western slope of the Sierra Nevada, California, USA, record significant late Cenozoic tilting and associated surface uplift. *Bulletin*, 134(11-12), 2809-2853.
15. **Berger, B. R., Ayuso, R. A., Wynn, J. C., & Seal, R. R.** (2008). Preliminary model of porphyry copper deposits. US geological survey open-file report, 1321, 55.
16. **Biese-Nickel, W. A.** (1957). En B. Hofstetter, H. Fuenzalida, & G. Cecioni, *Lexique Stratigraphique International* (Vol. 5, pág. 444). Paris: Centre de Recherche Sciences.
17. **Bilenker, L. D., Simon, A. C., Reich, M., Lundstrom, C. C., Gajos, N., Bindeman, I., Barra, F., & Munizaga, R.** (2016). Fe–O stable isotope pairs elucidate a high-temperature origin of Chilean iron oxide-apatite deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 177, 94–104.
18. **Bilenker, L. D., Simon, A. C., Reich, M., Lundstrom, C. C., Gajos, N., Bindeman, I., ... & Munizaga, R.** (2016). Fe–O stable isotope pairs elucidate a high-temperature origin of Chilean iron oxide-apatite deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 177, 94-104.
19. **Bonson, C., Grocott, J., & Rankin, A.** (1996). A structural model for the development of Fe-Cu mineralization within the Atacama Fault System (25 00’S-27 15’S), Northern Chile. *Third ISAG*, St. Malo, France, 671-674.
20. **Bookstrom, A. A.** (1975). Magnetite deposits of El Romeral, Chile: Physical geology, sequence of events, and processes of formation: Unpublished Ph. D (Doctoral dissertation, thesis, Stanford, CA, Stanford University).
21. **Bookstrom, A. A.** (1977). The magnetite deposits of El Romeral, Chile. *Economic Geology*, 72(6), 1101-1130.
22. **Broman, C., Nyström, J. O., Henríquez, F., & Elfman, M.** (1999). Fluid inclusions in magnetite-apatite ore from a cooling magmatic system at El Laco, Chile. *Gff*, 121(3), 253-267.
23. **Brown, M., Díaz, F., Grocott, J.** (1993). Displacement history and tectonic significance of the El Salado segment of the Atacama Fault System, Northern Chile. *GSA Bulletin*, v.105, p.1165–1174.
24. **Carmona, O. O.** (2000). ROCAS EN ZONAS DE FALLA. *Dyna*, 129, 72.
25. **Cembrano, J., González, G., Arancibia, G., Ahumada, I., Olivares, V., & Herrera, V.** (2005). Fault zone development and strain partitioning in an extensional strike-slip duplex: A case study from the Mesozoic Atacama fault system, Northern Chile. *Tectonophysics*, 400(1-4), 105-125.

26. **Charrier R., Pinto L., Rodríguez M. P.**, (2007). Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. In: Moreno T, Gibbons W (eds) *The geology of Chile*. Geological Society, London, pp 21–114.
27. **Chiaradia, M., Banks, D., Cliff, R., Marschik, R., & De Haller, A.** (2006). Origin of fluids in iron oxide–copper–gold deposits: constraints from  $\delta^{37}\text{Cl}$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  and Cl/Br. *Mineralium Deposita*, 41(6), 565-573.
28. **Childress, T. M., Simon, A. C., Day, W. C., Lundstrom, C. C., & Bindeman, I. N.** (2016). Iron and oxygen isotope signatures of the Pea Ridge and Pilot Knob magnetite-apatite deposits, southeast Missouri, USA. *Economic Geology*, 111(8), 2033-2044.
29. **COCHILCO.** (2016). Franjas metalogénicas de los Andes Centrales: blancos clave para la exploración minera (pp. 9–11).
30. **Cooke, D. R., Hollings, P., Wilkinson, J. J., & Tosdal, R. M.** (2014). Geochemistry of porphyry deposits.
31. **Cooke, D. R., Wilkinson, J. J., Baker, M., Agnew, P., Phillips, J., Chang, Z., ... & Martin, H.** (2020). Using mineral chemistry to aid exploration: A case study from the Resolution porphyry Cu-Mo deposit, Arizona. *Economic Geology*, 115(4), 813-840.
32. **Corbett, G. J., & Leach, T. M.** (1998). Southwest Pacific Rim gold-copper systems: structure, alteration, and mineralization (Vol. 6, p. 240). Littleton, Colorado: Society of Economic Geologists.
33. **Coria B., Davidson C., Mpodozis C., Ramos V.**, (1982). Tectonic and magmatic evolution of the Andes of northern Argentina and Chile. *Earth Sci Rev* 18:303-332.
34. **Corriveau, L., Montreuil, J. F., & Potter, E. G.** (2016). Alteration facies linkages among iron oxide copper-gold, iron oxide-apatite, and affiliated deposits in the Great Bear magmatic zone, Northwest Territories, Canada. *Economic Geology*, 111(8), 2045-2072.
35. **Creixell, C., Fuentes, J., Bierma, H., & Salazar, E.** (2015, October). Tectónica regional y metalogénesis asociada al emplazamiento de la franja de pórfidos cupríferos cretácicos del norte de Chile (28°–30° S). In *Sociedad Geológica de Chile, Congreso Geológico Chileno, XIV, La Serena, Chile*.
36. **Dallmeyer, D., Brown, M., Grocott, J., Taylor, G. and Treloar, P. J.** (1996). Mesozoic magmatic and tectonic events within the Andean Plate boundary zone, 26°–27°30pS, North Chile: constraints from  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  mineral ages. *The Journal of Geology*, v. 104, p. 19–40
37. **Del Real, I., Reich, M., Simon, A. C., Deditius, A., Barra, F., Rodríguez-Mustafa, M. A., ... & Roberts, M. P.** (2021). Formation of giant iron oxide-copper-gold deposits by superimposed, episodic hydrothermal pulses. *Communications Earth & Environment*, 2(1), 1-9.

38. **Dupuis, C., & Beaudoin, G.** (2011). Discriminant diagrams for iron oxide trace element fingerprinting of mineral deposit types. *Mineralium Deposita*, 46(4), 319-335.
39. **Eichhubl, P., Davatz, N. C., & Becker, S. P.** (2009). Structural and diagenetic control of fluid migration and cementation along the Moab fault, Utah. *AAPG bulletin*, 93(5), 653-681.
40. **Escolme, A.**, (2016), *Geology, geochemistry and geometallurgy of the Productora Cu-Au Mo deposit, Chile: Ph.D. thesis*, Hobart, Tasmania, University of Tasma
41. **Espinoza, S.** (1990). The Atacama-Coquimbo ferriferous belt, northern Chile. In *Stratabound ore deposits in the Andes* (pp. 353-364). Springer, Berlin, Heidelberg.
42. **Evans, B. W., & Yang, H.** (1998). Fe-Mg order-disorder in tremolite–actinolite–ferro-actinolite at ambient and high temperature. *American Mineralogist*, 83(5-6), 458-475.
43. **Frietsch, R.** (1978). On the magmatic origin of iron ores of the Kiruna type. *Economic geology*, 73(4), 478-485.
44. **Foose, M. P., & McLelland, J. M.** (1995). Proterozoic low-Ti iron-oxide deposits in New York and New Jersey: Relation to Fe-oxide (Cu–U–Au–rare earth element) deposits and tectonic implications. *Geology*, 23(7), 665-668.
45. **Fox, K.A.**, 2000, *Fe-Oxide (Cu-U-Au-REE) Mineralisation and Alteration at the Productora Prospect*, Colorado School of Mines, 114
46. **García, F.** (1967). *Geología del Norte Grande de Chile*, Symposium sobre el geosinclinal andino. Sociedad Geológica Chile, Santiago, 138p.
47. **Geijer, P.** (1931) *The iron ores of the Kiruna type*. Sveriges Geologiska Undersökning C367, 39p.
48. **Giese, J., Schreurs, G., Berger, A., & Herwegh, M.** (2017). Kinematics and significance of a poly-deformed crustal-scale shear zone in central to south-eastern Madagascar: the Itremo–Ikalamavony thrust. *International journal of earth sciences*, 106, 2091-2108.
49. **Godoy, E. & Lara, L.**, (1998). *Mapa Geológico de las Hojas Chañaral y Diego de Almagro, Región de Atacama*, Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas Geológicos, Nos. 5 – 6, 1 mapa escala 1: 100.000. Santiago.
50. **Grocott, J., & Taylor, G. K.** (2002). Magmatic arc fault systems, deformation partitioning and emplacement of granitic complexes in the Coastal Cordillera, north Chilean Andes (25 30' S to 27 00' S). *Journal of the Geological Society*, 159(4), 425-443.
51. **Groves, D. I., Bierlein, F. P., Meinert, L. D., & Hitzman, M. W.** (2010). Iron oxide copper-gold (IOCG) deposits through Earth history: Implications for origin, lithospheric setting, and distinction from other epigenetic iron oxide deposits. *Economic Geology*, 105(3), 641-654.

- 52. Gualda, G. A., & Ghiorso, M. S.** (2007). Magnetite scavenging and the buoyancy of bubbles in magmas. Part 2: Energetics of crystal-bubble attachment in magmas. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 154(4), 479-490.
- 53. Guilbert, J. M., & Park, C. F.** (1986). *The Geology of Ore Deposits*. W. H. H Freeman and Company, New York, 985p.
- 54. Hanley, J. J., & Bray, C. J.** (2009). The trace metal content of amphibole as a proximity indicator for Cu-Ni-PGE mineralization in the footwall of the Sudbury Igneous Complex, Ontario, Canada. *Economic Geology*, 104(1), 113-125.
- 55. Hayward, N., & Corriveau, L.** (2014). Fault reconstructions using aeromagnetic data in the Great Bear magmatic zone, Northwest Territories, Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 51(10), 927-942.
- 56. Helz, R.T.**, (1973). Phase relations of basalts in their melting range at  $P_{H_2O} = 5$  kb as a function of oxygen fugacity: Part i. mafic phases. *J. Petrol.* 14, 249–302.
- 57. Henríquez, F., Naslund, H. R., Nyström, J. O., Vivallo, W., Aguirre, R., Dobbs, F. M., & Lledo, H.** (2003). New field evidence bearing on the origin of the El Laco magnetite deposit, northern Chile—a discussion. *Economic Geology*, 98(7), 1497-1500.
- 58. Henriquez, G.** (2013). Antecedentes Climáticos III Región de Atacama. Centro de Información de Recursos Naturales. 34.
- 59. Herrera, V., Cembrano, J., Olivares, V., Kojima, S., & Arancibia, G.** (2005). Precipitación por despresurización y ebullición en vetas hospedadas en un dúplex de rumbo extensional: Evidencias microestructurales y microtermométricas. *Revista geológica de Chile*, 32(2), 207-228.
- 60. Hervé, M.** (1987a). Movimiento normal de la falla Paposo, Zona de Falla de Atacama, en el Mioceno, Chile. *Revista Geológica de Chile*, v. 31, p. 31–36.
- 61. Hitzman, W.H., Oreskes, N., Einaudi, M.T.** (1992), Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-REE) deposits: *Precambrian Research*, 58, 241-287.
- 62. Hopper, D., Correa, A., & Porter, T. M.** (2000). The Panulcillo and Teresa de Colmo copper deposits: Two contrasting examples of Fe-ox Cu-Au mineralization from the coastal Cordillera of Chile. *Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective*, 1, 177-189.
- 63. Howie, R., Zussman, J., Deer, W.** (1992). *An introduction to the rock-forming minerals*.
- 64. Hurwitz, S., & Navon, O.** (1994). Bubble nucleation in rhyolitic melts: Experiments at high pressure, temperature, and water content. *Earth and Planetary Science Letters*, 122(3-4), 267-280.

65. **Instituto de Investigaciones Geológicas (Santiago, Chile), & Naranjo, J. A.** (1978). Geología de la zona interior de la Cordillera de la Costa entre los 26o00'y 26o20': región de Atacama: carta geológica de Chile escala 1: 100.000. Instituto de investigaciones geológicas.
66. **Jacobs, D. C., & Parry, W. T.** (1979). Geochemistry of biotite in the Santa Rita porphyry copper deposit, New Mexico. *Economic Geology*, 74(4), 860-887.
67. **Knipping (a), J. L., Bilenker, L. D., Simon, A. C., Reich, M., Barra, F., Deditius, A. P., ... & Munizaga, R.** (2015). Giant Kiruna-type deposits form by efficient flotation of magmatic magnetite suspensions. *Geology*, 43(7), 591-594.
68. **Knipping (b), J. L., Bilenker, L. D., Simon, A. C., Reich, M., Barra, F., Deditius, A. P., ... & Munizaga, R.** (2015). Trace elements in magnetite from massive iron oxide-apatite deposits indicate a combined formation by igneous and magmatic-hydrothermal processes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 171, 15-38
69. **La Cruz, N. L., Ovalle, J. T., Simon, A. C., Konecke, B. A., Barra, F., Reich, M., ... & Childress, T. M.** (2020). The geochemistry of magnetite and apatite from the El Laco iron oxide-apatite deposit, Chile: Implications for ore genesis. *Economic Geology*, 115(7), 1461-1491.
70. **La Cruz, N. L., Simon, A. C., Wolf, A. S., Reich, M., Barra, F., & Gagnon, J. E.** (2019). The geochemistry of apatite from the Los Colorados iron oxide-apatite deposit, Chile: implications for ore genesis. *Mineralium Deposita*, 54(8), 1143-1156.
71. **Leake, B. E., Woolley, A. R., Arps, C. E., Birch, W. D., Gilbert, M. C., Grice, J. D. & Youzhi, G.** (1997). Nomenclature of amphiboles; report of the subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names. *The Canadian Mineralogist*, 35(1), 219-246.
72. **Liao, Y., Wei, C., Rehman, H.U.,** (2021). Titanium in calcium amphibole: Behavior and thermometry. *Am. Mineral.* 106, 180–191. <https://doi.org/10.2138/am-2020-7409>
73. **Lledo, H. L., & Jenkins, D. M.** (2008). Experimental investigation of the upper thermal stability of Mg-rich actinolite; implications for Kiruna-type iron deposits. *Journal of Petrology*, 49(2), 225-238.
74. **Maksaev, V.; Townley, B.; Palacios, C.; Camus, F.** (2007). Metallic Ore Deposits. In *The Geology of Chile* (Moreno, T.; Gibbons, W.; editors). The Geological Society, Special Publication: 179-200. London.
75. **Marquardt, M., Bissig, T., Cembrano, J., Kenneth, C.** (2016). Tectono-magmatic setting of Early Cretaceous Iron Oxide- Copper-Gold (IOCG) and Apatite (IOA) deposits in the Vallenar District, Northern Chile.
76. **Ménard, J. J.** (1995). Relationship between altered pyroxene diorite and the magnetite mineralization in the Chilean Iron Belt, with emphasis on the El Algarrobo iron deposits (Atacama region, Chile). *Mineralium Deposita*, 30(3), 268-274.

77. **Montreuil, J. F., Corriveau, L., & Davis, W. J.** (2016). Tectonomagmatic evolution of the southern Great Bear magmatic zone (Northwest Territories, Canada): Implications for the genesis of iron oxide-alkali-altered hydrothermal systems. *Economic Geology*, 111(8), 2111-2138.
78. **Morelli Roa, P. F.** (2008). Estudio geológico del sistema de alteración hidrotermal de Pajonales, Provincia de Vallenar, Región de Atacama.
79. **Moshefi, P., Hosseinzadeh, M. R., Moayyed, M., & Lentz, D. R.** (2018). Comparative study of mineral chemistry of four biotite types as geochemical indicators of mineralized and barren intrusions in the Sungun Porphyry Cu-Mo deposit, northwestern Iran. *Ore Geology Reviews*, 97, 1-20.
80. **Mourgues, F. A.** (2007). La transgression du Crétacé Inférieur au Nord du Chili. Biostratigraphie, Paléontologie (Ammonites) Stratigraphie Séquentielle et Tectonique Syn-sédimentaire. Ph.D. tesis, Universidad de Toulouse III, Francia.
81. **Mpodozis, C., & Ramos, V.** (1990). The andes of Chile and Argentina.
82. **Mumin, A. H., Corriveau, L., Somarin, A. K., & Ootes, L.** (2007). Iron oxide copper-gold-type polymetallic mineralization in the Contact Lake belt, Great Bear magmatic zone, Northwest Territories, Canada. *Exploration and Mining Geology*, 16(3-4), 187-208.
83. **Mumin, A. H., Somarin, A. K., Jones, B., Corriveau, L., Ootes, L., Camier, J.** (2010). The IOCG-porphyry-epithermal continuum in the Great Bear magmatic zone, Northwest Territories, Canada. *Exploring for iron oxide copper-gold deposits: Canada and global analogues. Edited by L. Corriveau and AH Mumin. Geological Association of Canada, Short Course Notes*, 20, 59-78.
84. **Naranjo, J. A., Henríquez, F., & Nyström, J. O.** (2010). Subvolcanic contact metasomatism at El Laco volcanic complex, central Andes. *Andean Geology*, 37(1), 110-120.
85. **Naslund, H. R.** (2002). Magmatic iron ores and associated mineralization: examples from the Chilean High Andes and Coastal Cordillera. Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective 2, 207-226.
86. **Nesse, W.** (1991). Introducción a la mineralogía óptica.
87. **Nyström, J. O., & Henríquez, F.** (1994). Magmatic features of iron ores of the Kiruna type in Chile and Sweden; ore textures and magnetite geochemistry. *Economic geology*, 89(4), 820-839.
88. **Ortega Suazo, G. I.** (2018). Geología del prospecto sindicato este, Distrito Ferrífero Sierra la Bandera, Región de Atacama, Chile.
89. **Ovalle, J. T., La Cruz, N. L., Reich, M., Barra, F., Simon, A. C., Konecke, B. A., ... & Morata, D.** (2018). Formation of massive iron deposits linked to explosive volcanic eruptions. *Scientific reports*, 8(1), 1-11.

90. **Oyarzún J, Frutos J** (1984) Tectonic and petrological frame of the Cretaceous iron deposits of North Chile. *Mining Geol* 34:21–31.
91. **Palma, G., Barra, F., Reich, M., Valencia, V., Simon, A. C., Vervoort, J., ... & Romero, R.** (2019). Halogens, trace element concentrations, and Sr-Nd isotopes in apatite from iron oxide-apatite (IOA) deposits in the Chilean iron belt: Evidence for magmatic and hydrothermal stages of mineralization. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 246, 515-540.
92. **Palma, G., Barra, F., Reich, M., Simon, A. C., & Romero, R.** (2020). A review of magnetite geochemistry of Chilean iron oxide-apatite (IOA) deposits and its implications for ore-forming processes. *Ore Geology Reviews*, 126, 103748.
93. **Park, C. F.** (1961). A magnetite "flow" in northern Chile. *Economic Geology*, 56(2), 431-436.
94. **Perez, P., Marquardt, M., Cembrano, J., Perez, A.** (2012). Modelo geológico-estructural de un depósito IOCG en el Segmento El Salado, Sistema de Falla de Atacama: Mina Filipina.
95. **Phillips, W. J.** (1972). Hydraulic fracturing and mineralization. *Journal of the Geological Society*, 128(4), 337-359.
96. **Pichon R** (1981) Contribution a l'étude de la ceinture du fer du Chili: Les gisements de Bandurrias (Prov. d'Atacama) et Los Colorados norte. (Prov. de Huasco). Dissertation, University of Paris
97. **Pincheira M, Thiele R, Fontbote L.** (1990). Tectonic transpression along the southern segment of the Atacama Fault-Zone, Chile. In: *Colloques et Seminaires: Symposium International Géodynamique Andine*, Grenoble, pp 133–136
98. **Raase, P.**, (1974). Al and Ti contents of hornblende, indicators of pressure and temperature of regional metamorphism. *Contrib. to Mineral. Petrol.* 45, 231–236.
99. **Ray, G. E., & Webster, I. C. L.** (2007). Geology and chemistry of the low Ti magnetite-bearing Heff Cu-Au skarn and its associated plutonic rocks, Heffley Lake, south-central British Columbia. *Exploration and Mining Geology*, 16(3-4), 159-186.
100. **Reich, M., Simon, A. C., Barra, F., Palma, G., Hou, T., & Bilenker, L. D.** (2022). Formation of iron oxide–apatite deposits. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3(11), 758-775.
101. **Reich, M., Simon, A.C., Deditius, A., Barra, F., Chryssoulis, S., Lagas, G., Tardani, D., Knipping, J., Bilenker, L., Sanchez-Alfaro, P., Roberts, M.P., and Munziga, R.,** (2016). Trace element signature of pyrite from the Los Colorados iron oxide-apatite (IOA) deposit, Chile: A missing link between Andean IOA and iron oxide-copper-gold systems?: *Economic Geology*, v. 111, p. 743–761.
102. **Rhodes, A. L., Oreskes, N., & Sheets, S.** (1999). Geology and rare earth element geochemistry of magnetite deposits at El Laco, Chile.

- 103. Rodriguez-Mustafa, M. A., Simon, A. C., del Real, I., Thompson, J. F., Bilenker, L. D., Barra, F., ... & Cadwell, D. (2020).** A continuum from iron oxide copper-gold to iron oxide-apatite deposits: Evidence from Fe and O stable isotopes and trace element chemistry of magnetite. *Economic Geology*, 115(7), 1443-1459.
- 104. Roffey, S. 2001.** Sofía Prospect Final Report, Region II, Antofagasta, Chile. Informe Interno Río Tinto.
- 105. Rojas, P. A., Barra, F., Reich, M., Deditius, A., Simon, A., Uribe, F., ... & Rojo, M. (2018a).** A genetic link between magnetite mineralization and diorite intrusion at the El Romeral iron oxide-apatite deposit, northern Chile. *Mineralium Deposita*, 53(7), 947-966.
- 106. Rojas, P. A., Barra, F., Deditius, A., Reich, M., Simon, A., Roberts, M., & Rojo, M. (2018b).** New contributions to the understanding of Kiruna-type iron oxide-apatite deposits revealed by magnetite ore and gangue mineral geochemistry at the El Romeral deposit, Chile. *Ore Geology Reviews*, 93, 413-435.
- 107. Ruiz, C. (1965)** Geología y yacimientos metalíferos de Chile. Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago, Chile, 305 pp.
- 108. Ruiz, C., et al. (1968).** Genesis of the Chilean iron ore deposits of Mesozoic age. Rep 23rd International Geological Congress 7: 323-338.
- 109. Salazar, E., Barra, F., Reich, M., Simon, A., Leisen, M., Palma, G., ... & Rojo, M. (2020).** Trace element geochemistry of magnetite from the Cerro Negro Norte iron oxide-apatite deposit, northern Chile. *Mineralium Deposita*, 55(3), 409-428.
- 110. Scheuber E., Andriessen PAM., 1990.** The kinematic and geodynamic significance of the Atacama fault zone, northern Chile. *J Struct Geol* 12:243–257
- 111. Scheuber, E., Bogdanic, T., Jensen, A., & Reutter, K. J. (1994).** Tectonic development of the north Chilean Andes in relation to plate convergence and magmatism since the Jurassic. In *Tectonics of the southern central Andes* (pp. 121-139). Springer, Berlin, Heidelberg.
- 112. Scheuber, E., González, G. (1999).** Tectonics of Jurassic-Early Cretaceous magmatic arc of the north Chilean Coastal Cordillera (22°–26°S). A story of crustal deformation along a convergent plate boundary. *Tectonics* 18, 895–910.
- 113. Segerstrom, K., & Parker, R. (1959).** Cuadrángulo Cerrillos, Provincia de Atacama. Instituto de Investigaciones Geológicas. Carta Geológica de Chile, Vol. I(N°2), 32 p.
- 114. Segerstrom, K., & Ruiz, C. (1962).** Cuadrángulo Copiapó, Provincia de Atacama. Instituto de Investigaciones Geológicas. Carta Geológica de Chile, Vol. III(N°1 (=N°6)), 115 p.
- 115. Selby, D., & Nesbitt, B. E. (2000).** Chemical composition of biotite from the Casino porphyry Cu–Au–Mo mineralization, Yukon, Canada: evaluation of magmatic and hydrothermal fluid chemistry. *Chemical Geology*, 171(1-2), 77-93.

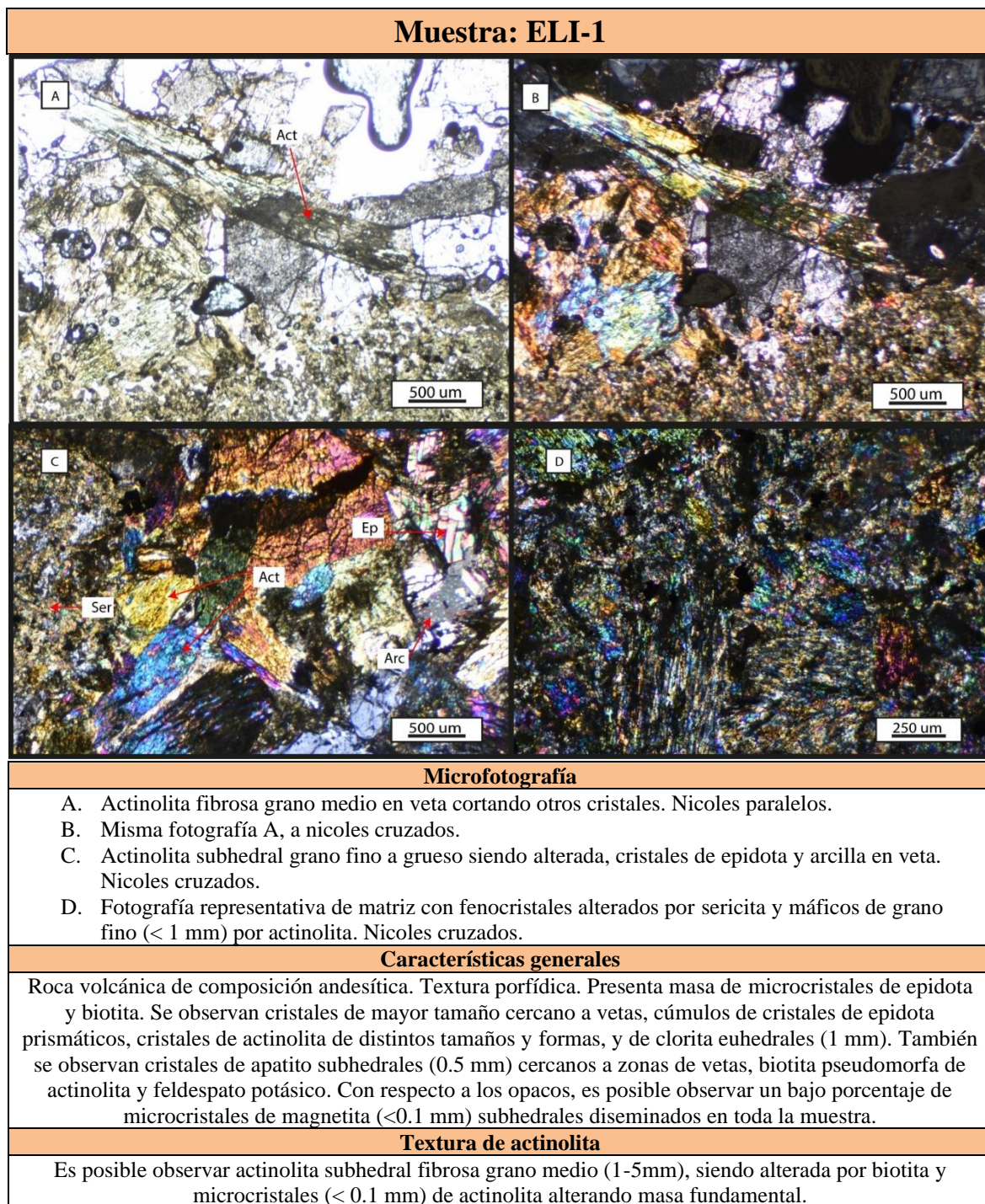


- 116. Sibson, R. H.** (1977). Fault rocks and fault mechanisms. *Journal of the Geological Society*, 133(3), 191-213.
- 117. Sibson, R. H.** (1990). Conditions for fault-valve behaviour. Geological Society, London, Special Publications, 54(1), 15-28.
- 118. Sillitoe, R. H.** (2003). Iron oxide-copper-gold deposits: an Andean view. *Mineralium Deposita*, 38(7), 787-812.
- 119. Sillitoe, R. H., & Burrows, D. R.** (2002). New field evidence bearing on the origin of the El Laco magnetite deposit, northern Chile. *Economic Geology*, 97(5), 1101-1109.
- 120. Simon, A. C., Knipping, J., Reich, M., Barra, F., Deditius, A. P., Bilenker, L., & Childress, T.** (2018). Kiruna-type iron oxide-apatite (IOA) and iron oxide copper-gold (IOCG) deposits form by a combination of igneous and magmatic-hydrothermal processes: Evidence from the Chilean iron belt.
- 121. Skirrow R.G.** (2010). "Hematite-group" IOCG + U ore systems: Tectonic settings, hydrothermal characteristics, and Cu-Au and U mineralizing processes: Geological Association of Canada Short Course Notes 20 , p. 39–59.
- 122. Sueno S, Cameron M, Papike J J, Prewitt C T** (1973) The high temperature crystal chemistry of tremolite *American Mineralogist* 58 649-664
- 123. Thiele, R., & Pincheira, M.** (1984). Las megafallas Los Colorados-Portezuelo Tatara y La Sosita-Huantamé, en la extensión sur de la zona de falla Atacama, al NW de Vallenar. *Comunicaciones: una revista de geología andina*, (34), 65-65.
- 124. Thiele, R., & Pincheira, M.** (1987). Tectonica transpresiva v movimiento de desgarre en el segmento sur de la Zona de Falla Atacama, Chile. *Andean Geology*, (31), 77-94.
- 125. Townley, B.** (2001). Metalogénesis: Hidrotermalismo y modelos de yacimientos. Apuntes y referencias del curso de Metalogénesis (GL54A), Documento de avance Julio, 23, 2001.
- 126. Treloar, P. J., & Colley, H.** (1996). Variations in F and Cl contents in apatites from magnetite—apatite ores in northern chile, and their ore-genetic implications. *Mineralogical Magazine*, 60(399), 285-301.
- 127. Valenzuela, J.** (2002). Caracterización, geocronología y mecanismos de emplazamiento del Batolito de la Costa en Vallenar (28°22'-28°41'S y 70°45'-71°7'W), III Región, Chile. Memoria de Título (Inédito), Universidad de Concepción: p. 118.
- 128. Vallejos, H. M.** (2017). Estudio de la paragénesis y química mineral en Magnetitas del depósito tipo IOCG. Santiago de Chile.
- 129. Verkouteren, J. R., & Wylie, A. G.** (2000). The tremolite-actinolite-ferro-actinolite series: Systematic relationships among cell parameters, composition, optical properties, and habit, and evidence of discontinuities. *American Mineralogist*, 85(9), 1239-1254.

130. **Vivallo, W., & Henríquez, F.** (1997). Relación genética entre los yacimientos estratoligados de Cu ('Tipo Manto'), de Cu-Fe±Au y de hierro del tipo Kiruna. In VIII Congreso Geológico Chileno, Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile (p. 5).
131. **Watson, E. B., Wark, A. D. A. & Thomas, A. J. B.** Crystallization thermometers for zircon and rutile. *Contrib. Mineral Petrol.* 151, 413–433 (2006).
132. **Wilkinson, J. J., Chang, Z., Cooke, D. R., Baker, M. J., Wilkinson, C. C., Inglis, S., ... & Gemmell, J. B.** (2015). The chlorite proximator: A new tool for detecting porphyry ore deposits. *Journal of Geochemical Exploration*, 152, 10-26.
133. **Williams, P. J., Barton, M. D., Johnson, D. A., Fontboté, L., De Haller, A., Mark, G., ... & Marschik, R.** (2005). Iron oxide copper-gold deposits: Geology, space-time distribution, and possible modes of origin.
134. **Wones, D.R., Gilbert, M.C.,** (2018). Chapter 3. AMPHIBOLES in the IGNEOUS ENVIRONMENT, in: *Amphiboles*. pp. 355–390
135. **Zajacz, Z., Halter, W. E., Pettke, T., & Guillong, M.** (2008). Determination of fluid/melt partition coefficients by LA-ICPMS analysis of co-existing fluid and silicate melt inclusions: Controls on element partitioning. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(8), 2169-2197.

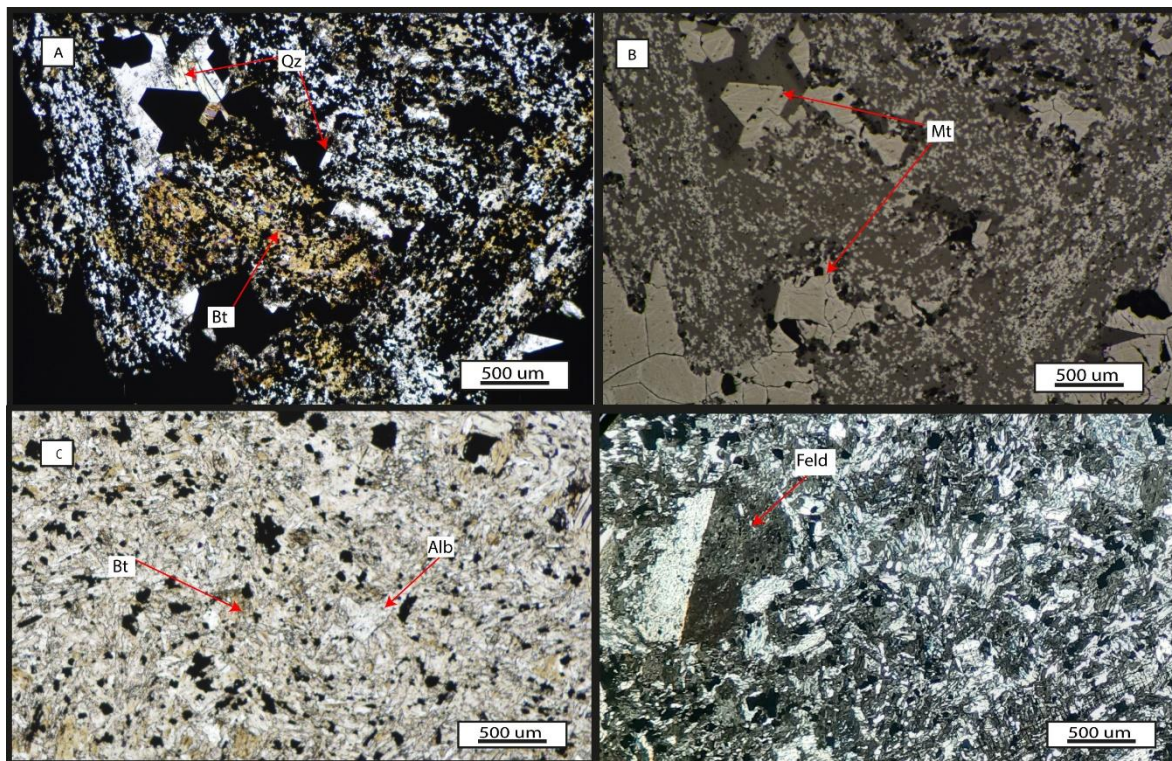
## ANEXOS

### Anexo A. Descripciones petrográficas secciones pulidas – transparentes.



<b>Minerales primarios y de alteración</b>		
<b>Mineral</b>	<b>(%)</b>	<b>Características</b>
Actinolita	13	Cristales principalmente en vetas y microcristales en masa fundamental.
Apatito	10	Cristales subhedrales grano medio en vetas bordeando actinolita.
Biotita	10	Microcristales en masa fundamental y biotita secundaria alterando cristales de actinolita.
Epidota	20	Microcristales en masa fundamental y cristales prismáticos alargados manto de arlequín en veta.
Clorita	10	Reemplazando biotita secundaria.
Sericita	20	Alterando masa y fenocristales de roca caja.
Arcilla	2	En veta.
Feldespatos	10	En matriz, grano fino.
<b>Minerales opacos</b>		
<b>Mineral</b>	<b>(%)</b>	<b>Características</b>
Magnetita	5	Cristales euhedrales (0.22 mm) relleno de cavidades.

## Muestra: ELI-2



### Microfotografía

- A. Alteración cuarzo-sericítica. Relictos de biotita (color café). Nicoles cruzados.
- B. Misma fotografía A luz reflejada. Cristales subhedrales de magnetita y microcristales relleno de cavidades.
- C. Masa fundamental microcristalina de albita y biotita. Nicoles cruzados.
- D. Fenocristal de feldespato inmerso en una masa de microcristales de plagioclasa junto a feldespatos. Nicoles cruzados.

### Observaciones

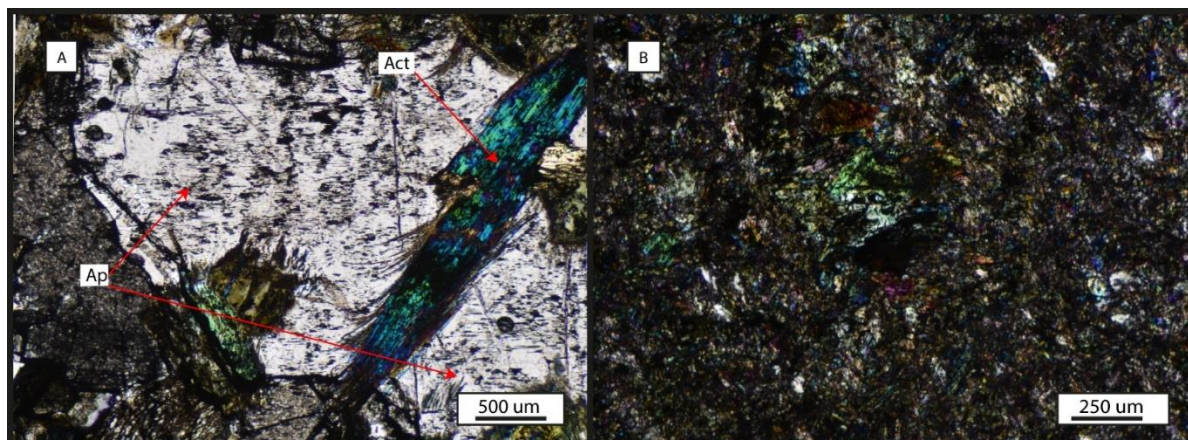
Roca volcánica de composición andesítica. Presenta silicificación. Alteración pervasiva de masa de feldespatos, plagioclasa y sericita, con relictos de clorita, epidota y biotita secundaria. Se puede observar mineralización masiva magnetita subhedral que presenta leve martitización, relleno de los boxwork dejados por la alteración. También se pueden identificar intercrecimientos de microcristales de clorita euhedral, con microcristales de biotita secundaria.

### Textura de actinolita

No es posible identificar

<b>Minerales primarios y de alteración</b>		
<b>Mineral</b>	<b>(%)</b>	<b>Características</b>
Cuarzo	30	Reemplazando feldespatos de roca caja.
Albita	10	Microcristales tabulares a fibrosos en masa.
Clorita	5	Diseminada alterando la roca caja.
Epidota	5	Alterando cristales de la roca caja.
Biotita	10	Secundaria sobre microcristales de la masa, también primaria grano grueso siendo alterada por clorita y sericita.
Feldespato	5	Fenocritales y en matriz.
Plagioclasa	15	Microcristales en matriz.
<b>Minerales opacos</b>		
<b>Mineral</b>	<b>(%)</b>	<b>Características</b>
Magnetita	20	Cristales subhedrales y anhedrales relleno de cavidades de relictos y microcristales relleno de espacios de alteración.

## Muestra: ELI-3



### Microfotografía

- A. Apatito grano grueso en veta cortado por actinolita fibrosa grano medio. Nicoles cruzados.  
 B. Fotografía representativa de matriz. Nicoles cruzados.

### Características generales

Roca volcánica de composición andesítica. Minerales grano grueso de apatito anhedral y cristales de clorita secundaria formada por alteración de biotita, cortados por cristal de actinolita fibroso grano grueso (5 mm) que se encuentran siendo alterados por biotita. Se pueden identificar microcristales de epidota, biotita y clorita en la masa. Cristales grano medio de clorita acicular radial y epidota euhedral intercrecidos con actinolita.

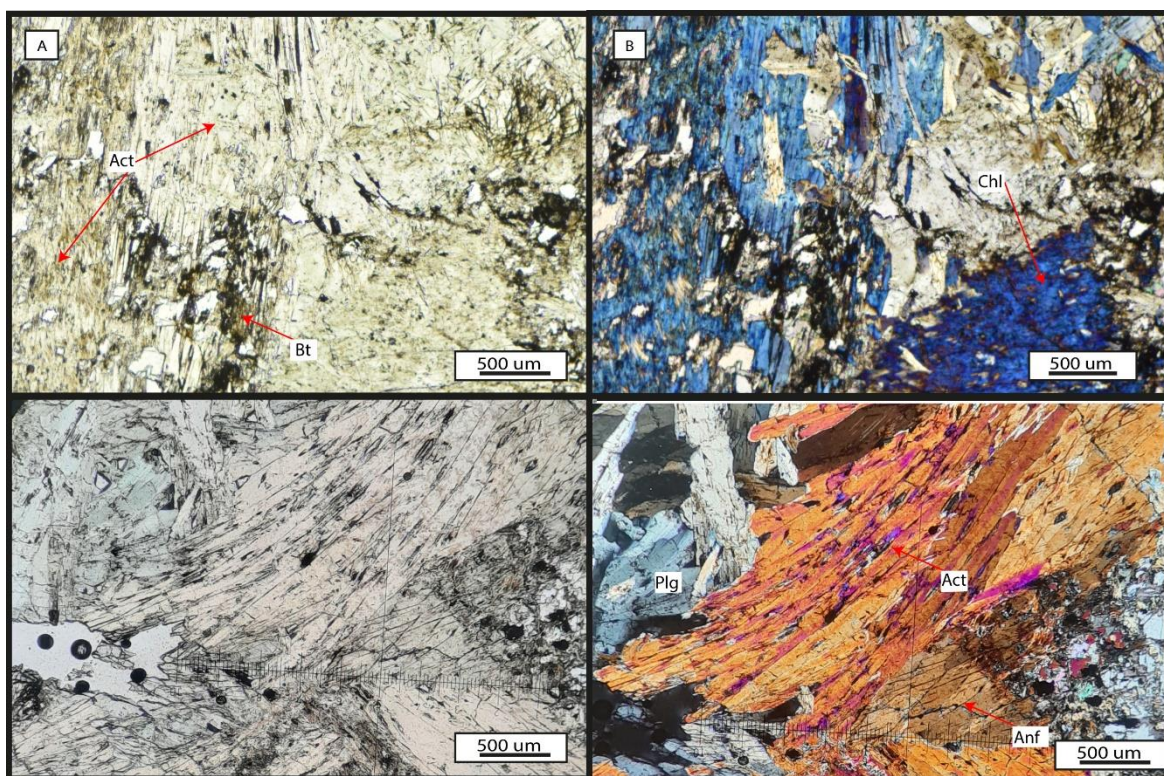
### Textura de actinolita

Población de cristales grano medio (1-5 mm) euhedral y subhedral cortando cristal de apatito y microcristales en masa fundamental.

### Minerales primarios y de alteración

Mineral	(%)	Características
Actinolita	10	Cristales fibrosos grano medio en veta.
Clorita	15	Cristales radiales azul berlín grano fino y alterando actinolita.
Epidota	30	Cristales prismáticos grano fino y microcristales anhedrales en masa.
Apatito	20	Cristales subhedrales grano medio a grueso siendo cortado por actinolitas.
Sericita	20	En masa.
Minerales opacos		
Mineral	(%)	Características
Magnetita	5	Rellenando cavidades.

## Muestra: ELI-4



### Microfotografía

- A. Actinolita grano medio fibrosa alterada por biotita y biotita secundaria siendo alterada a clorita. Nicoles paralelos.
- B. Misma fotografía anterior a nicoles cruzados. A la derecha clorita azul berlín alterando biotita.
- C. Cristales de actinolita fibrosos grano medio. Nicoles paralelos.
- D. Misma fotografía anterior a nicoles cruzados. Se observan cristales de plagioclasa y hornblenda de la roca caja.

### Características generales

Roca volcánica de composición andesítica. Textura porfídica. Cristales fibrosos grano grueso de actinolita y anfíboles grano medio siendo alterados por biotita. Cristales grano fino de biotita, microcristales de epidota, feldespato y cuarzo en la matriz y clorita secundaria por alteración de biotita. Se observa una vetilla de apatito con actinolita rodeada por microcristales de feldespato.

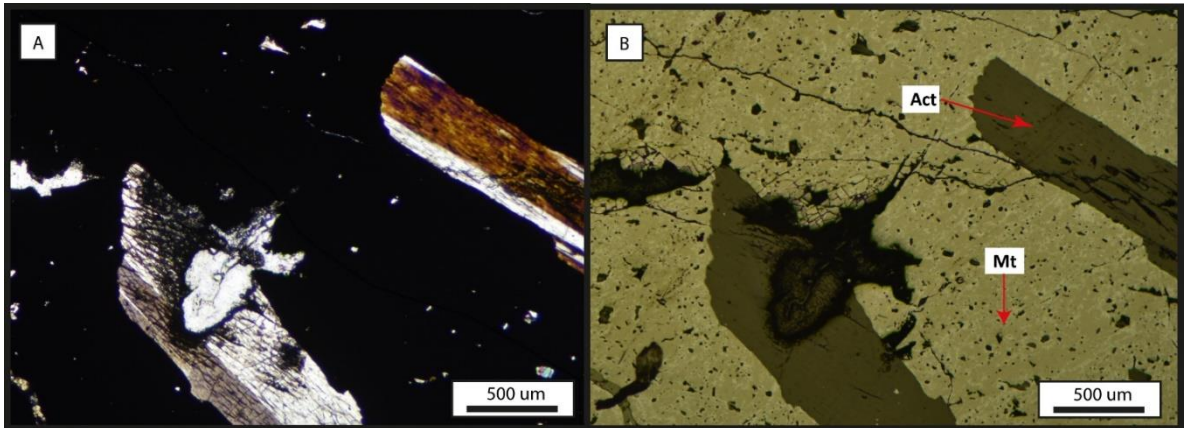
### Textura de actinolita

Es posible identificar actinolita fibrosa grano fino a medio (0,5 - 5 mm) siendo alteradas a clorita y biotita.



<b>Minerales primarios y de alteración</b>		
<b>Mineral</b>	<b>(%)</b>	<b>Características</b>
Biotita	20	Cristales euhedrales de menor tamaño no alterados y reemplazando cristales de actinolita.
Actinolita	30	Cristales euhedrales grano medio, siendo alterados por biotita y en vetilla.
Cuarzo	5	Vetilla (1 mm) de cristales anhedrales.
Feldespato	10	Microcristales rodeando vetilla y en la matriz.
Apatito	5	Cristales anhedrales en vetilla.
Clorita secundaria	8	Cristales fibrosos y subhedrales formada por alteración de biotita, también como microcristales en matriz.
Epidota	2	Microcristales en masa
Anfibol	15	Cristales subhedrales grano medio con clivaje de 124° y 56°, alterados a biotita secundaria.
<b>Minerales opacos</b>		
<b>Mineral</b>	<b>(%)</b>	<b>Características</b>
Magnetita	5	Cristales rellenando cavidades

**Muestra: CAM-1**



**Microfotografía**

- A. Cristales de actinolita y magnetita masiva, junto con microvenillas. Luz reflejada.
- B. Misma zona a nicoles cruzados.

**Características generales**

Roca de magnetita masiva. Presenta porcentaje menor de actinolita intercrecida con la magnetita, donde la magnetita se encuentra relleno de espacios. Biotita secundaria café rojiza formada a partir de la actinolita y en microvenillas.

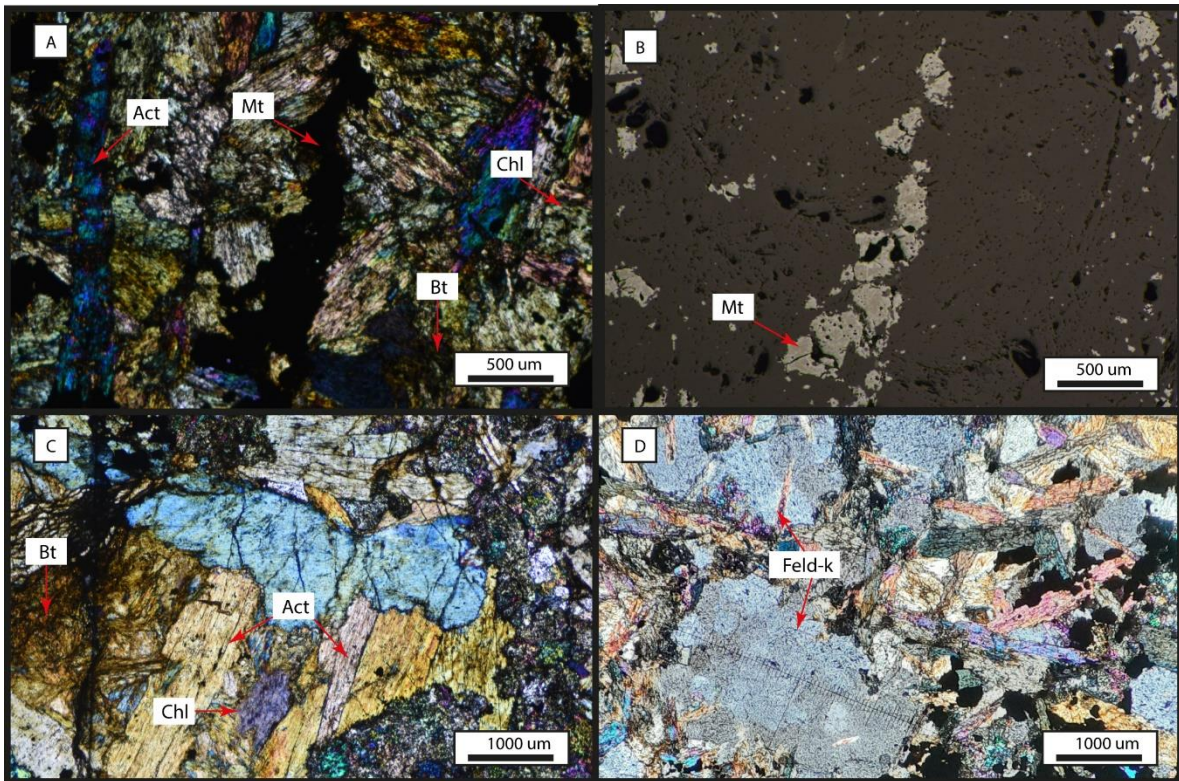
**Textura de actinolita**

Granos fibrosos y anhedrales de actinolita grano medio (2 mm) y microcristales de actinolita (<0.05mm) diseminados en la muestra. También se observa una cantidad de microvenillas (0.01 mm) de actinolita que cortan las de grano medio.

**Minerales primarios y de alteración**

Mineral	(%)	Características
Actinolita	13	Cristales grano medio (2mm) euhedrales.
Biotita secundaria	2	Pseudomorfa de actinolita
Minerales opacos		
Mineral	(%)	Características
Magnetita	85	Masiva.

## Muestra: CAM2



### Microfotografía

- A. Vetilla de magnetita cortando cristales de clorita y actinolita. Nicoles cruzados.
- B. Misma fotografía A luz reflejada.
- C. Actinolita alterada por biotita y clorita. Nicoles cruzados
- D. Imagen representativa de la roca caja y sus cristales. Nicoles cruzados.

### Características generales

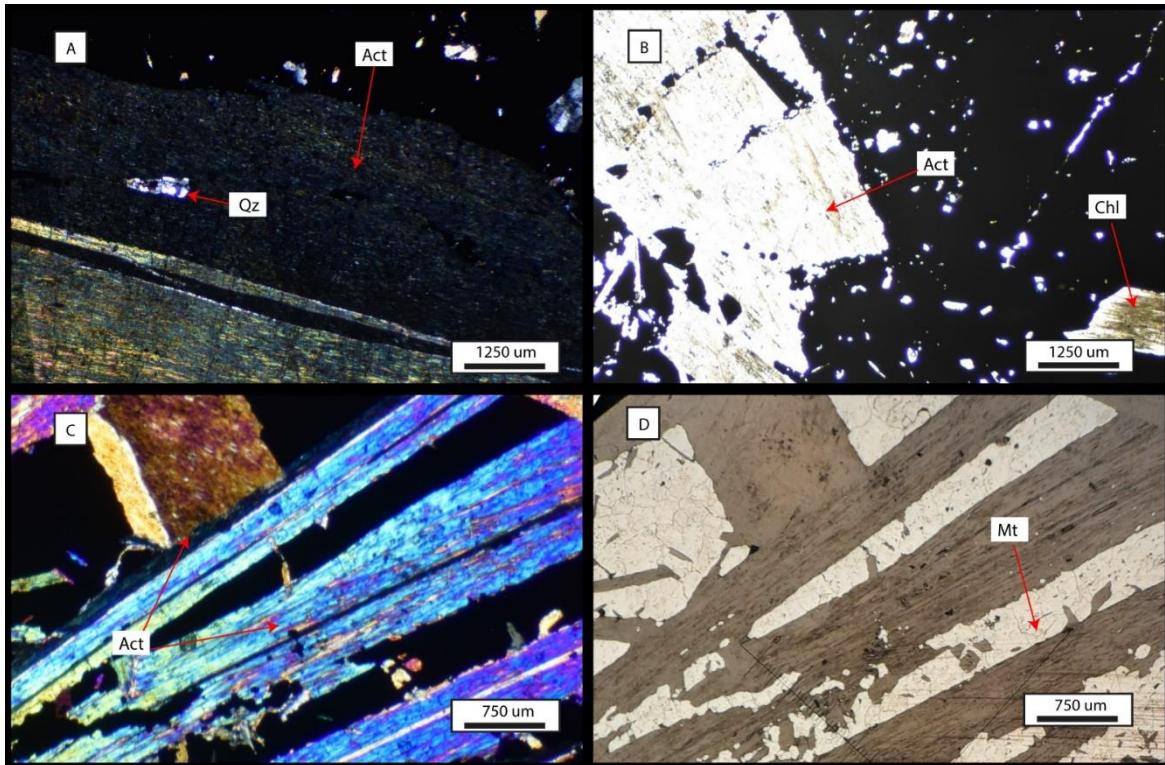
Roca ígnea intrusiva de composición diorítica. Textura inequigranular. Compuesta principalmente por el intercrecimiento de cristales de actinolita y pseudomorfos de biotita secundaria (posterior a actinolita). Los fenocristales presentes en la roca se encuentran sobreimpuestos a cúmulos de cuarzo. Se observan microcristales de epidota bordeando los cristales de actinolita y cristales de menor tamaño de apatito euhedrales cercanos a las zonas mineralizadas, que corresponden a magnetita subhedral pervasiva que fragmenta principalmente los cristales de actinolita. También, microcristales de clorita reconocibles por su color de interferencia ultra-azul. Se observa una fuerte alteración de biotita secundaria en los bordes de los cristales.

### Textura de actinolita

Dos poblaciones de cristales, una de cristales fibrosos grano medio (2.2 mm) muy obliterados por sericita, otra población de cristales subhedral granos finos (0.5 mm) y una tercera de microcristales (0.1 mm).

<b>Minerales primarios y de alteración</b>		
<b>Mineral</b>	<b>(%)</b>	<b>Características</b>
Epidota	5	Microcristales entre cristales de actinolita
Actinolita	30	Cristales fibrosos grano medio y fino alterados a clorita y biotita.
Clorita	10	Cristales radiales grano fino, reemplazando a biotita secundaria y a actinolita.
Titanita	1	Cristales anhedrales grano fino (<0.1 mm)
Ortoclasa	15	Cristales anhedrales de grano fino a medio en roca caja.
Biotita	5	Alterando bordes de actinolitas.
Sericita	12	Alterando principalmente a cristales de actinolita, clorita y epidota.
Arcillas	12	Alterando cristales de roca caja.
<b>Minerales opacos</b>		
<b>Mineral</b>	<b>(%)</b>	<b>Características</b>
Magnetita	20	Subhedral, rellenando cavidades.

## Muestra: CAM12



### Microfotografía

- A. Actinolita grano grueso con cristales de cuarzo en intersticio. Nícoles cruzados.
- B. Actinolita grano grueso, a la derecha cristal grano medio siendo alterado a clorita. Nícoles paralelos.
- C. Actinolita fibrosa y prismática grano medio. Nícoles cruzados.
- D. Misma fotografía C luz reflejada. Muestra magnetita masiva fragmentando actinolita.

### Características generales

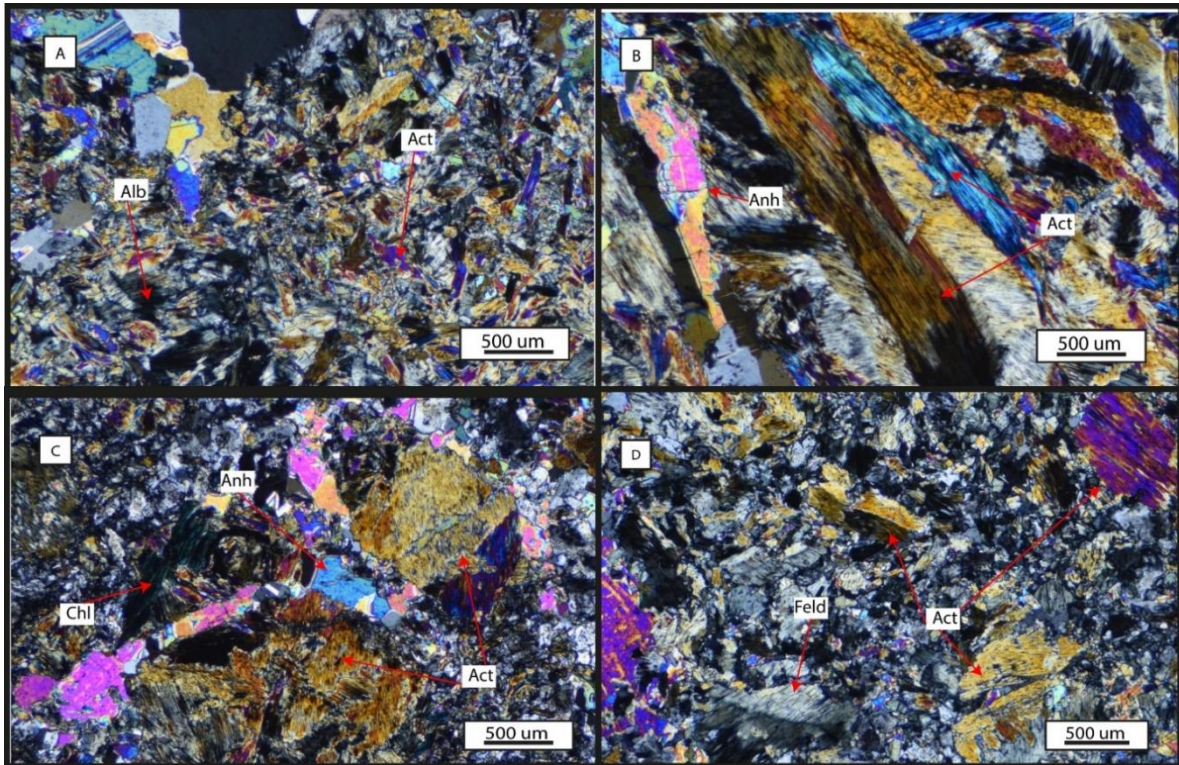
Roca de magnetita masiva. Se observa intercrecimiento de cristales de actinolita y magnetita subhedral masiva. Biotita secundaria pseudomorfa de actinolita y se reconoce presencia de microcristales de cuarzo en intersticios de actinolita. También se observa mineralización de magnetita en intersticios de actinolita.

### Textura de actinolita

Se pueden reconocer 3 familias, una de grano grueso (>7 mm) fibrosa euhedral, otra familia de grano medio (1-5 mm) con algunos cristales fibrosos y otros prismáticos tardíos, ambos (grueso y medio) presentan una orientación preferente La última de fragmentos muy pequeños de actinolita.

<b>Minerales primarios y de alteración</b>		
<b>Mineral</b>	<b>(%)</b>	<b>Características</b>
Cuarzo secundario	1	Cristales de grano fino (0.1 mm) como relleno de intersticio en actinolita grano grueso
Actinolita	25	Cristales fibrosos y prismáticos de grano medio a grueso.
Clorita	4	Alterando a actinolita.
<b>Minerales opacos</b>		
<b>Mineral</b>	<b>(%)</b>	<b>Características</b>
Magnetita	70	Masiva.

## Muestra: Iman01-03



### Microfotografía

- A. Fotografía referencial de matriz, cristales finos de actinolita intercrecidos con albita. Nícoles cruzados.
- B. Cristales grano medio de actinolita siendo alterados y vetilla de anhidrita. Nícoles cruzados.
- C. Vetilla de anhidrita cortando fenocristales de actinolita. Nícoles cruzados.
- D. Matriz de cuarzo y feldespato con fenocristales de actinolita y feldespato. Nícoles cruzados.

### Características generales

Roca volcánica de composición andesítica. Textura porfídica. Vetas compuestas principalmente de anhidrita, cortando cristales de biotita y feldespato potásico anhedral. Bordeando a la veta y a los cristales de grano medio de actinolita fibrosa (euhedral) se observan cúmulos cristalinos de microcristales de cuarzo anhedrales de extinción ondulosa. De color marrón biotita secundaria diseminada alterando preferentemente cristales de actinolita de distintos tamaños. Masa formada principalmente por feldespato potásico, actinolita fibrosa grano fino, biotita primaria y clorita de color azul anómalo que se encuentra reemplazando a biotita secundaria. No se observan opacos.

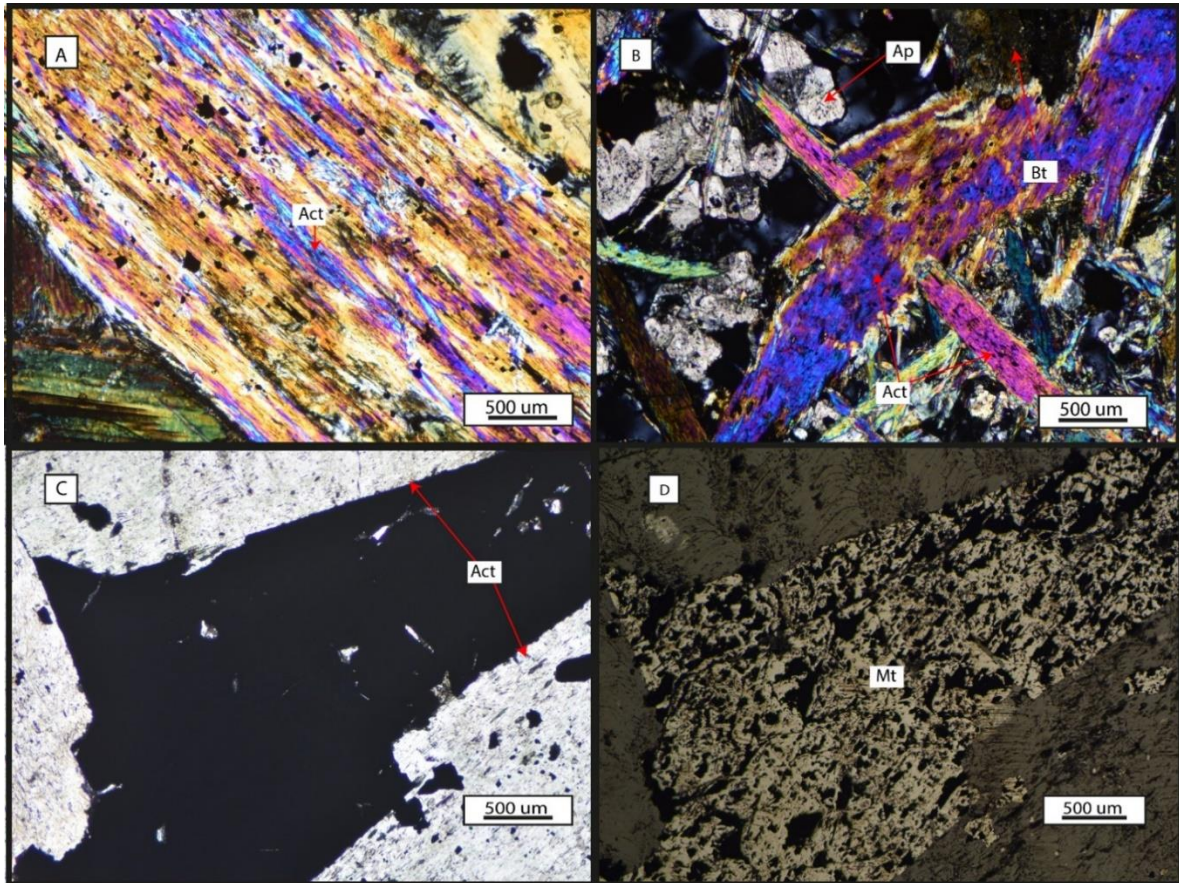
### Textura de actinolita

Se distinguen dos poblaciones principales, una de grano medio (1-5 mm) fibrosa euhedral cercana a las vetillas y otra de grano fino (<1 mm) inmersa en la masa. Ambos tipos de actinolita se encuentran siendo alterados a biotita.

<b>Minerales primarios y de alteración</b>		
<b>Mineral</b>	<b>(%)</b>	<b>Características</b>
Albita	10	Intercrecida con actinolitas
Actinolita	40	Siendo reemplazada por biotita
Anhidrita	10	En vetillas de hasta 2 mm y cúmulos
Feldespato	6	Presenta maclas, está asociado a cuarzo y sericita
Clorita	2	Alterando a actinolita.
Sericita	10	Asociada a feldespato y cuarzo.
Biotita	2	Microcristales en matriz
Calcita	8	Junto a anhidrita.
Cuarzo secundario	13	Microgranular e inunda la masa rocosa (silicificación)



## Muestra: Iman02-02



### Microfotografía

- A. Actinolita grano grueso siendo alterada por biotita y a la izquierda clorita. Nicoles cruzados.
- B. Actinolita grano medio y fino fibrosa intercrecida y alterada por biotita, cristales de apatito grano fino en intersicios. Nicoles cruzados.
- C. Actinolita grano grueso intercrecida con magnetita masiva, con alteración sericítica. Nicoles paralelos.
- D. Misma fotografía C luz reflejada.

### Características generales

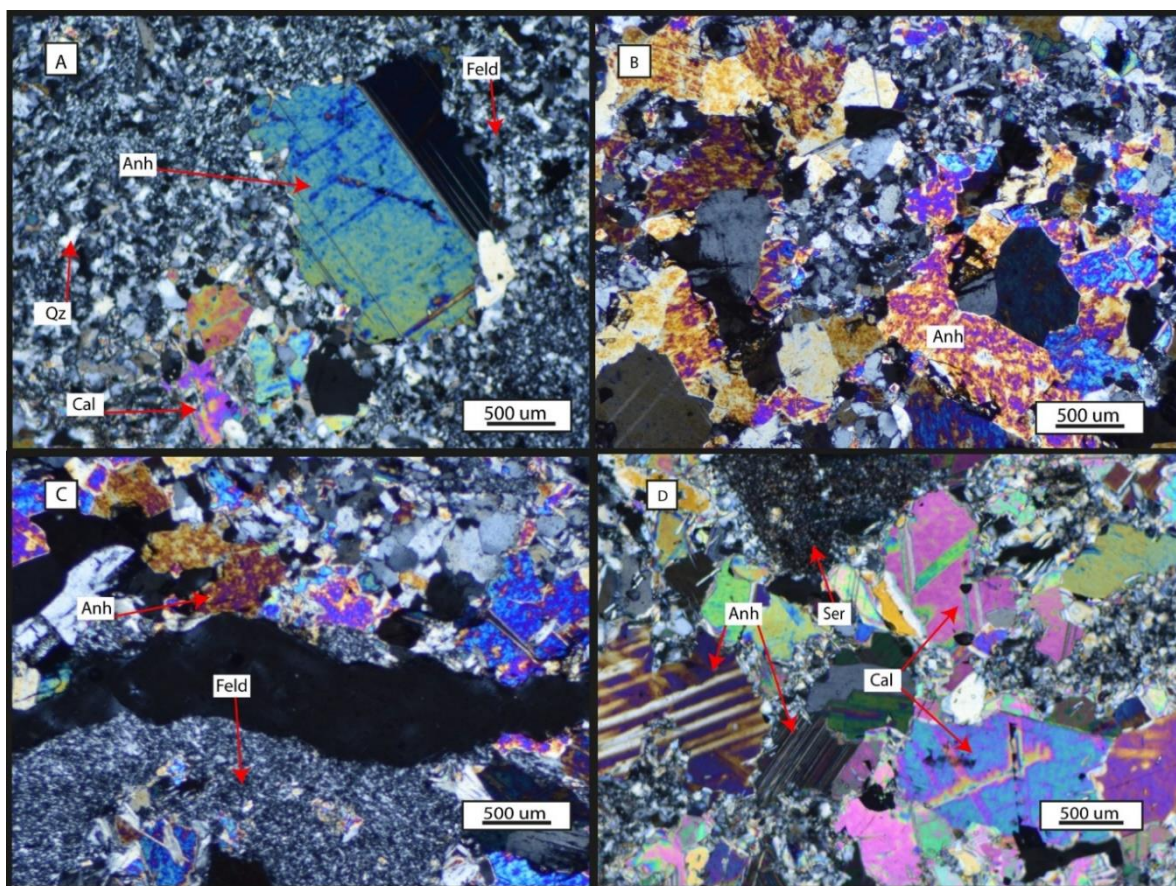
Roca intrusiva de composición diorítica. Textura fanerítica. Presenta una fuerte alteración actinolita, clorita y biotita. Actinolita alterada de color blanquecino. Agregados cristalinos de actinolita de hábito fibroso forman cristales de gran tamaño (>8 mm), microcristales de epidota rellenan espacios intersticiales en la actinolita. En las proximidades de los agregados cristalinos, actinolita grano fino y pequeños cristales de apatito (<0.5 mm). Otro grupo de cristales euhedrales de apatito de mayor tamaño se encuentran asociados a actinolita grano medio. Grandes cristales de biotita secundaria siendo alterados a clorita. Con respecto a los opacos, se observan grandes cristales prismáticos euhedrales intercrecidos con cristales de actinolita de mayor tamaño, también se distinguen microcristales de magnetita en los intersticios de fenocristales rellenoando espacios.

### Textura de actinolita

Siendo reemplazada por biotita secundaria, agregados prismáticos grano grueso (5 mm – 3 cm), grano medio acicular radial (1-5 mm) y otros aciculares granos fino (<1 mm).

<b>Minerales primarios y de alteración</b>		
<b>Mineral</b>	<b>(%)</b>	<b>Características</b>
Actinolita	65	Agregados prismáticos y aciculares radiales (1-8 mm)
Clorita	8	Un grupo de cristales euhedrales de clorita incolora por alteración de plagioclasas y otro grupo reemplazando máficos de biotita.
Biotita	8	2 poblaciones, una sin alterar y otra reemplazada por clorita, también microcristales (0,1 mm) siendo reemplazados por clorita
Apatito	4	Cúmulos de cristales euhedrales prismáticos (0,5 mm) en bordes de los rellenos de magnetita.
Titanita secundaria	1	Por cloritización de cristales de biotita (5mm)
Epidota	1	Microcristales en bordes de rellenos de magnetita.
Sericita	1	Alterando a biotita secundaria preexistente.
Arcillas	2	En matriz.
<b>Minerales opacos</b>		
<b>Mineral</b>	<b>%</b>	<b>Características</b>
Magnetita	10	Magnetita masiva relleno de espacios. Mineralización tardía de cristales subhedrales (2mm) fracturando fenocristales y microcristales ( 0,01 mm) en intersicios de actinolita.

## Muestra: Iman09-2



### Microfotografía

- A. Matriz de cuarzo y feldespato con fenocristales de anhidrita y calcita. Nicoles cruzados.
- B. Veta de anhidrita grano medio. Nicoles cruzados.
- C. Veta principalmente de anhidrita grano fino, zona inferior microcristales principalmente de feldespato en matriz. Nicoles cruzados.
- D. Cúmulos de anhidrita y calcita grano medio. Fenocristal de roca caja alterado a serícita. Nicoles cruzados.

### Características generales

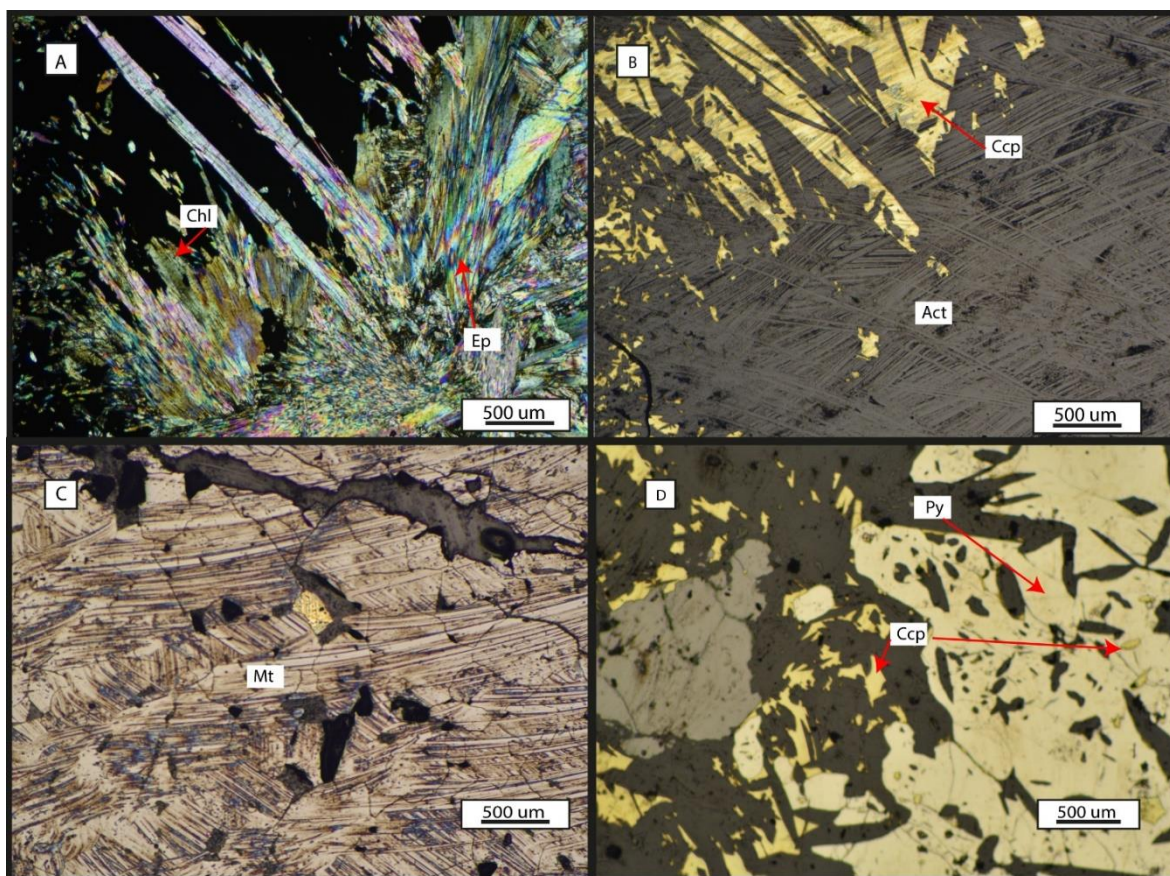
Roca intrusiva de composición andesítica. Textura porfídica. Los clastos alterados pervasivamente a feldespato potásico, cuarzo y anhidrita. Masa de microcristales de cuarzo, con menor cantidad de microcristales de feldespato y biotita, fenocristales de anhidrita. Es posible observar pequeños cristales (<0.1 mm) aciculares de apatito en la masa próximos a vetillas.

### Textura de actinolita

No se observa

<b>Minerales primarios y de alteración</b>		
<b>Mineral</b>	<b>(%)</b>	<b>Características</b>
Sericita	30	Alterando a la masa.
Calcita	5	Cristales anhedrales (<0.1-1 mm) en vetilla y cúmulos.
Apatito	5	Pequeños cristales (<0.1mm) aciculares.
Cuarzo secundario	10	Cristales anhedrales (0.1-1 mm) en vetilla y cúmulos.
Biotita secundaria	8	Sobre cristales de cuarzo.
Anhidrita	25	Cristales anhedrales (<0.1-1 mm) en vetilla y cúmulos.
Clorita	15	Reemplazando cristales de biotita secundaria, color azul berlín.
<b>Minerales opacos</b>		
<b>Mineral</b>	<b>%</b>	<b>Características</b>
Pirita	2	Rellenando intersticios.

## Muestra: Iman09-4



### Microfotografía

- A. Actinolita acicular radial grano medio alterada por clorita y epidota. Nícoles cruzados.
- B. Misma fotografía A luz reflejada. Calcopirita masiva intercrecida con actinolita.
- C. Magnetita masiva martitizada. Luz reflejada.
- D. Pirita masiva con inclusiones de calcopirita, magnetita y calcopirita en relleno de espacios. Luz reflejada.

### Características generales

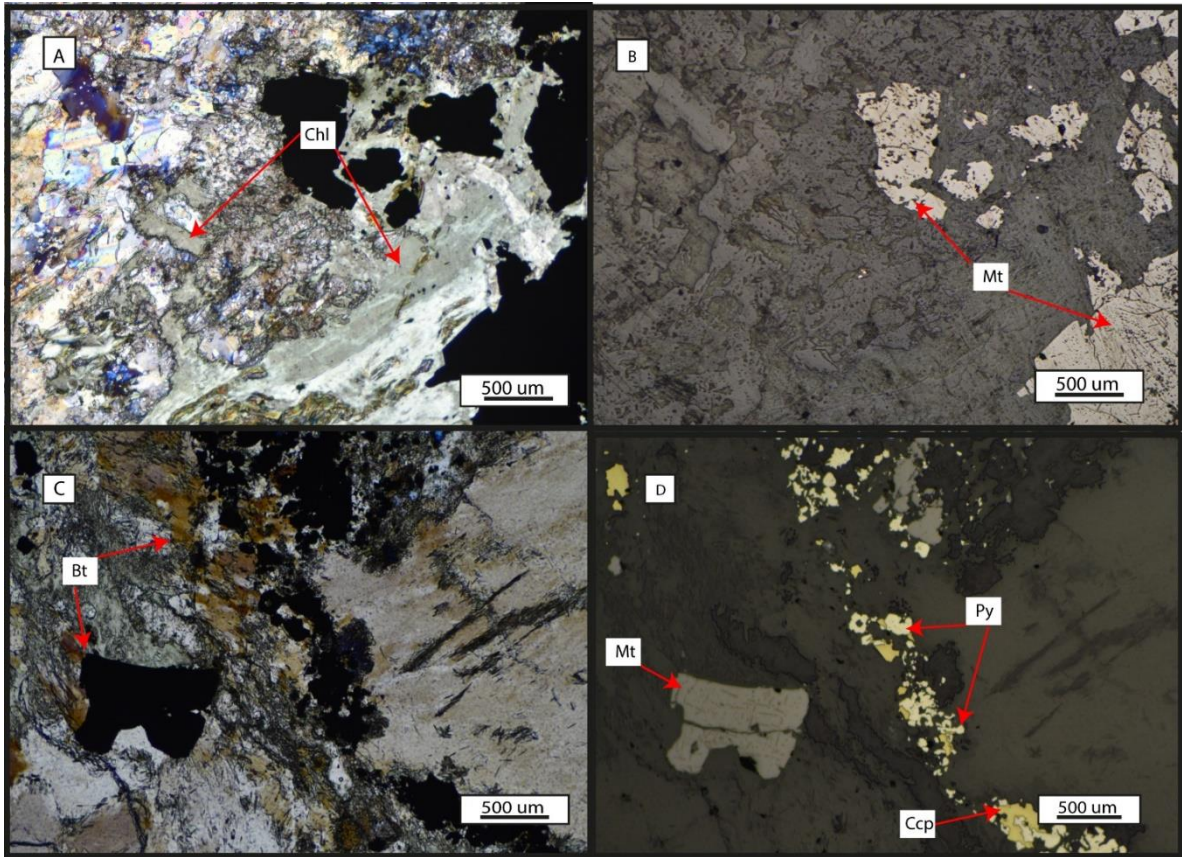
Cuerpo de magnetita masiva. Cristales aciculares radiales de actinolita siendo alterados por clorita, biotita y epidota manto de arlequín. Cristales de actinolita y biotita grano medio totalmente alterados por clorita. Microcristales de biotita alterando bordes de cristales. Los opacos corresponden principalmente a pirita intercrecida con fenocristales al igual que calcopirita, esta última se encuentra a la vez como inclusión rellenando surcos en pirita masiva. También se distingue magnetita masiva martitizada que previamente fracturó cristales de actinolita.

### Textura de actinolita

Cristales fibrosos y aciculares radiales grano medio (1-5 mm) reemplazados por biotita secundaria, epidota y clorita.

<b>Minerales primarios y de alteración</b>		
<b>Mineral</b>	<b>(%)</b>	<b>Características</b>
Clorita	12	Reemplazando cristales de biotita.
Epidota	12	Reemplazando cristales de biotita.
Actinolita	30	Cristales fibrosos (0.5mm) y aciculares radiales (3 mm) reemplazados por biotita, clorita y epidota
<b>Minerales opacos</b>		
<b>Mineral</b>	<b>%</b>	<b>Características</b>
Magnetita	20	Masiva martitzada.
Pirita	10	Masiva en zonas de fractura.
Calcopirita	16	Masiva en zonas de fractura y como inclusión en pirita.

## Muestra: Iman12B-6



### Microfotografía

- A. Clorita alterando la roca. Nicoles cruzados.
- B. Misma fotografía A luz reflejada. Magnetita masiva rellenando intersticios.
- C. Biotita alterando la roca. Nicoles cruzados.
- D. Misma fotografía C luz reflejada. Se observa pirita y calcopirita en veta y magnetita rellenando cavidades.

### Características generales

Roca intrusiva de composición diorítica. Textura porfírica. Masa microcristalina alterada a sericita, y alteración posterior clorita-epidota. Cristales de epidota euhedrales grano grueso, junto a cristales fibrosos de actinolita también alterados sobre una masa fina muy cloritizada. Biotita siendo alterada a clorita azul berlín. Microcristales aciculares de apatito principalmente sobre anhidrita y cúmulos de microcristales de epidota con biotita. También se observan microcristales de biotita secundaria alterando principalmente a actinolita y bordes de otros fenocristales. Con respecto a los opacos es posible distinguir una vetilla de cristales anhedral de pirita y en menor cantidad calcopirita, estos también se encuentran diseminados en la muestra alterando principalmente la masa y cristales de mayor tamaño subhedrales de pirita con algunos de calcopirita inmersos. Hay presencia de magnetita masiva subhedral que alteró la masa de la roca y otra magnetita tardía euhedral que precipitó posteriormente rellenando espacios dejados por la alteración.

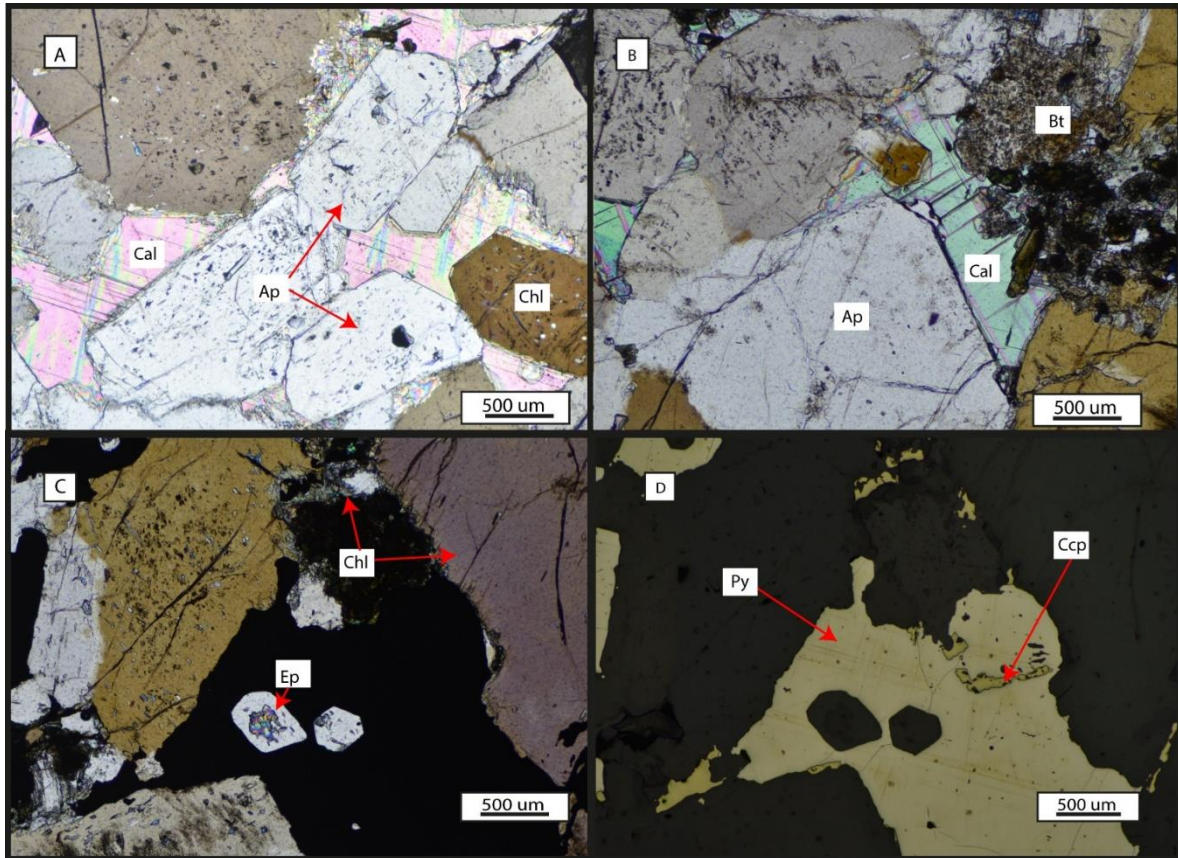
### Textura de actinolita

Cristales fibrosos de actinolita grano medio (1-5 mm) alterados a clorita.

<b>Minerales primarios y de alteración</b>		
<b>Mineral</b>	<b>(%)</b>	<b>Características</b>
Sericita	8	Alterando minerales de roca caja.
Arcillas	12	Alterando minerales de roca caja.
Clorita	30	Se observa alterando a toda la roca, posterior a todas las alteraciones.
Anhidrita	1	Intersticial
Apatito	3	Cúmulos de pequeños cristales aciculares (<0.1 mm).
Biotita	5	En bordes minerales (<0.5 mm) siendo alterada por colita-epidota
Actinolita	2	Cristales fibrosos (1 mm) incoloros reemplazados por biotita secundaria
Epidota	9	Cristales subhedrales (0.1-1 mm) alterados por clorita
<b>Minerales opacos</b>		
<b>Mineral</b>	<b>%</b>	<b>Características</b>
Magnetita	15	Cristales subhedrales (<0.5-1) relleno de oquedades de fenocristales lixiviados.
Pirita	7	Relleno de pequeñas oquedades dejadas por la alteración
Calcopirita	8	Relleno de pequeñas oquedades dejadas por la alteración



## Muestra: Iman12B-7



### Microfotografía

- A. Apatito y clorita secundaria sobre masa intersticial de calcita. Nicoles cruzados.
- B. Apatito y clorita secundaria sobre masa intersticial de calcita. Nicoles cruzados
- C. Apatito, clorita secundaria y epidota en intersticios de apatito junto a opacos. Nicoles cruzados.
- D. Misma fotografía C luz reflejada. Pirita y calcopirita masiva relleno de cavidades.

### Características generales

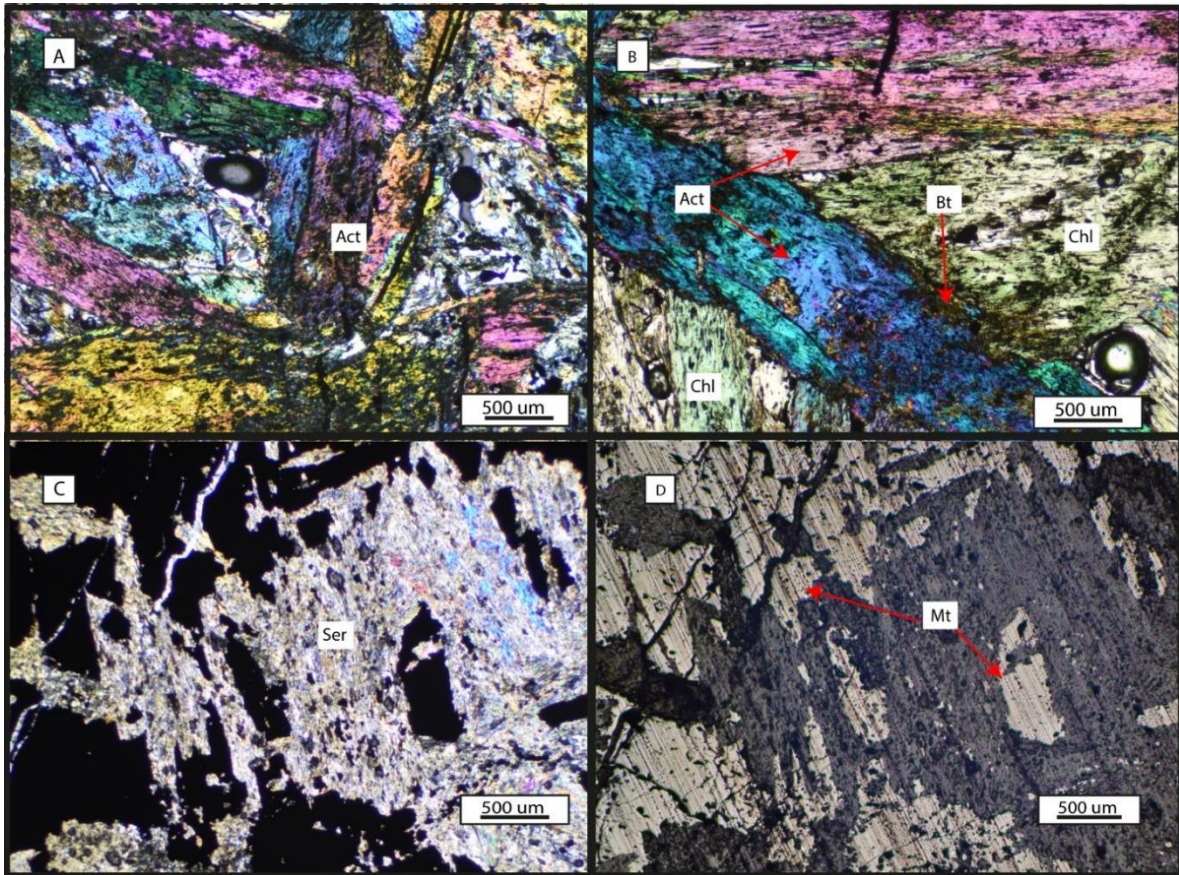
Roca intrusiva de composición diorítica. Textura fanerítica. Cristales de apatito inmersos en calcita intersticial. Una masa muy fina de sericita verde por alteración de clorita, con cristales de epidota, clorita y biotita. Clorita formada por alteración de biotita secundaria. En cuanto a los opacos se distingue pirita y calcopirita relleno de espacios. Y magnetita en zonas de alteración fuerte de sericita.

### Textura de actinolita

No se observa.

<b>Minerales primarios y de alteración</b>		
<b>Mineral</b>	<b>(%)</b>	<b>Características</b>
Clorita	5	Anhedral, alterando máficos.
Calcita	15	Intersticial.
Apatito	15	Cúmulos de cristales euhedrales de distintos tamaños y hábitos (0.5-5 mm) asociado a biotita secundaria.
Cuarzo	35	Cristales de grano fino a medio (0.5-5mm)
Sericita	5	Alterando minerales de roca caja.
Biotita	5	Secundaria siendo reemplazada por clorita y primaria sericitizada.
<b>Minerales opacos</b>		
<b>Mineral</b>	<b>%</b>	<b>Características</b>
Magnetita	5	Relleno de oquedades.
Pirita	10	Relleno de oquedades.
Calcopirita	5	Relleno de oquedades y como inclusión en pirita.

## Muestra: Iman14-01



### Microfotografía

- A. Actinolita acicular radial grano medio. Nicoles cruzados.
- B. Actinolita grano grueso alterada por biotita y clorita. Nicoles cruzados.
- C. Fenocristales de roca caja alterados a sericita. Nicoles cruzados.
- D. Misma fotografía C luz reflejada. Muestra magnetita masiva relleno de cavidades dejadas por alteración.

### Características generales

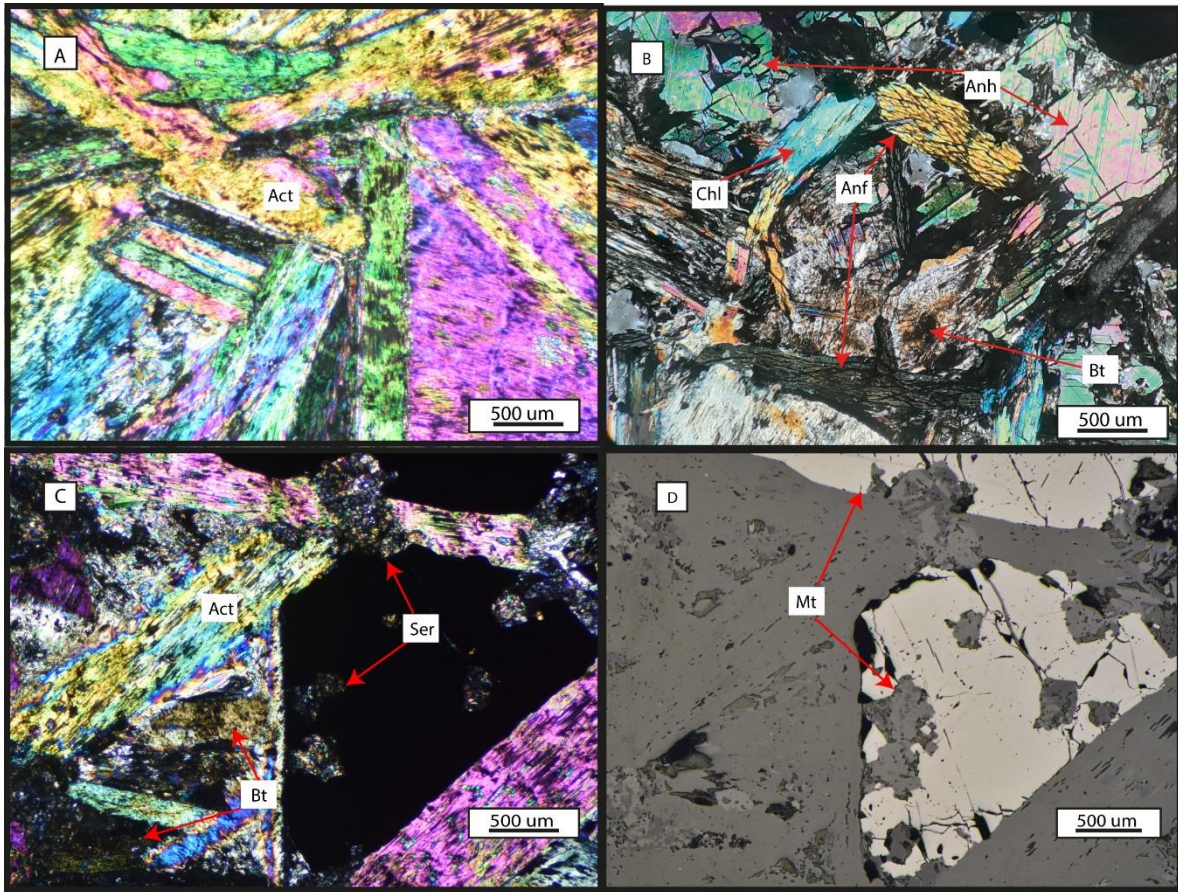
Roca intrusiva de composición diorítica. Textura fanerítica. Cristales fibrosos grano grueso de actinolita intercrecidos con magnetita prismática fuertemente alterados. Grandes cristales de color verde pálido de biotita primaria alterándose a clorita y biotita tardía alterando bordes cristalinos. Cristales fibrosos de actinolita grano medio fracturados por magnetita subhedral. Zona de biotita con apatito fino euhedral y sericita, también relictos de roca caja fuertemente alterados por la asociación sericita, clorita-epidota y posterior cristalización de biotita. Fluido de magnetita precipitó en los intersticios dejados por la alteración, también en menor cantidad calcopirita con pirita.

### Textura de actinolita

Cristales fibrosos grano medio (1-5 mm) alterados a biotita secundaria y grano grueso (5 mm – 3 cm) acicular radial alterados a clorita. Ambos con sericitización moderada.

<b>Minerales primarios y de alteración</b>		
<b>Mineral</b>	<b>(%)</b>	<b>Características</b>
Clorita	6	Reemplazando a actinolita, biotita y arcillas.
Actinolita	25	Cristales de grano medio a grueso (1-8mm) fibrosos alterados.
Biotita	6	Secundaria alterando a cristales de actinolita y primaria alterada a clorita, también cristales de biotita secundaria grano fino como alteración final.
Epidota	2	Entre cristales de actinolita.
Sericita	15	Alteración tardía de la roca.
Cuarzo	8	En intersticios de actinolita, como mineral primario siendo sericitizado.
Arcillas	5	Alterando minerales de roca caja, es cloritizada.
Turmalina	3	Cristales anhedrales (<0.1 mm), asociados a biotita sericitizada.
<b>Minerales opacos</b>		
<b>Mineral</b>	<b>%</b>	<b>Características</b>
Magnetita	15	Masiva, relleno de cavidades dejadas por la alteración.
Pirita	10	Masiva, relleno de cavidades dejadas por la alteración.
Calcopirita	4	Masiva, de cavidades dejadas por la alteración.
Bornita	1	Bordes de reemplazo en pirita.

## Muestra: Iman14-03



### Microfotografía

- Actinolita grano medio acicular radial. Nicoles cruzados.
- Anhidrita intersticial con cristales de hornblenda y clorita. Nicoles cruzados.
- Actinolita alterándose a clorita y biotita, con seritización. Nicoles cruzados.
- Misma fotografía C luz reflejada. Magnetita subhedral rellenando cavidades.

### Características generales

Roca intrusiva de composición diorítica. Textura fanerítica. Actinolita fibrosa grano grueso presenta alteración epidota-sericita y biotita alterando los bordes. Entre cristales se observan microcristales de epidota fibrosos manto de arlequín y cristales de biotita secundaria alterándose a clorita, también se observan cristales intersticiales de anhidrita. La masa corresponde principalmente a microcristales de epidota con sericita.

### Textura de actinolita

Cristales aciculares radiales grano grueso (5 mm – 3 cm) y cristales fibrosos grano medio (1-5 mm) tardíos.

<b>Minerales primarios y de alteración</b>		
<b>Mineral</b>	<b>(%)</b>	<b>Características</b>
Actinolita	30	Cristales aciculares radiales de grano medio a grueso (1-5 mm), alterada a clorita.
Epidota	6	Microcristales y cristales anhedrales grano fino, entre actinolitas.
Clorita	8	Cristales grano medio intercrecidos con actinolita y alterando a actinolita.
Anhidrita	1	Agregado cristalino sobre la masa.
Calcita	1	Agregado cristalino sobre la masa.
Sericita	10	Alterando fenocristales y cuarzo primario.
Diasporo	1	En fracturas de actinolita.
Arcilla	5	Alterando la masa de la roca caja.
Cuarzo primario	4	Microcristales sericitizados
Biotita secundaria	4	Asociada a arcillas y sericita.
Hornblenda	5	Cristales de roca caja siendo alterados.
<b>Minerales opacos</b>		
<b>Mineral</b>	<b>%</b>	<b>Características</b>
Magnetita	25	Masiva, relleno de oquedades.

**Anexo B. Imágenes BSE SEM.**

**Muestra: ELI-1**

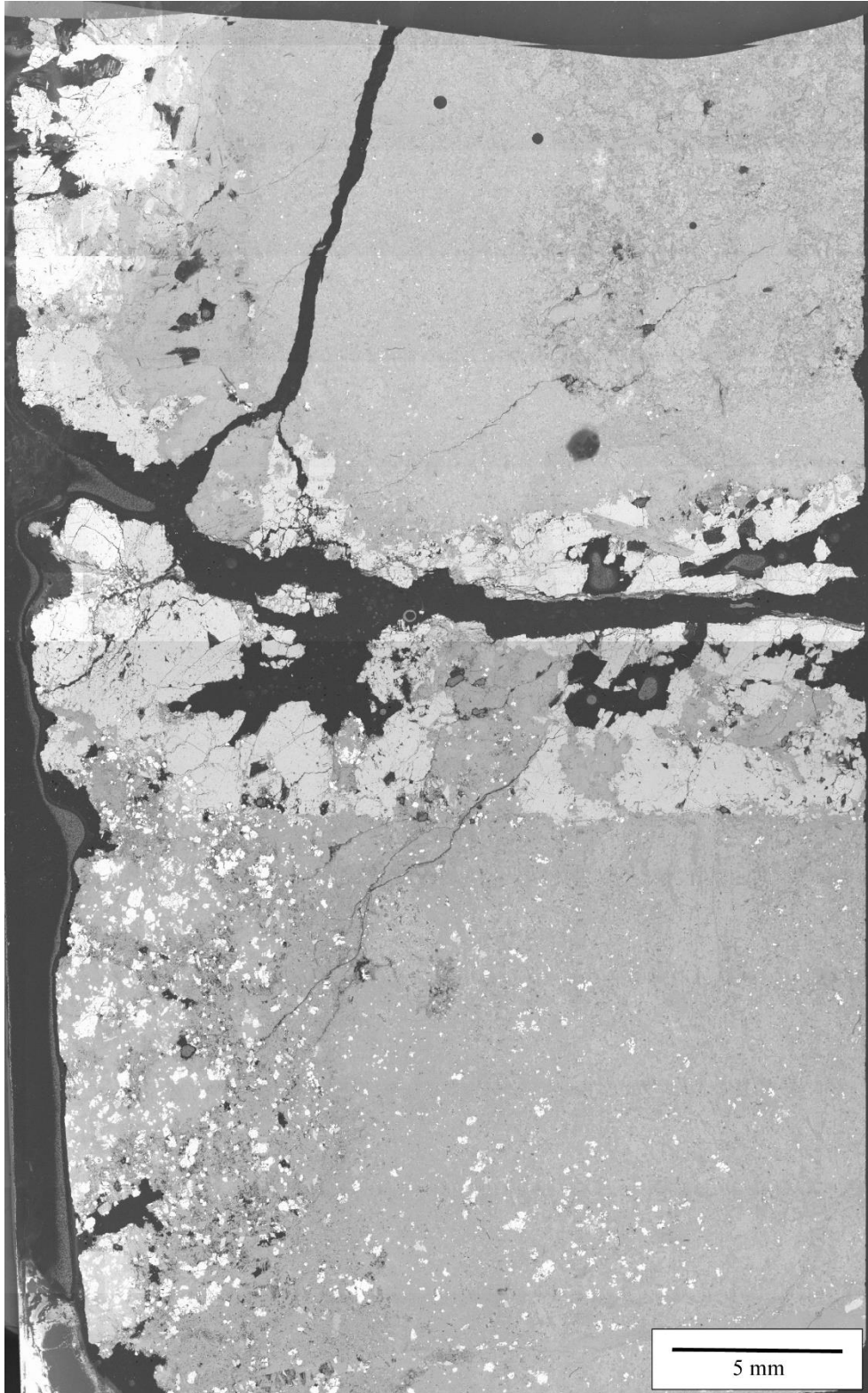
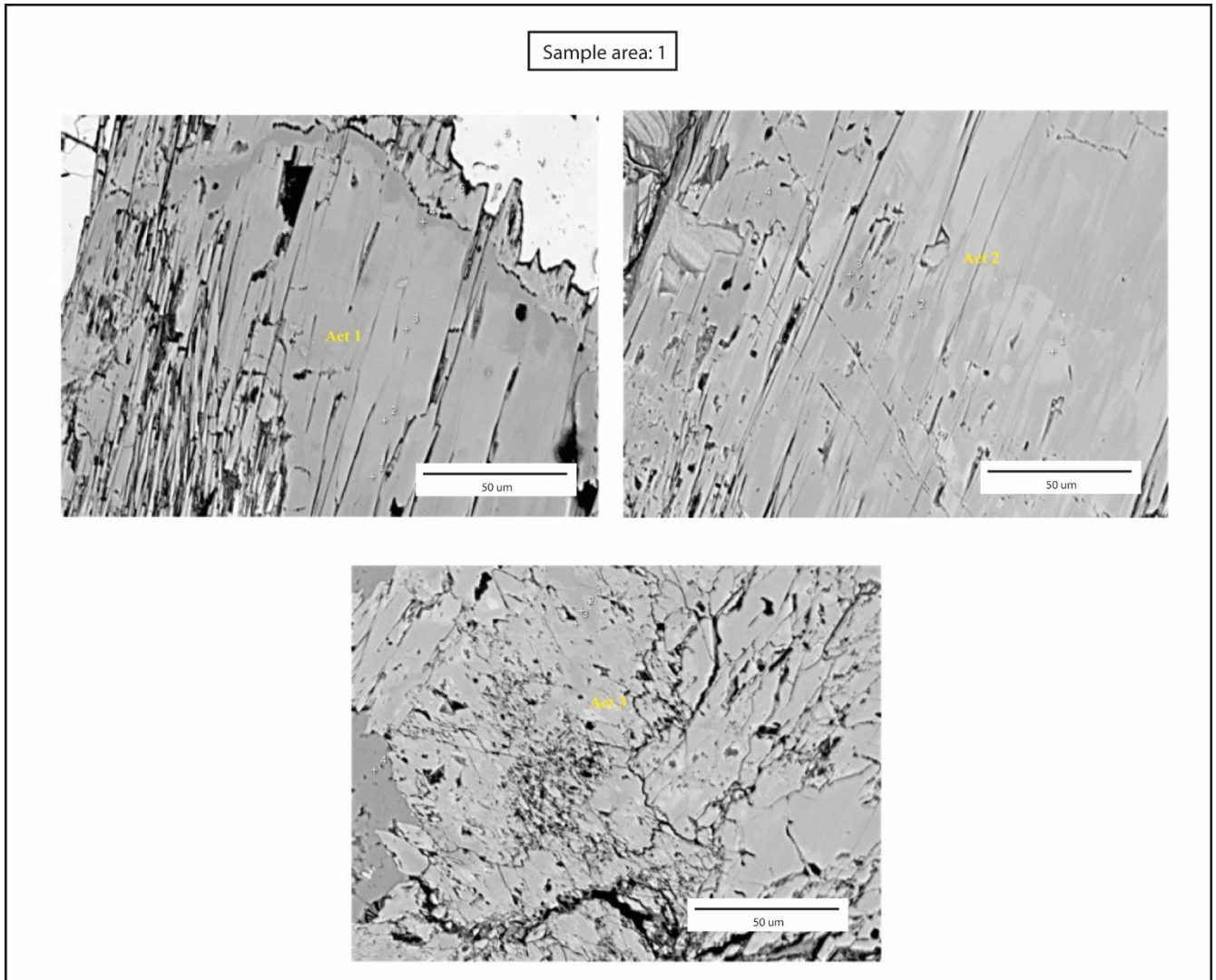


Figura 1: Imágenes BSE de actinolitas analizadas en la muestra ELI-1.





**Muestra: ELI-3**

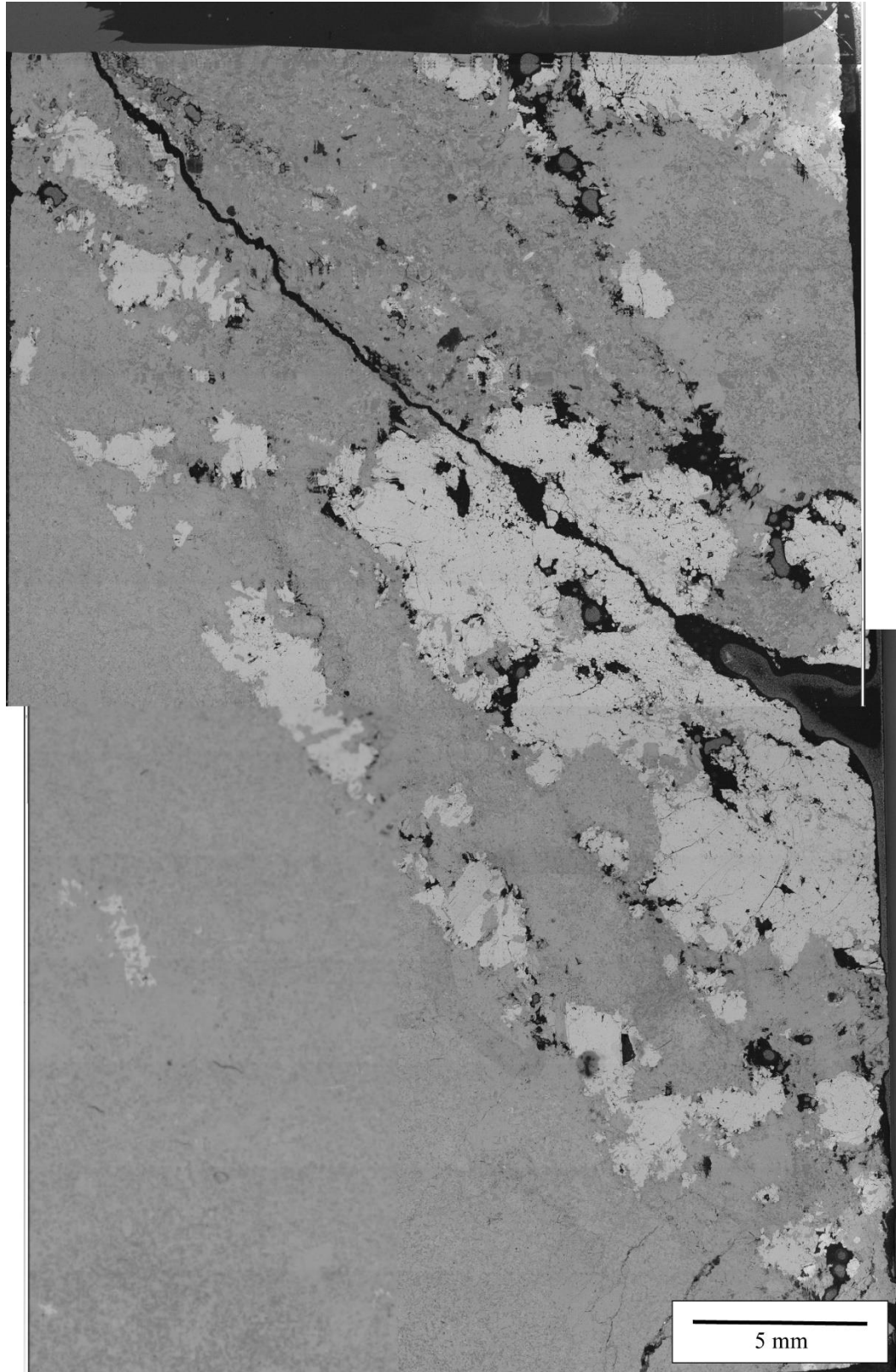
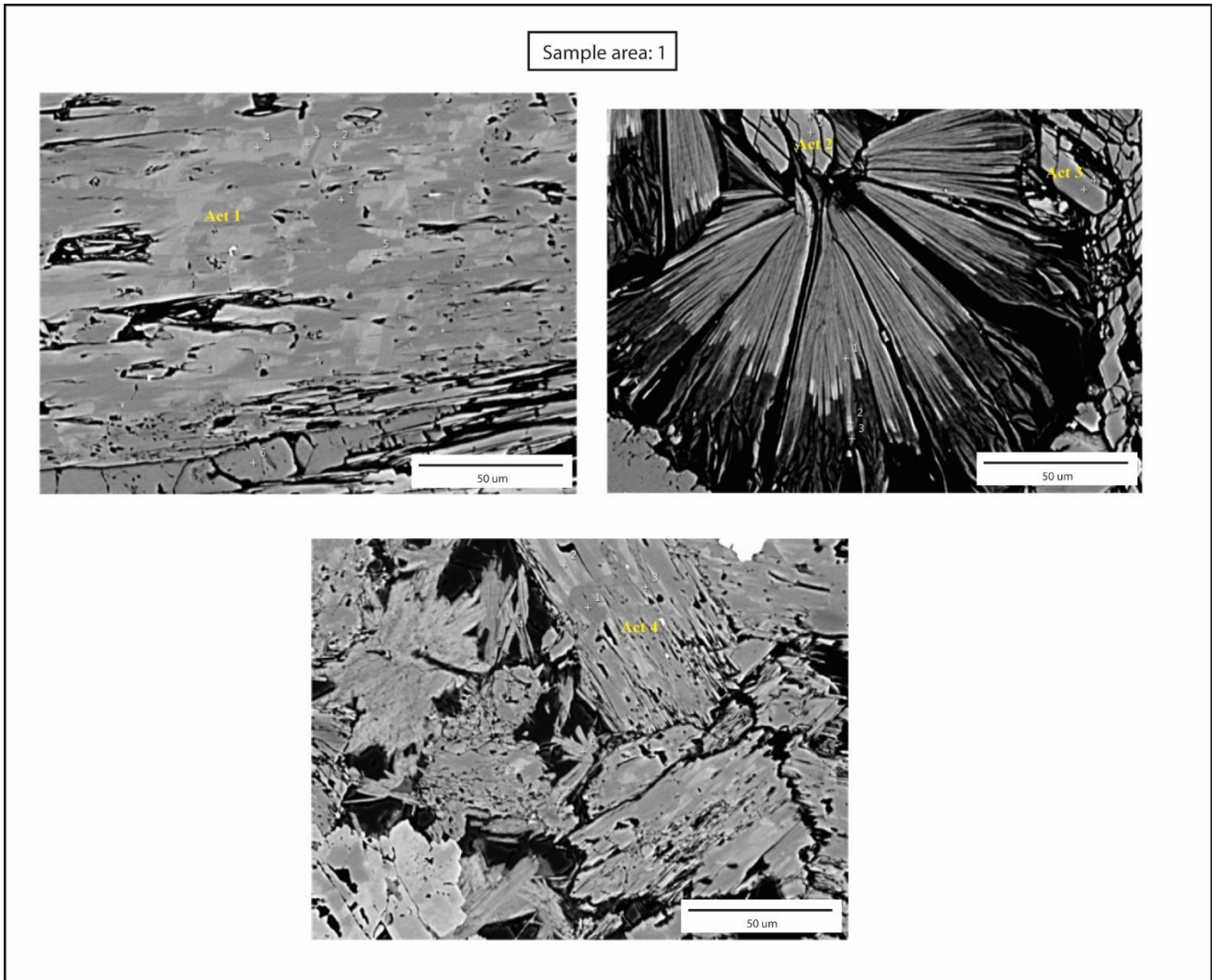


Figura 2: Imágenes BSE de actinolitas analizadas en la muestra ELI-3.



Muestra: CAM2

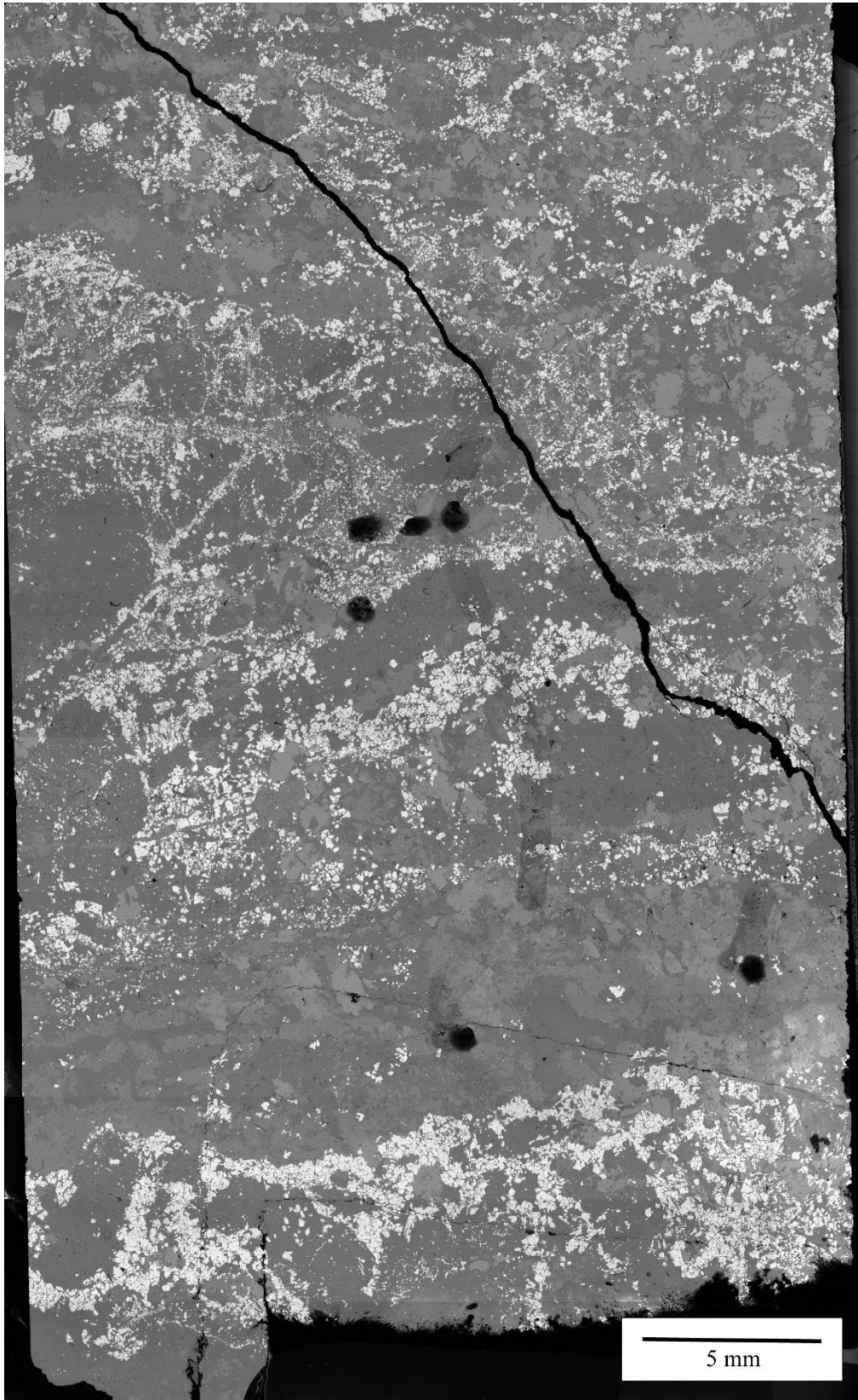
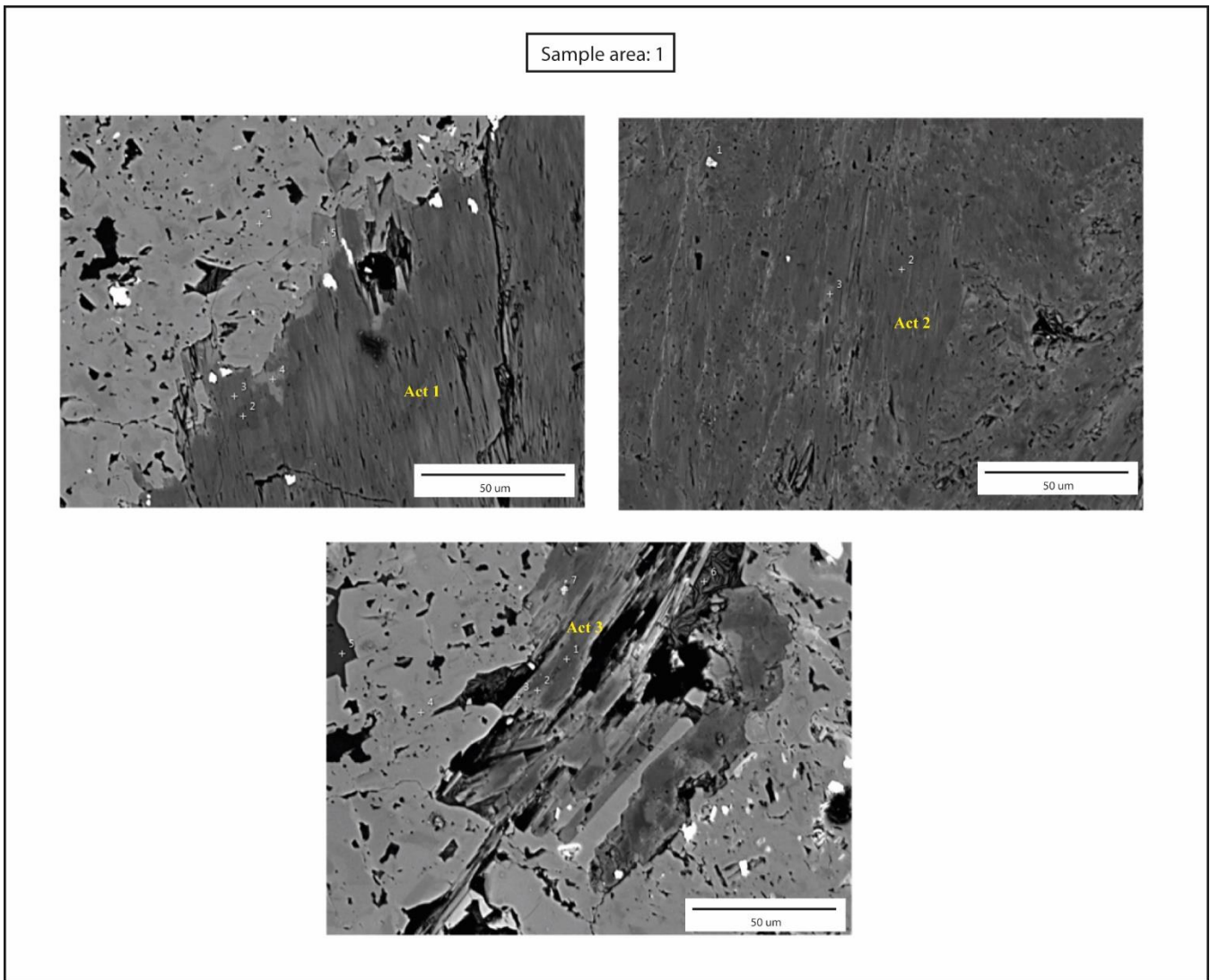
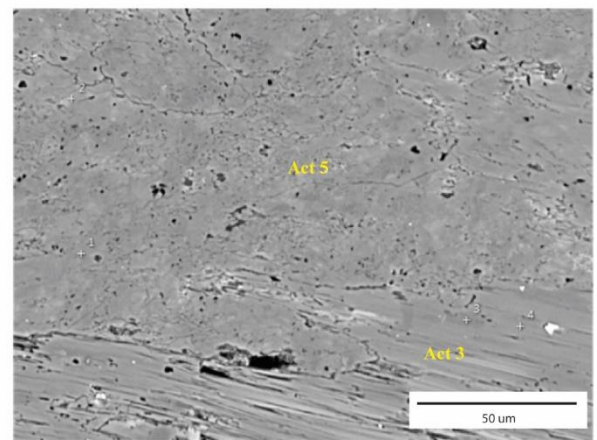
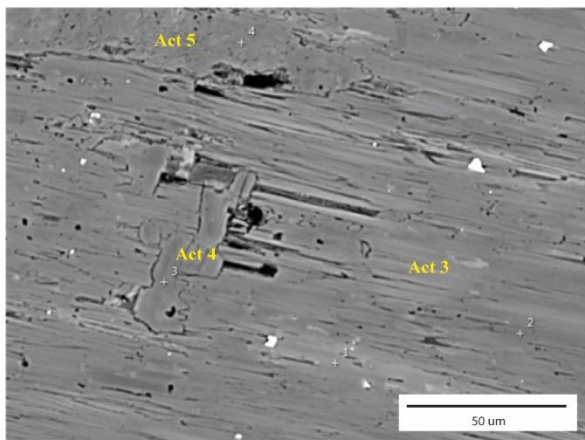
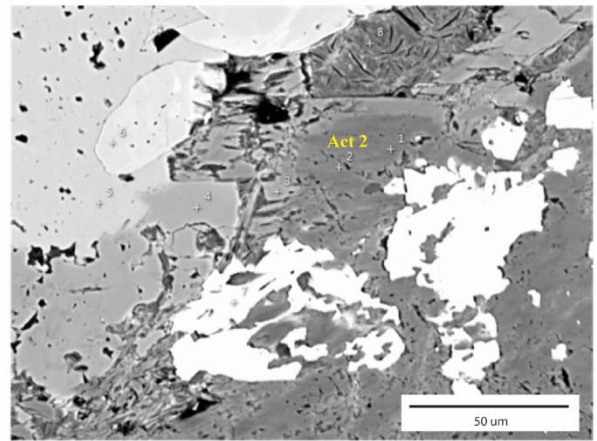
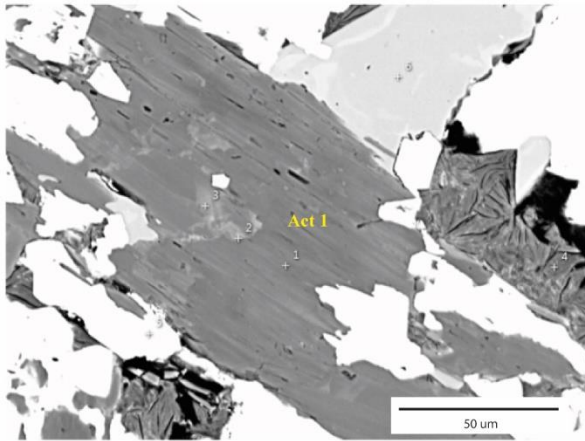


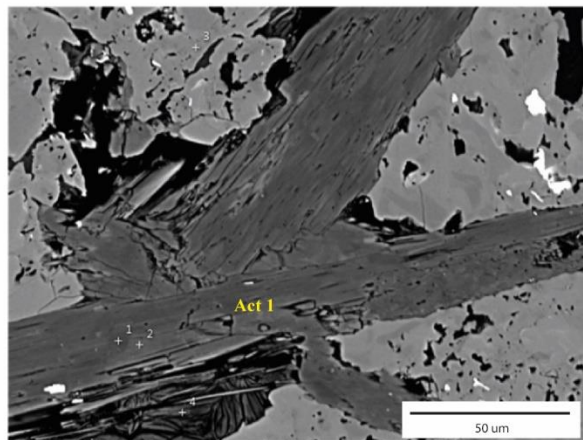
Figura 3 Imágenes BSE de actinolitas analizadas en la muestra CAM2.



Sample area: 2



Sample area: 3



Muestra: CAM12

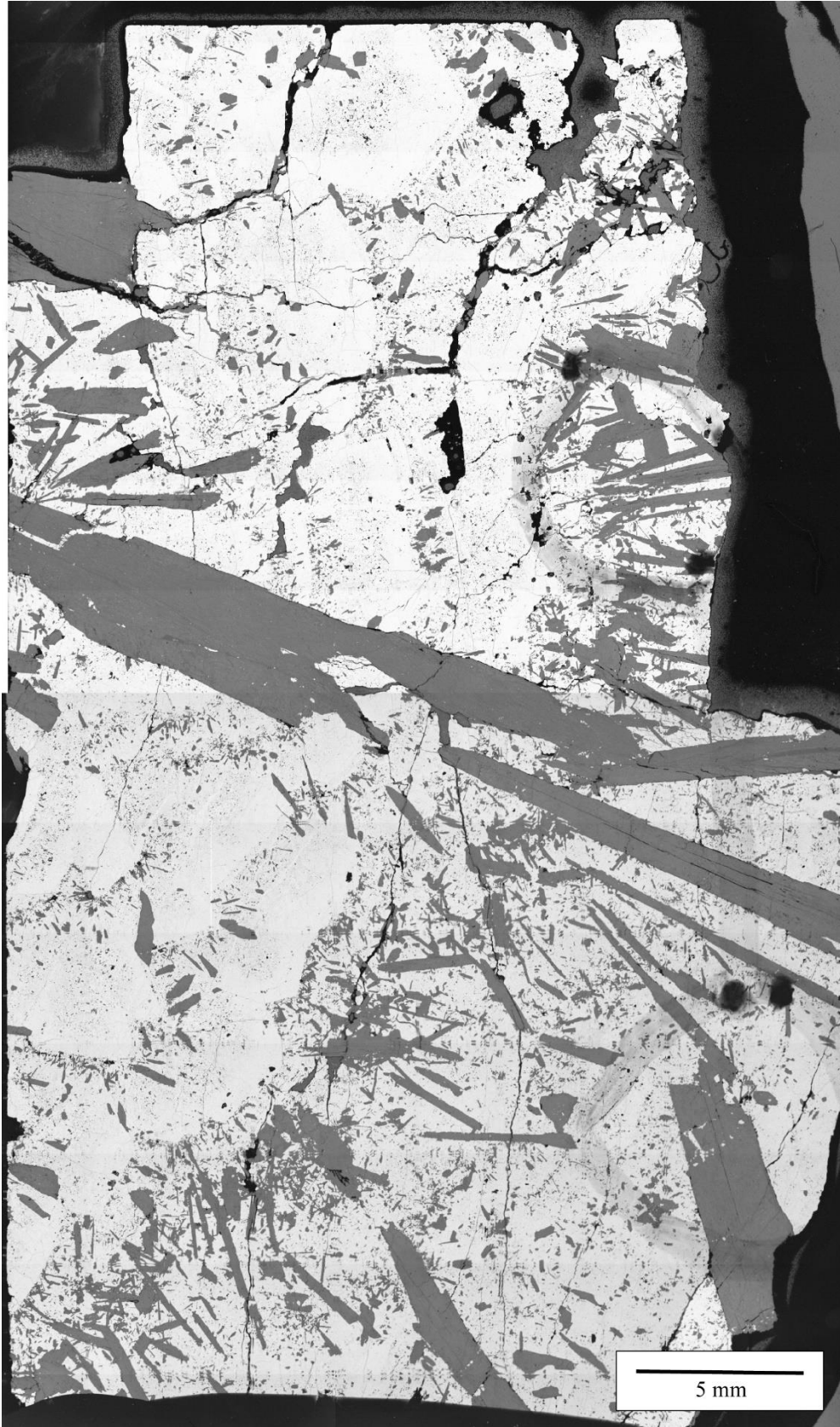
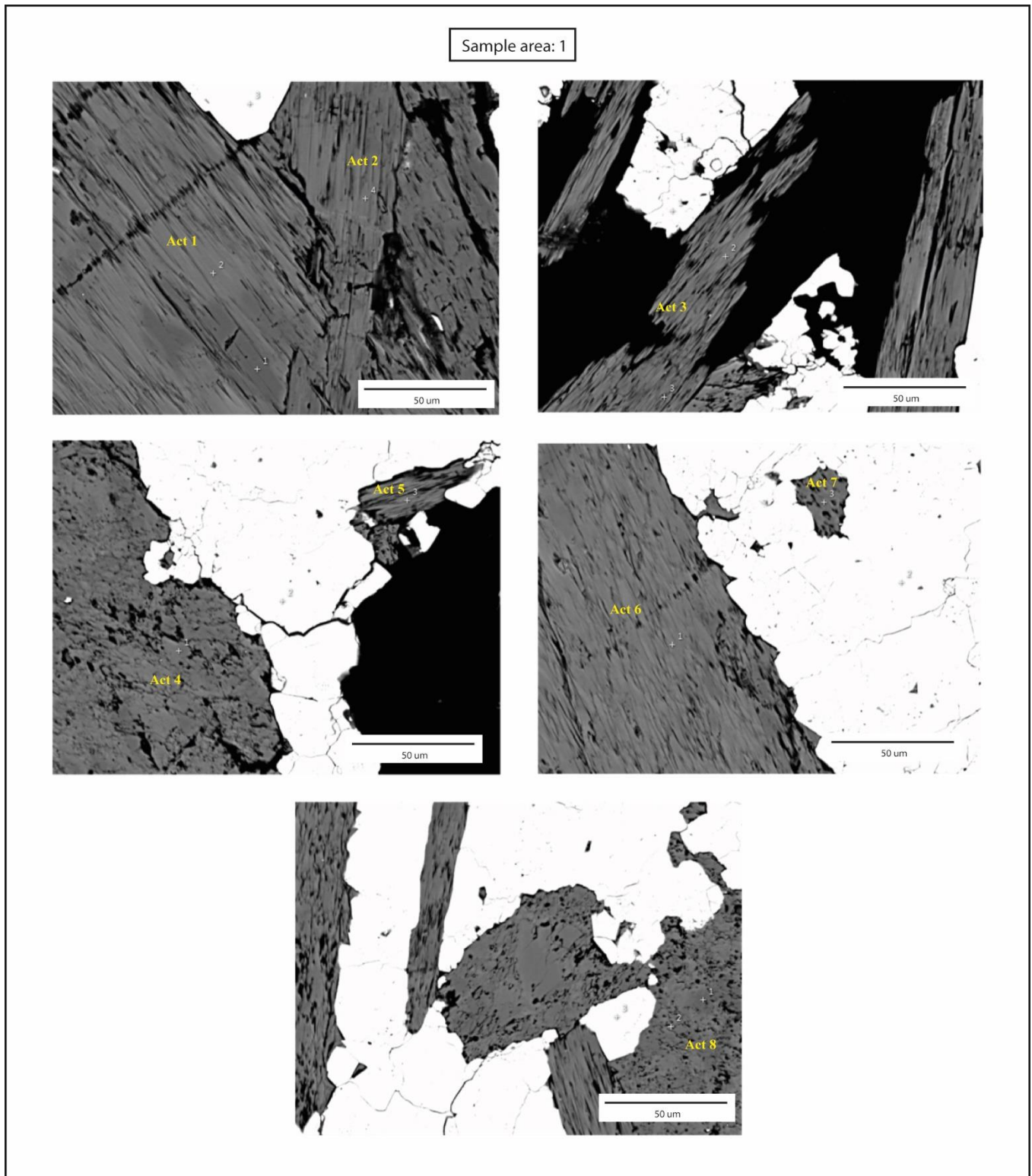
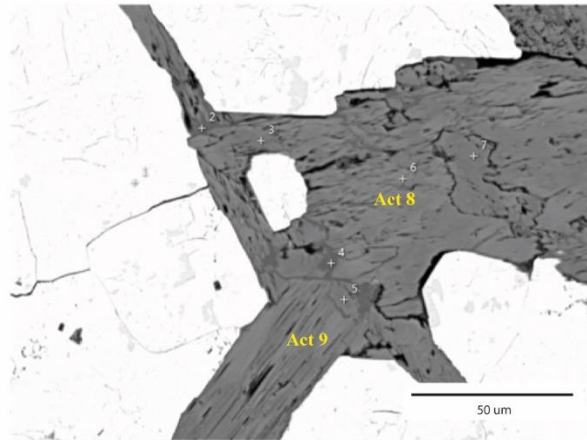
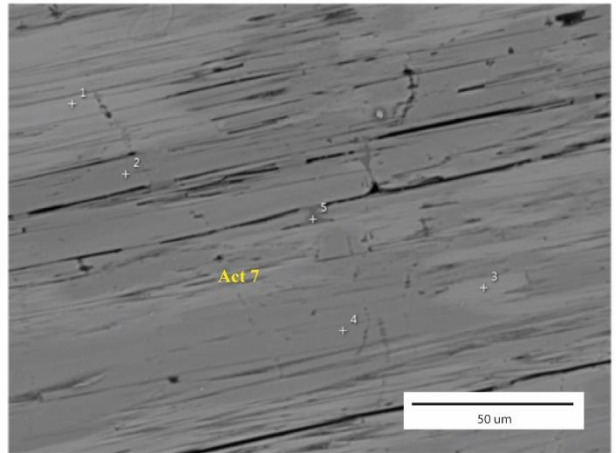
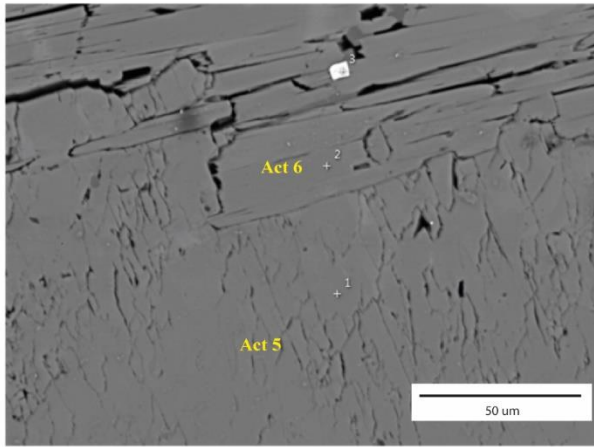
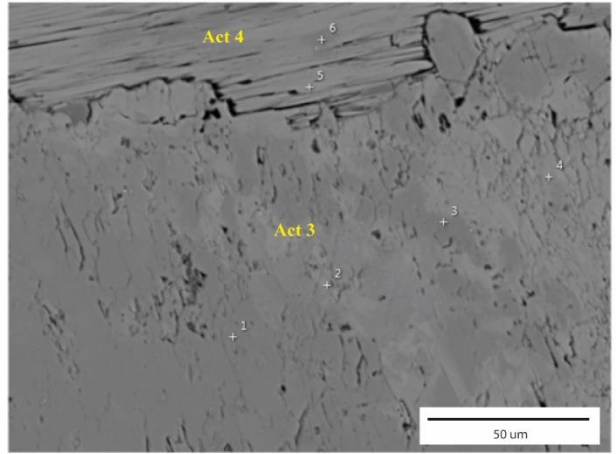
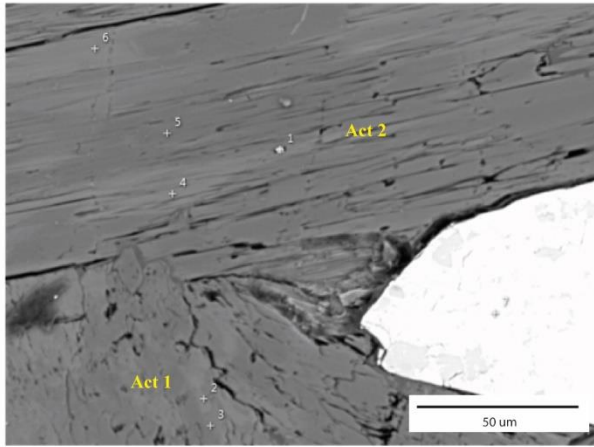


Figura 4: Imágenes BSE de actinolitas analizadas en la muestra CAM12



Sample area: 2





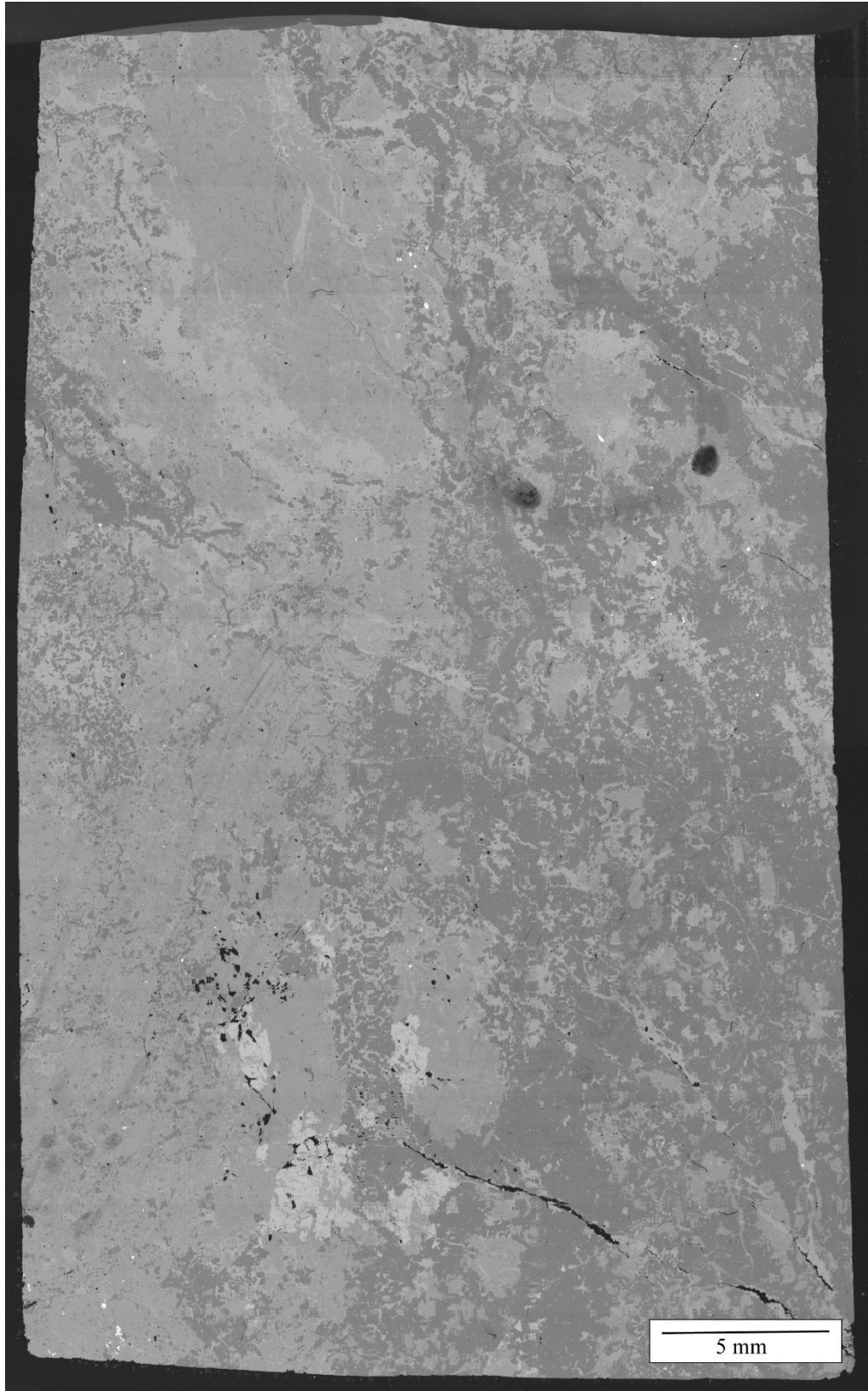
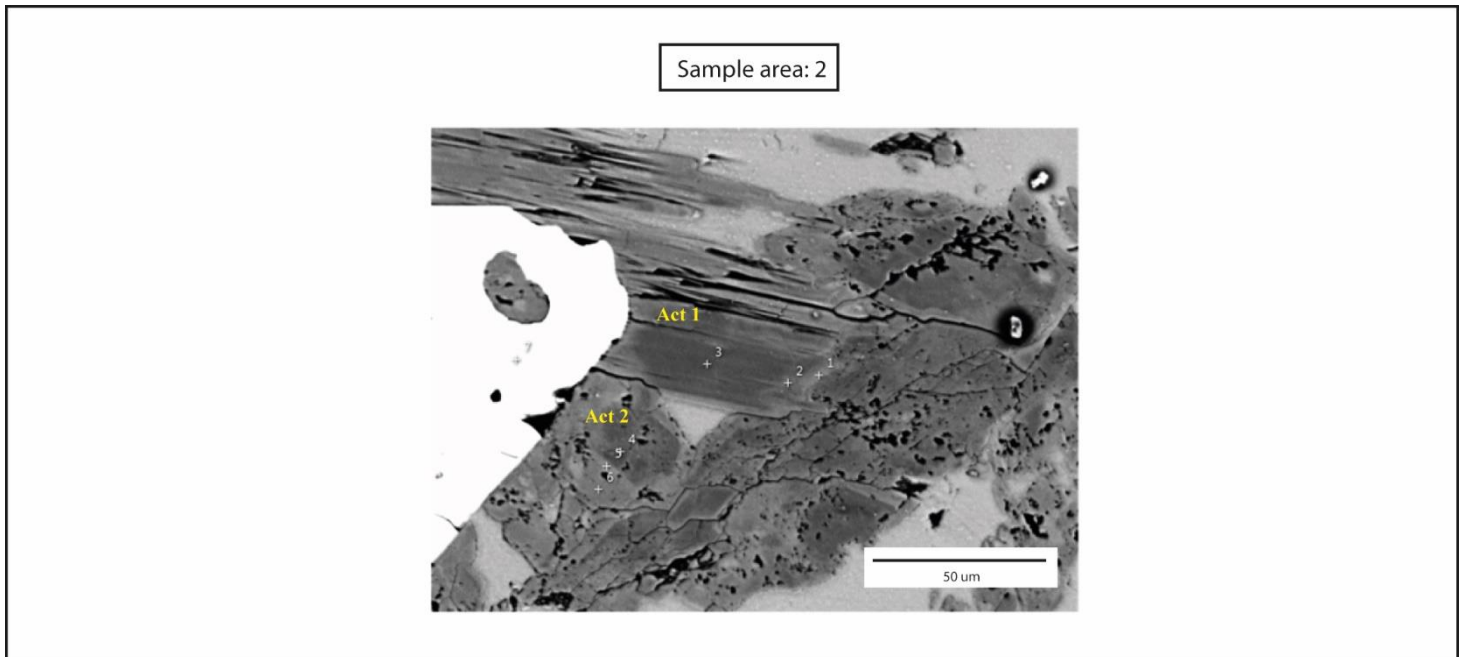
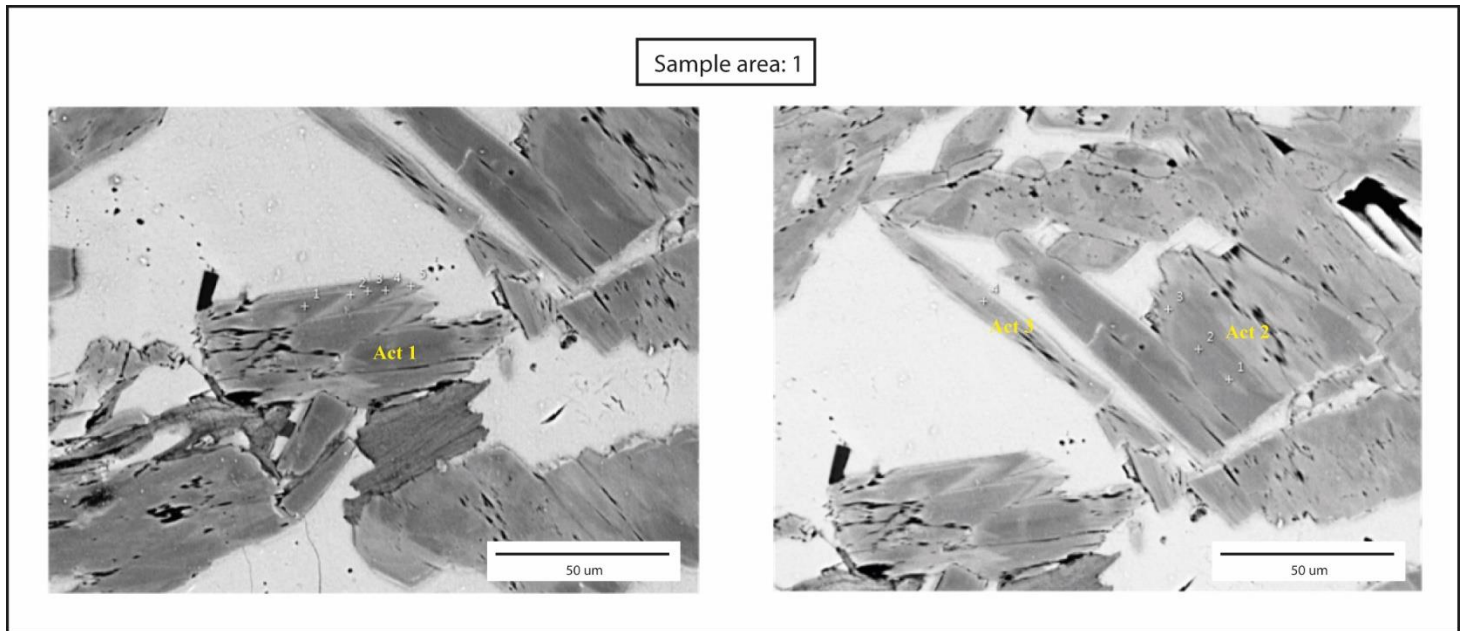


Figura 5: Imágenes BSE de actinolitas analizadas en la muestra Iman01-03.



**Muestra: Iman02-02**

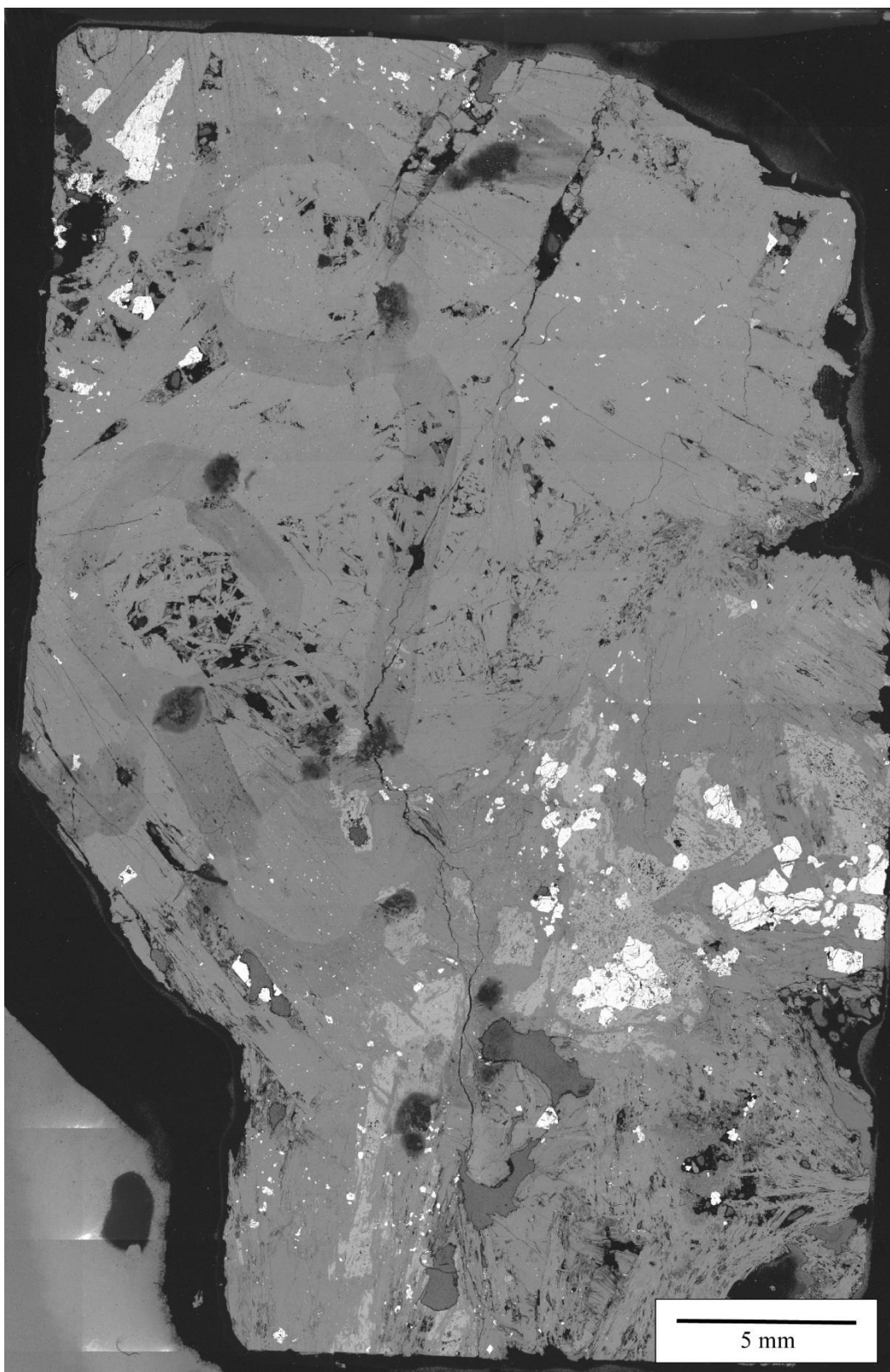
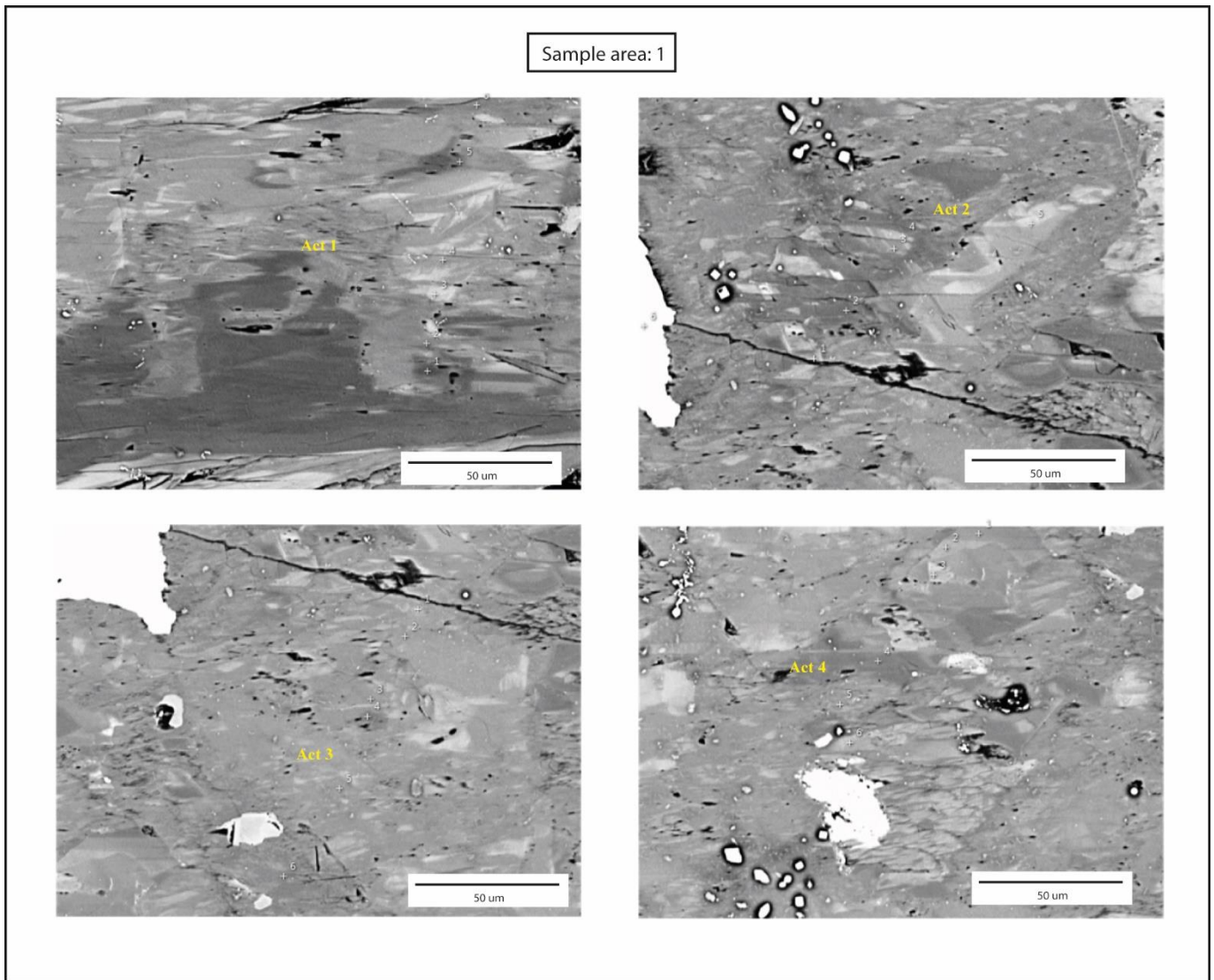
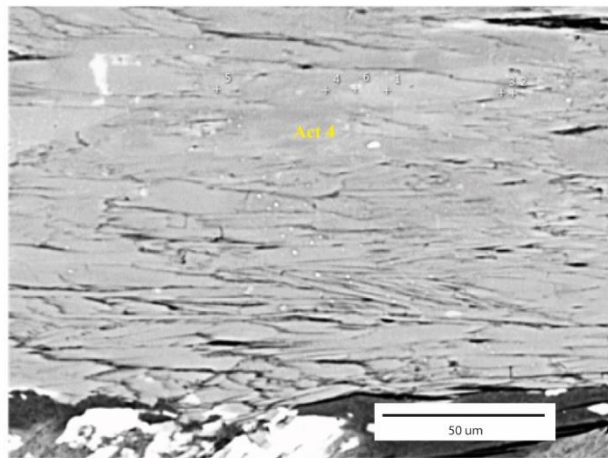
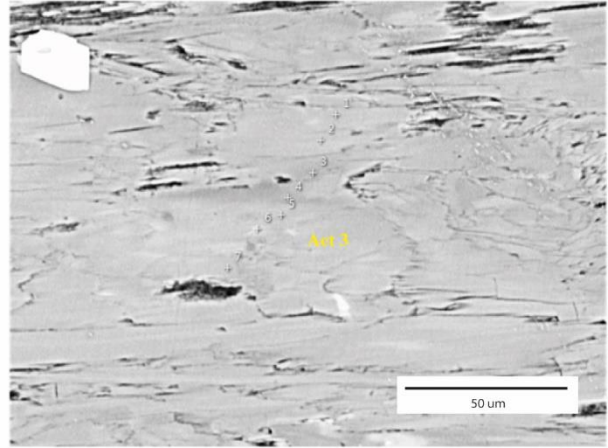
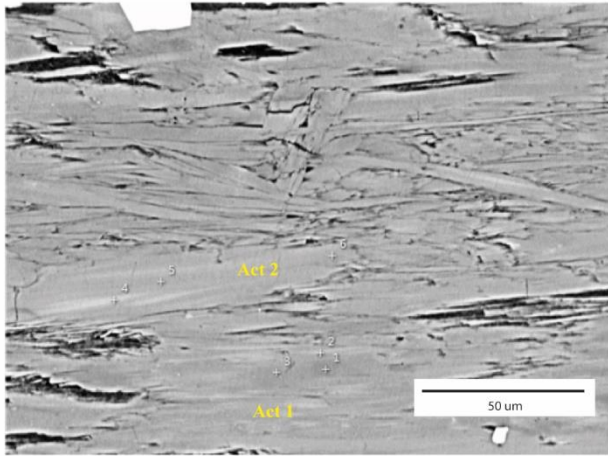


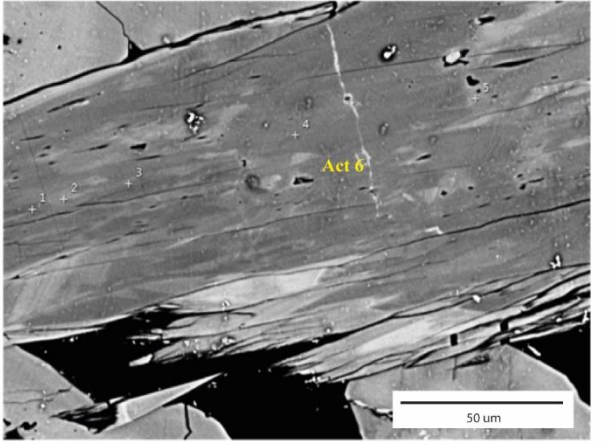
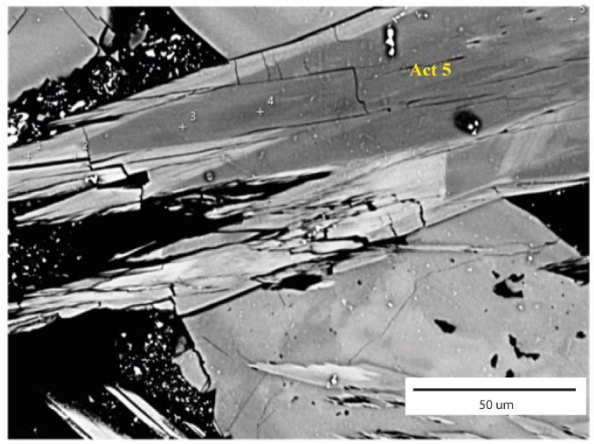
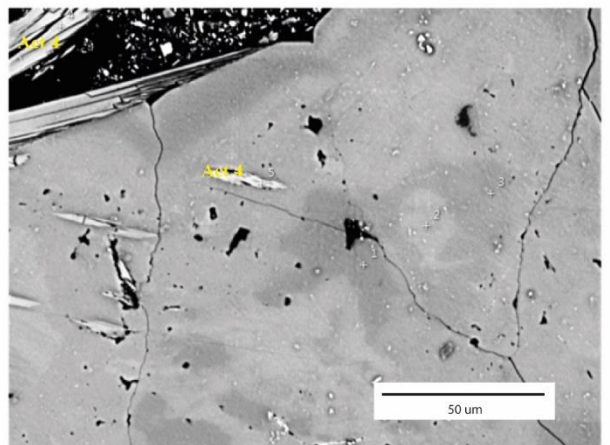
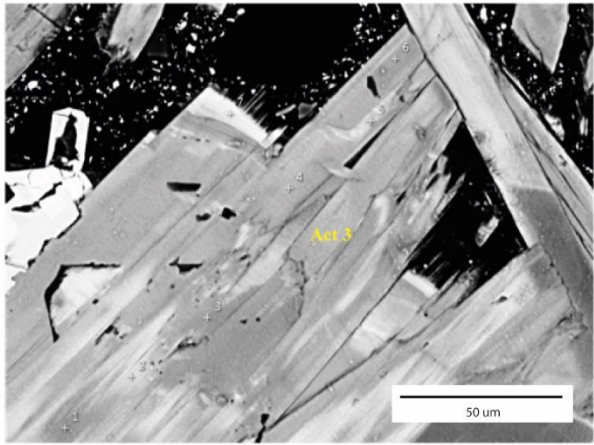
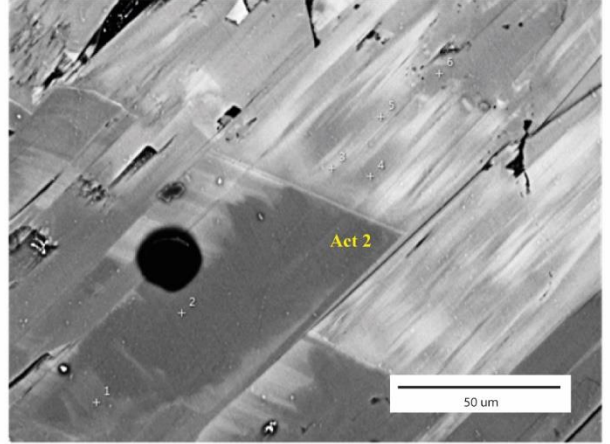
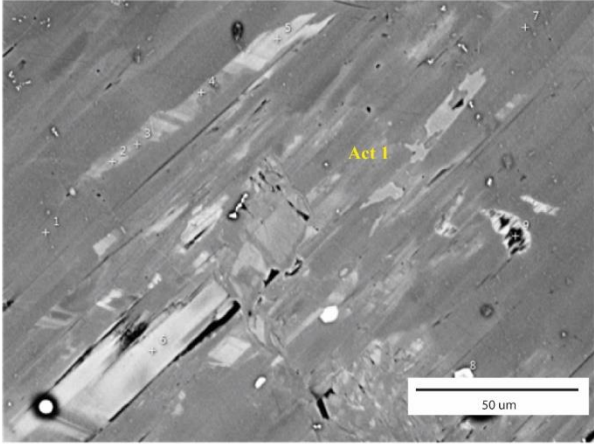
Figura 6: Imágenes BSE de actinolitas analizadas en la muestra Iman02-02.



Sample area: 2



Sample area: 3



Muestra: Iman14-01

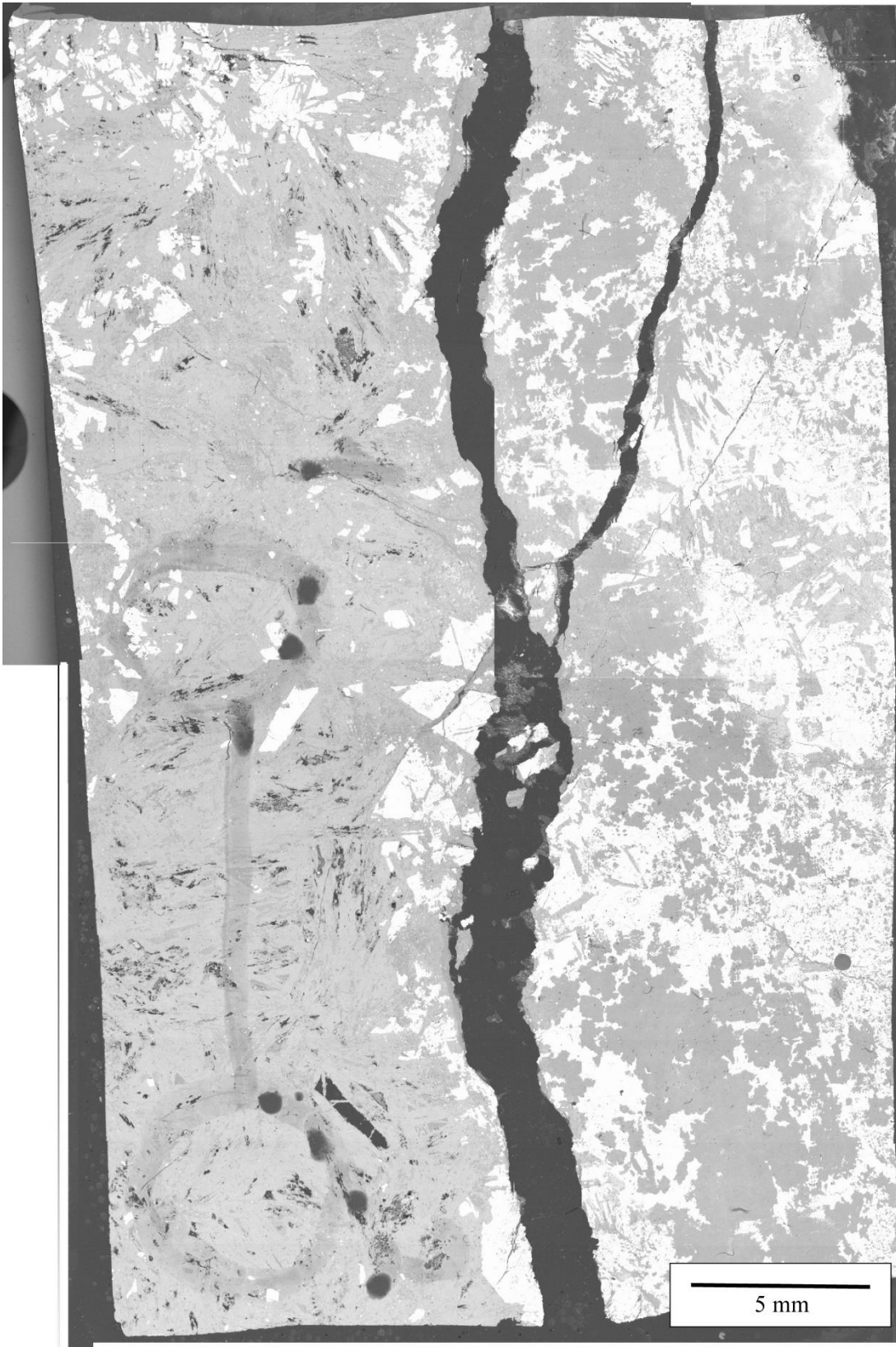
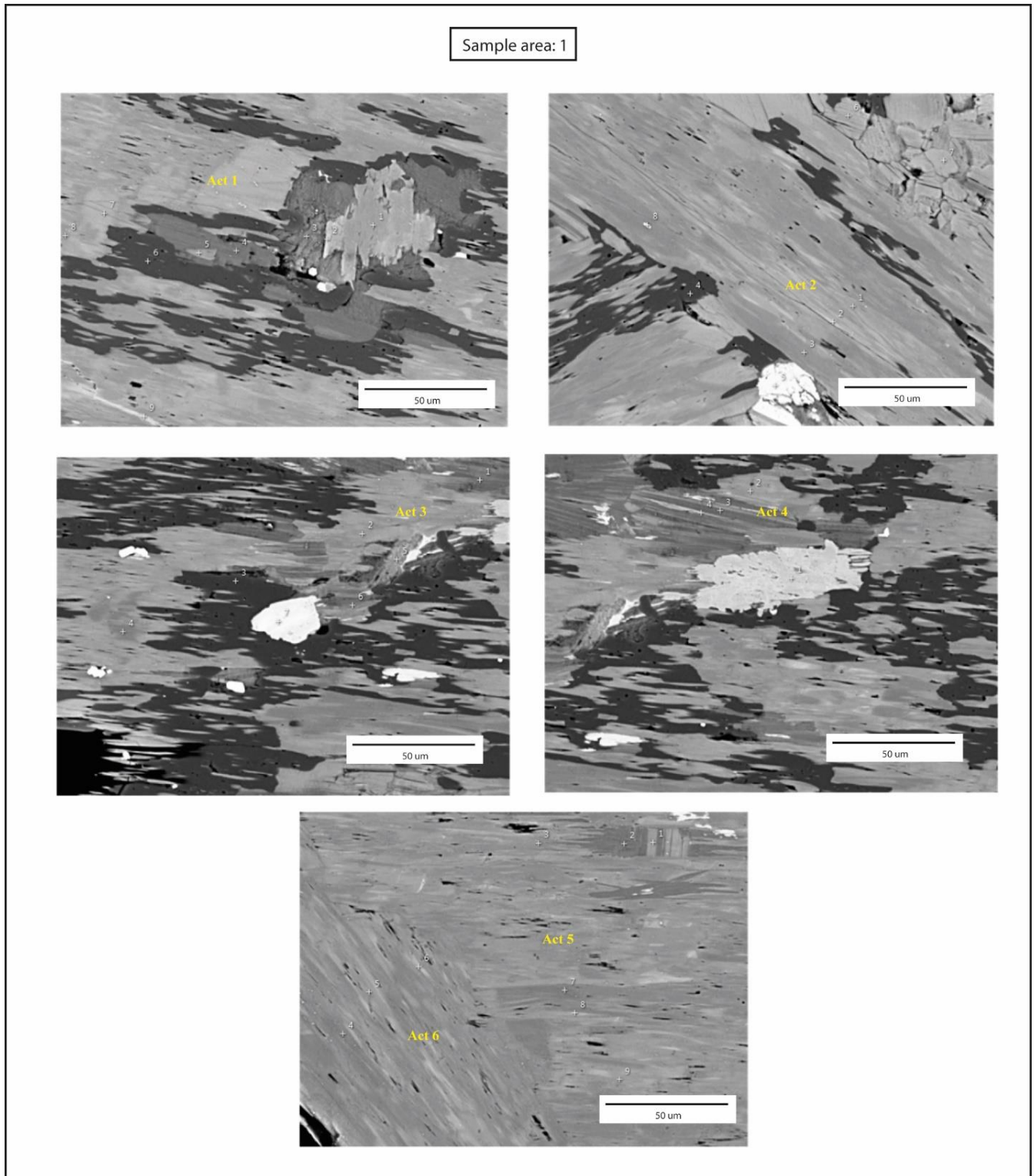
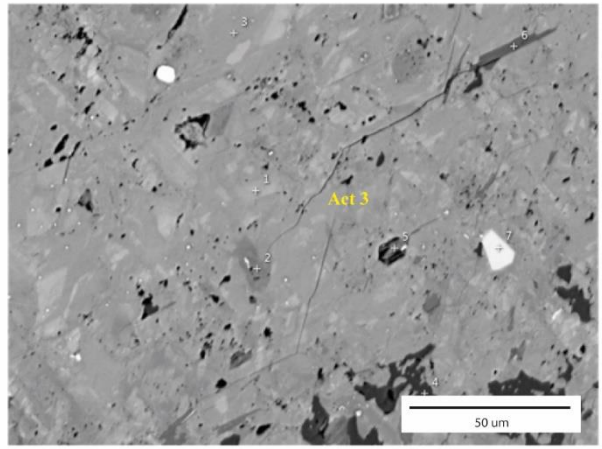
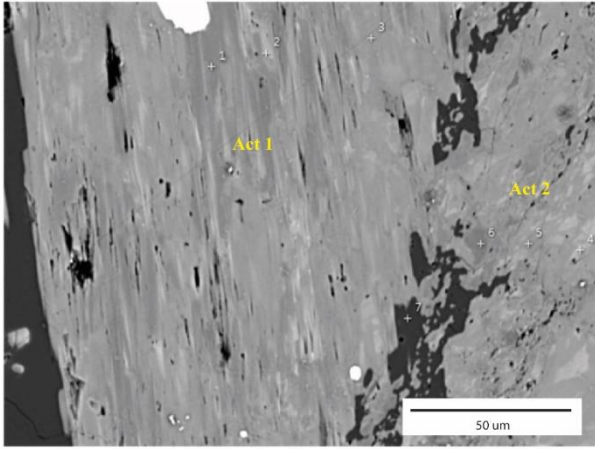


Figura 7: Imágenes BSE de actinolitas analizadas en la muestra Iman14-01.





Sample area: 2



Muestra: Iman14-03

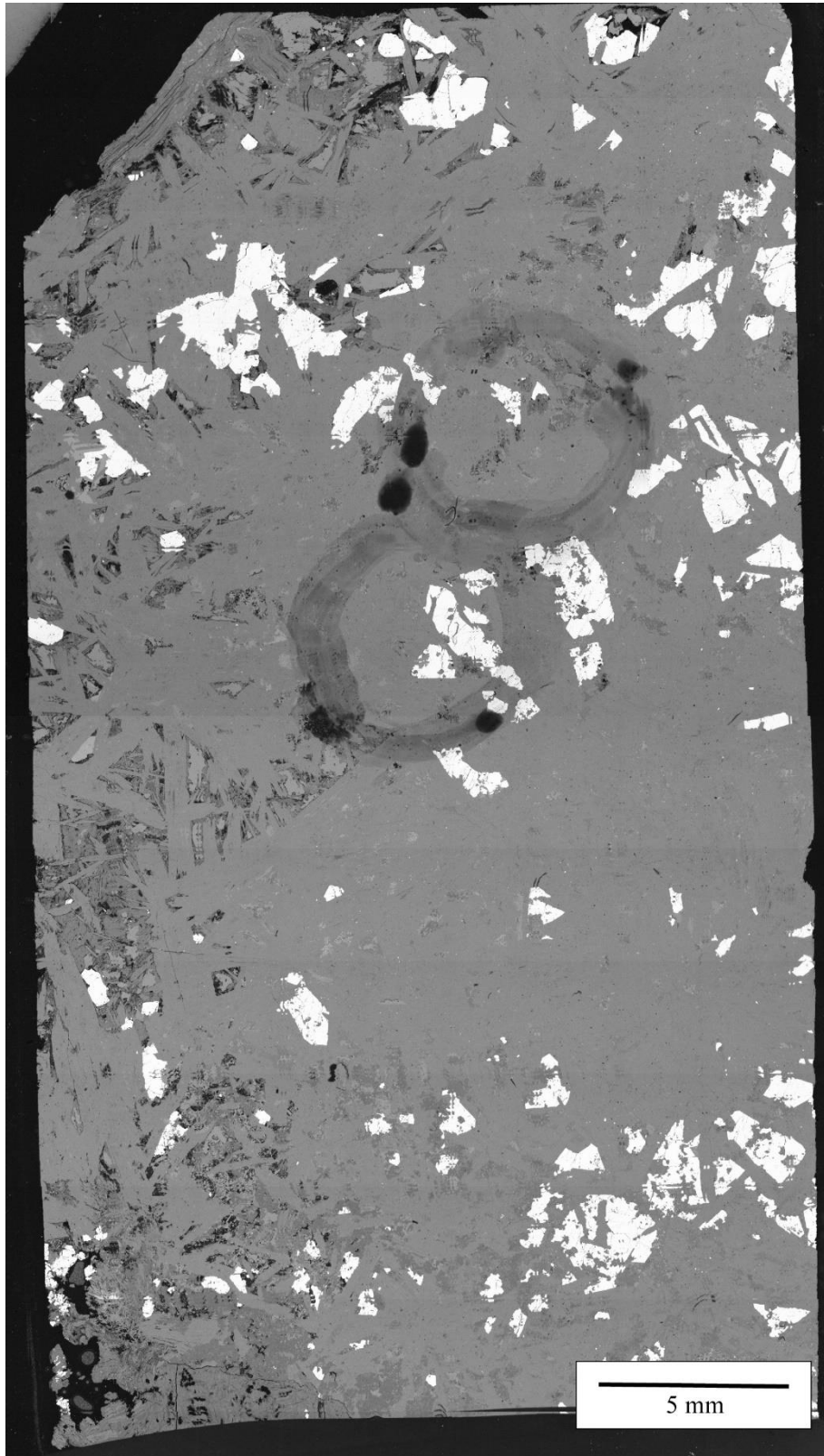
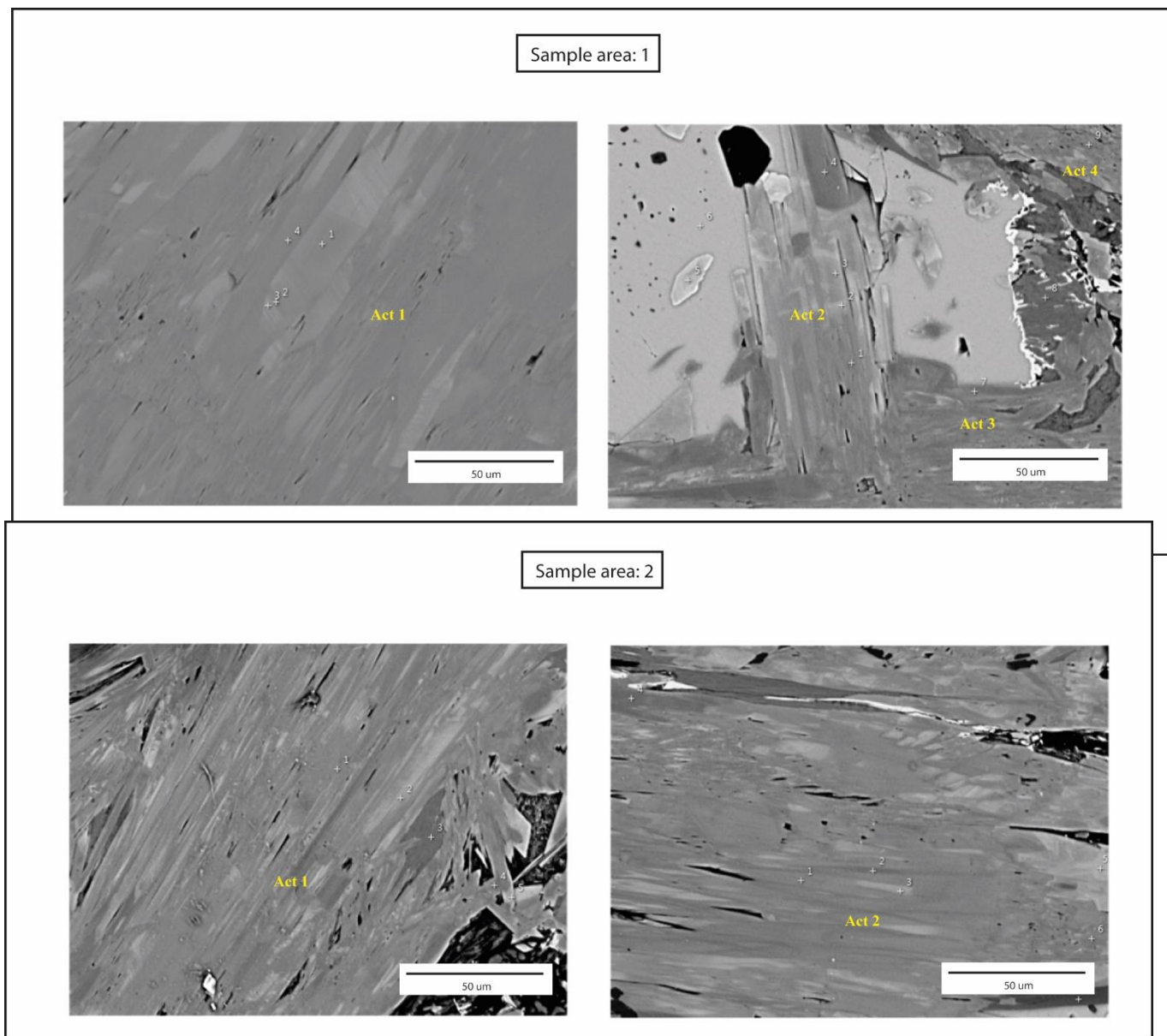
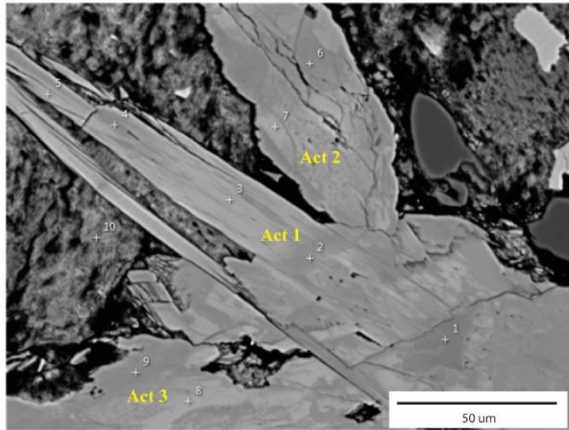


Figura 8: Imágenes BSE de actinolitas analizadas en la muestra Imán 14-03.



Sample area: 3



## Anexo C. Geoquímica de actinolitas analizadas mediante SEM.

A continuación, se presentan los datos obtenidos mediante SEM de algunos de los fenocristales de actinolita encontrados en las diferentes muestras.

**Tabla 1: Datos obtenidos mediante SEM de la muestra ELI-1, entregados en % atómico.**

Sample area	Sample amphibole	Sample point	Texture	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Total	Fe-number	Temperature (°C)
1	1	1	Intercrecimiento	65,21		9,11	1	18,01				4,06			2,61	100	0,22	789,5584471
1	1	2	Intercrecimiento	65,56		8,63	1,69	17,11		0,07		4,05			2,88	99,99	0,25	780,0499566
1	1	3	Intercrecimiento	65,65		8,45	1,57	17,27		0,08	0,09	3,96			2,93	100	0,26	777,5443761
1	1	4	Intercrecimiento	64,95		10,59	0,32	18,41				3,97			1,76	100	0,14	817,262753
1	1	5	Intercrecimiento	65,54		8,41	2,23	16,87		0,1	0,12	4,04	0,09		2,6	100	0,24	784,9105359
1	2	1	Intercrecimiento	65,59		7,96	1,93	17,28				3,99			3,26	100,01	0,29	766,114082
1	2	2	Intercrecimiento	65,7		9,35	0,68	17,95				3,99			2,33	100	0,20	797,5774829
1	2	3	Intercrecimiento	64,98		10,44	1,17	17,56				3,82			1,48	99,45	0,12	823,602349
1	2	4	Intercrecimiento	65,68		9,72	0,5	18,24				3,85			2,01	100	0,17	807,2966752
1	3	1	acumulada	65,66		8,95	1,24	17,48		0,21	0,11	3,91			2,44	100	0,21	792,4859526
1	3	2	acumulada	65,35		9,71	1,43	17,15		0,1		3,81	0,09		1,87	99,51	0,16	810,7068221
1	3	3	acumulada	66,03		8,92	0,52	17,96				3,91			2,66	100	0,23	787,1364421

**Tabla 2: Datos obtenidos mediante SEM de la muestra ELI-3, entregados en % atómico.**

Sample area	Sample amphibole	Sample point	Texture	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Total	Fe-number	Temperature (°C)
1	1	1	reemplazo	65,53		8,83	1,16	17,69				4,08			2,71	100	0,23	785,3643847
1	1	2	reemplazo	66,01		7,94	1,95	16,79		0,06	0,08	3,98	0,07		3,11	99,99	0,28	769,2597285
1	1	3	reemplazo	65,02	0,64	6,97	2,99	16,06		16,1	0,23	4,02			3,85	115,84	0,36	743,5633087
1	1	4	reemplazo	65,51		7,59	2,66	16,5		0,13	0,15	3,98			3,48	100	0,31	757,8875339
1	1	5	reemplazo	65,37	0,58	6,93	2,65	16,08		0,24	0,21	4,04			3,9	100	0,36	742,0817175
1	2	4	acumulada	65,79		9,25	1,16	17,55				3,99			2,26	100	0,20	798,6607298
1	3	5	acumulada	65,29	0,41	8,44	2,07	16,96				3,98			2,85	100	0,25	779,2834367
1	2	1	Intercrecimiento	65,8		9,5		18,31				4,06			2,33	100	0,20	798,4513948
1	2	2	Intercrecimiento	65,53	0,64	7,06	2,61	16,19		0,19	0,21	3,89			3,68	100	0,34	748,1163873
1	2	3	Intercrecimiento	65,93		8,65	1,32	17,39				3,93			2,78	100	0,24	782,467629

**Tabla 3: Datos obtenidos mediante SEM de la muestra CAM-2, entregados en % atómico.**

Sample area	Sample amphibole	Sample point	Texture	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Total	Fe-number	Temperature (°C)
1	1	2	reemplazo	65,26		9,99		18,32				4,17			2,25	99,99	0,18	802,9889706
1	1	3	reemplazo	65,26	0,4	8,89	1,37	17,43				3,97			2,69	100,01	0,23	786,2413644
1	1	4	reemplazo	65,9		6,95	0,51	18,01				4,16		0,07	4,4	100	0,39	732,561674
1	1	5	reemplazo	65,83		6,55	1	17,76				4,16		0,09	4,61	100	0,41	723,7800179
1	2	2	Intercrecimiento	65,33		9,37	1,09	17,63				4,29			2,29	100	0,20	798,6445111
1	2	3	Intercrecimiento	64,6	0,65	8,26	2,27	16,73		0,1	0,13	4,12			3,14	100	0,28	771,3359649
1	3	1	Intercrecimiento	64,81		9,49	0,98	18,12				4,18			2,42	100	0,20	796,297649
1	3	2	Intercrecimiento	65,15	0,32	8,21	1,77	17,3				4,13			3,04	99,92	0,27	773,1382222
1	3	3	Intercrecimiento	66,81		6,93	1,02	17,49				3,83			3,92	100	0,36	741,6741935
2	1	1	reemplazo	65,19		9,08	1,01	17,91				4,14			2,67	100	0,23	787,9906383
2	1	2	reemplazo	64,17	0,78	6,65	3,6	15,5		0,45	0,37	4,05	0,13		4,29	99,99	0,39	731,0159963
2	1	3	reemplazo	64,09	0,63	7,13	3,2	15,76		0,58	0,42	4,18	0,08		3,93	100	0,36	743,7319168
2	2	1	reemplazo	64,75		9,65	1,03	17,91				4,18			2,48	100	0,20	795,8619126
2	2	2	reemplazo	65,18		8,87	1,13	17,81				4,09			2,93	100,01	0,25	780,7105932
2	2	3	reemplazo	65,76		6,4	1,25	17,52				4,05			5,03	100,01	0,44	714,455818
2	3	1	Intercrecimiento	64,78		8,4	1,83	17,38				4,2			3,42	100,01	0,29	766,5329949
2	3	2	Intercrecimiento	64,61		10,34	0,83	18,32				4,14			1,77	100,01	0,15	816,0016515
2	4	3	acumulada	64,39	0,4	9,87	1,05	17,94				4			2,14	99,79	0,18	804,9371357
2	5	4	acumulada	64,94		9,8	0,35	18,46		4		4,2			2,25	104	0,19	801,9875519
2	5	1	acumulada	64,25		9,87	0,83	18,49				4,35			2,2	99,99	0,18	803,5256835
2	5	2	acumulada	65,45		8,32	1,2	17,64				4,09			3,3	100	0,28	768,3803787
2	3	3	Intercrecimiento	64,92		9,96	0,51	18,29				4,19			2,13	100	0,18	805,630273
2	3	4	Intercrecimiento	64,9	0,43	9,14	1,55	17,24			0,06	4,01	0,08		2,59	100	0,22	790,2131287
3	1	1	Intercrecimiento	64,95		9,87	0,3	18,57				4,19			2,11	99,99	0,18	805,6481636
3	1	2	Intercrecimiento	64,61	0,4	8,8	1,73	17,21		0,12	0,11	4,16			2,86	100	0,25	781,754717

**Tabla 4: Datos obtenidos mediante SEM de la muestra CAM-12, entregados en % atómico.**

Sample area	Sample amphibole	Sample point	Texture	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Total	Fe-number	Temperature (°C)
1	1	1	Intercrecimiento	63,62		11,48	0,46	18,92				4,69			0,83	100	0,07	843,2047116
1	1	2	Intercrecimiento	63,83		9,63		19,19				4,5			2,85	100	0,23	787,5997596
1	2	4	Intercrecimiento	63,75		9,6		19,3				4,6			2,76	100,01	0,22	789,3495146
1	3	2	homogénea	63,76		9,41		19,28				4,4			3,15	100	0,25	779,8499204
1	4	1	acumulada	63,3		10,28	0,24	19,35				4,62			2,22	100,01	0,18	805,1392
1	5	3	rugosa	60,56		10,97		21,01				4,9			2,55	99,99	0,19	801,335429
1	6	1	homogénea	63,88		9,59		19,25				4,51			2,77	100	0,22	789,0699838
1	7	3	homogénea	62,92		10,83	0,54	19,01				4,63			2,07	100	0,16	811,0593023
1	8	1	acumulada	63,03		11,58	1,06	18,57				4,61	0,13		1,01	99,99	0,08	838,7831612
1	8	2	acumulada	63,61		9,33		19,2				4,55			3,3	99,99	0,26	776,2268409
2	1	2	acumulada	63,3		9,71		19,45				4,73			2,81	100	0,22	788,9556709
2	1	3	acumulada	63,27		10,34		19,45				4,65			2,29	100	0,18	803,8558987
2	2	4	Intercrecimiento	63,77		9,55		19,35				4,5			2,85	100,02	0,23	787,0907258
2	2	5	Intercrecimiento	62,99		11,74	0,57	19,17				4,73			0,8	100	0,06	844,4585327
2	2	6	Intercrecimiento	63,65		9,31		19,36				4,53			3,15	100	0,25	779,1544944
2	3	1	acumulada	62,92		11,53	0,55	19,27				4,73			0,99	99,99	0,08	839,1801118
2	3	2	acumulada	62,97		9,24		19,68				4,69			3,43	100,01	0,27	772,9668508
2	3	3	acumulada	62,75		11,94	0,36	19,42				4,76			0,75	99,98	0,06	846,0803783
2	3	4	acumulada	63,3		9,67		19,46				4,57		0,07	2,93	100	0,23	786,1575397
2	4	5	Intercrecimiento	63,65		9,2		19,43				4,43			3,29	100	0,26	775,4915933
2	4	6	Intercrecimiento	63,05		10,92	0,45	19,21				4,68			1,69	100	0,13	820,1958763
2	5	1	Intercrecimiento	62,75		11,8	0,55	19,23				4,6			1,07	100	0,08	837,7754468
2	6	2	Intercrecimiento	63,51		11,4	0,77	18,8				4,57			0,95	100	0,08	839,9230769
2	7	1	Intercrecimiento	63,48		8,6		19,49				4,59			3,84	100	0,31	759,8504823

2	7	2	Intercrecimiento	62,71		11,91	0,47	19,39				4,77			0,74	99,99	0,06	846,2889328
2	7	3	Intercrecimiento	63,52		9,08		19,47				4,62			3,32	100,01	0,27	773,9951613
2	7	4	Intercrecimiento	62,66	0,45	11,43	0,86	18,88				4,48			1,24	100	0,10	832,6862668



2	8	3	acumulada	61,65		11,5	1,09	19,41				4,7			1,58	99,93	0,12	824,7652905
2	9	5	Intercrecimiento	62,43		11,22	0,88	19,36				4,7			1,39	99,98	0,11	828,4155432
2	8	6	acumulada	63,54		9,75		19,32				4,4			2,99	100	0,23	785,4132653
2	8	7	acumulada	62,96		11,4	0,93	18,7			0,11	4,55			1,35	100	0,11	829,9176471

**Tabla 5: Datos obtenidos mediante SEM de la muestra IMÁN01-03, entregados en % atómico.**

Sample area	Sample amphibole	Sample point	Texture	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Total	Fe-number	Temperature (°C)
1	1	1	Intercrecimiento	64,51		10,83		18,85				4,22			1,58	99,99	0,13	822,512087
1	1	2	Intercrecimiento	64,47		9,33	0,41	18,78				4,28		0,11	2,62	100	0,22	790,7502092
1	1	3	Intercrecimiento	65,05		9,72	0,39	18,46				4,26		0,11	2,01	100	0,17	807,2966752
1	1	4	Intercrecimiento	64,81		10,38	0,57	18,38				4,21		0,06	1,59	100	0,13	820,6065163
1	2	1	Intercrecimiento	64,91		9,79		18,88				3,94		0,18	2,3	100	0,19	800,7721257
1	2	2	Intercrecimiento	64,61		10,78	0,46	18,42				4,16			1,58	100,01	0,13	822,3341424
1	2	3	Intercrecimiento	65,11		9,77	0,94	18				4,11			2,07	100	0,17	806,0958615
1	3	4	Intercrecimiento	64,48	0,32	9,7	0,32	18,71		0,09		4,06			2,33	100,01	0,19	799,5827099
2	1	1	reemplazo	64,85		8,92	0,97	18,21				4,2			2,85	100	0,24	782,8402719
2	1	2	acumulada	64,82		9,69	0,51	18,42				4,15		0,07	2,34	100	0,19	799,2955112
2	1	3	reemplazo	64,23		10,94	0,53	18,64			0,07	4,08			1,52	100,01	0,12	824,3523274
2	2	4	acumulada	65,11		10,31		18,66				4,11			1,81	100	0,15	814,9030528
2	2	5	acumulada	65,22		8,8	0,5	18,37				4,13		0,12	2,85	99,99	0,24	781,9785408
2	2	6	acumulada	65,31		9,08	0,68	18,19				4,14		0,08	2,52	100	0,22	791,4431034

**Tabla 6: Datos obtenidos mediante SEM de la muestra IMÁN02-02, entregados en % atómico.**

Sample area	Sample amphibole	Sample point	Texture	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Total	Fe-number	Temperature (°C)
1	1	1	reemplazo	64,01		11,02		19,07				4,55		0,07	1,28	100	0,10	830,5455285
1	1	2	reemplazo	63,58		9,87	0,43	19,06				4,43		0,18	2,45	100	0,20	797,7926136
1	1	3	reemplazo	64,09		7,49	1,14	18,31		0,09		4,45		0,29	4,13	99,99	0,36	743,7018072
1	1	4	reemplazo	64,04		8,93	1,1	18,41				4,39		0,14	2,99	100	0,25	779,835151
1	1	5	reemplazo	63,71		10,33	0,19	19,1				4,56		0,18	1,93	100	0,16	812,110522
1	1	6	reemplazo	64,11		9,69	0,46	18,76				4,49		0,14	2,34	99,99	0,19	799,2955112
1	2	1	reemplazo	64,35		9,48	1,06	18		0,24	0,11	4,13	0,11		2,52	100	0,21	793,945
1	2	2	reemplazo	63,74		10,32	1,05	18,38		0,09		4,37	0,1		1,95	100	0,16	811,591687
1	2	3	reemplazo	64,14		9,3	1,42	17,79		0,26	0,15	4,17	0,11	0,1	2,55	99,99	0,22	792,1518987
1	2	4	reemplazo	63,23	0,55	8,34	2,65	16,55		0,62	0,31	4,31	0,16		3,28	100	0,28	768,975043
1	2	5	reemplazo	64,61		7,29	0,43	18,61				4,49		0,6	3,98	100,01	0,35	744,4866903
1	3	1	reemplazo	64,21		8,34	0,92	18,45				4,47		0,3	3,31	100	0,28	768,3364807
1	3	2	reemplazo	64,39		9	0,37	18,87				4,49		0,16	2,71	99,99	0,23	786,5422716
1	3	3	reemplazo	63,91		9,45	0,63	18,71				4,41		0,17	2,71	99,99	0,22	789,5012336
1	3	4	reemplazo	64,16		10,32		18,99				4,47		0,14	1,93	100,01	0,16	812,0661224
1	3	5	reemplazo	63,98		9,3	0,57	18,74				4,44		0,19	2,79	100,01	0,23	786,7692308
1	3	6	reemplazo	64,23		9,86	0,72	18,5				4,34		0,14	2,2	99,99	0,18	803,473466
1	4	1	reemplazo	64,37		9,35	1,35	17,75		0,17	0,08	4,24	0,09		2,6	100	0,22	791,3284519
1	4	2	reemplazo	63,84	0,28	8,59	1,75	17,45		0,43	0,16	4,3	0,14	4,3	3,07	104,31	0,26	775,5321612
1	4	3	reemplazo	63,85	0,56	7,52	3,45	16,47		0,12	0,1	4,28		4,28	3,64	104,27	0,33	753,8100358
1	4	4	reemplazo	64		10,12	1,18	18,3		0,09		4,34			1,83	99,86	0,15	813,590795

1	4	5	reemplazo	64,34		9,26		19,02				4,37		0,19	2,82	100	0,23	785,8451987
1	4	6	reemplazo	63,04	0,54	8,53	2,47	17,03		0,51	0,29	4,27	0,16		3,16	100	0,27	773,1056459
2	1	1	acumulada	64,25		11,09	0,53	18,55				4,35			1,23	100	0,10	832,0060877
2	1	2	acumulada	64,02		10,64	0,65	18,59		0,1		4,07			1,91	99,98	0,15	813,9179283
2	1	3	acumulada	64,02		11,04	0,71	18,54				4,25			1,43	99,99	0,11	826,8797113
2	2	4	acumulada	64,23		9,98	0,62	18,52		0,14		4,12	0,12		2,27	100	0,19	802,4767347
2	2	5	acumulada	64,06		10,77	0,66	18,59				4,32			1,6	100	0,13	821,8112369
2	2	6	acumulada	64,13		10,78	0,89	18,33				4,18	0,11		1,58	100	0,13	822,3341424
2	3	1	acumulada	64,14		10,52	1,16	18,21				4,28	0,1		1,59	100	0,13	821,1370768
2	3	2	acumulada	64,26		10,56	0,75	18,47				4,27	0,08		1,61	100	0,13	820,7929334
2	3	4	acumulada	63,85		11,42	0,36	18,91				4,2			1,25	99,99	0,10	832,4135754
2	3	5	acumulada	64,37		10,65	0,87	18,17				4,27	0,12		1,56	100,01	0,13	822,3574939
2	3	7	acumulada	64,1		10,66	1,02	18,29				4,23	0,1		1,61	100,01	0,13	821,1654442
2	4	1	acumulada	63,87		10,45	1,02	18,33		0,1		4,33	0,12		1,79	100,01	0,15	815,9734477
2	4	2	acumulada	63,93		10,15	0,32	19,23				4,3		0,22	1,84	99,99	0,15	813,4791493
2	4	3	acumulada	63,55		11,15	0,38	19,1		0,07		4,43			1,33	100,01	0,11	829,6798878
2	4	4	acumulada	63,92		11,02	0,43	18,8	0,15			4,14		0,1	1,45	100,01	0,12	826,3255814
2	4	5	acumulada	63,53		10,85	0,85	18,84		0,06		4,28			1,6	100,01	0,13	822,0983936
3	1	1	reemplazo	63,8		10,54	1,07	18,44				4,37			1,78	100	0,14	816,5819805
3	1	2	reemplazo	63,84		9,66	1,62	17,71		0,04	0,17	4,42			2,29	99,75	0,19	800,2912134
3	1	3	reemplazo	63,97		10,11	1,16	18,24		0,23		4,4			1,89	100	0,16	812,08375
3	1	4	reemplazo	63,87		10	1,22	18,09		0,2	0,12	4,34			2,16	100	0,18	805,1282895
3	1	5	reemplazo	63,1	0,57	8,92	2,43	17,06		0,46	0,27	4,38			2,81	100	0,24	783,7331628

3	1	6	reemplazo	64,25		8,2		19,09				4,36		0,22	3,89	100,01	0,32	755,3341605
3	1	7	reemplazo	63,94		10,61	0,71	18,67		0,07		4,37			1,63	100	0,13	820,4897876
3	2	1	nucleada	63,94		11,12		19,12				4,39			1,43	100	0,11	827,1322709
3	2	2	nucleada	63,85		11,17	0,28	19,03				4,42			1,25	100	0,10	831,7274557
3	2	3	nucleada	64,41		8,64		19,1				4,23		0,16	3,45	99,99	0,29	767,9081886
3	2	4	nucleada	63,93		9,82		19,22				4,51			2,52	100	0,20	795,9440843
3	2	5	nucleada	64,5		8,84	0,3	18,71				4,38		0,16	3,12	100,01	0,26	776,3695652
3	2	6	nucleada	64,02		9,5	0,72	18,84				4,45		0,16	2,32	100,01	0,20	798,6861252
3	3	1	reemplazo	64,24		9,9		19				4,46		0,08	2,31	99,99	0,19	801,1351351
3	3	2	reemplazo	64,83		7,74	0,22	18,79				4,06		0,25	4,12	100,01	0,35	746,4780776
3	3	3	reemplazo	64,06		9,24	1,35	18,25				4,41		0,09	2,59	99,99	0,22	790,8579882
3	3	4	reemplazo	64,28		8,8	1,23	18,14				4,46		0,15	2,96	100,02	0,25	779,537415
3	3	5	reemplazo	64,29		7,91	2,56	17,11			0,16	4,41		0,1	3,46	100	0,30	761,3610378
3	3	6	reemplazo	63,87		9,14	1,54	18,22				4,44		0,09	2,7	100	0,23	787,7119932
3	3	7	reemplazo	64,7		6,73		19,06				4,38		1,32	3,81	100	0,36	741,6086338
3	4	4	reemplazo	64,37		9,43	0,61	18,64			0,07	4,2		0,1	2,58	100	0,21	792,2793505
3	5	1	nucleada	64,15		9,29	0,84	18,59				4,47		0,09	2,56	99,99	0,22	791,8603376
3	5	2	nucleada	64,77		8,72	0,58	18,52				4,15		0,1	3,17	100,01	0,27	774,3860387
3	5	3	nucleada	63,7		10,76	0,79	18,65		0,07		4,4			1,63	100	0,13	821,0468119
3	5	4	nucleada	63,74		11,63		19,08				4,52			1,03	100	0,08	838,3906003
3	5	5	nucleada	64,01		10,4	0,28	19,03		0,08		4,42			1,79	100,01	0,15	815,7662018
3	6	1	nucleada	63,66		11,33	0,46	18,95				4,36			1,23	99,99	0,10	832,665207
3	6	2	nucleada	64,09		10,47	0,66	18,55		0,15		4,25			1,84	100,01	0,15	814,857433
3	6	3	nucleada	63,67		10,89	0,74	18,72				4,47			1,51	100	0,12	824,4270161
3	6	4	nucleada	63,59		10,77	0,67	18,82		0,09		4,45			1,6	99,99	0,13	821,8112369
3	6	5	nucleada	63,78		10,17		19,28		0,08		4,42			2,28	100,01	0,18	803,2277108

**Tabla 7: Datos obtenidos mediante SEM de la muestra IMÁN14-01, entregados en % atómico.**

Sample area	Sample amphibole	Sample point	Texture	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Total	Fe-number	Temperature (°C)
1	1	7	reemplazo	66,44		9,24	0,24	18,03				3,82		0,12	2,11	100	0,19	802,2704846
1	1	8	reemplazo	66,24		10,11	0,29	17,97				3,75		0,06	1,58	100	0,14	819,8028229
1	1	9	reemplazo	66,64	0,35	7,54	0,48	17,86				3,61		0,45	3,06	99,99	0,29	766,7613208
1	2	1	reemplazo	66,18		9,66		18,09				3,86		0,11	2,1	100	0,18	804,8035714
1	2	2	reemplazo	66,26		7,47	0,94	17,72		0,07		3,86		0,21	3,47	100	0,32	756,9127057
1	2	3	reemplazo	65,76		10,14	0,44	18,06				3,93		0,07	1,6	100	0,14	819,4131175
1	3	2	reemplazo	66,12		9,14	0,3	18,11				3,83		0,13	2,37	100	0,21	795,3588184
1	3	4	reemplazo	65,49		10,78	0,4	18,17				3,99			1,16	99,99	0,10	832,9338358
1	4	2	reemplazo	65,71		9,34	0,19	18,35				4,03		0,16	2,21	99,99	0,19	800,391342
1	5	3	Intercrecimiento	64,94		9,68	1,44	17,96				4		0,06	1,92	100	0,17	809,3137931
1	6	4	Intercrecimiento	64,67		10,58	1,03	18,35		0,09		3,89			1,39	100	0,12	826,3792815
1	6	5	Intercrecimiento	65,64		9,36	0,58	18,22				3,86		0,08	2,27	100,01	0,20	799,0636285
1	6	6	Intercrecimiento	65,45		8,35	0,46	18,39				4		0,12	3,24	100,01	0,28	769,9150129
1	5	7	Intercrecimiento	65,59		10,69	0,97	17,64				3,79	0,09		1,23	100	0,10	830,8485738
1	5	8	Intercrecimiento	65,49		9,59	0,73	17,81		0,08		3,97		0,07	2,26	100	0,19	800,607173
1	5	9	Intercrecimiento	65,62		9,42	0,26	18,31				4,01		0,12	2,26	100	0,19	799,6481164
2	1	1	reemplazo	65,5		10,27	0,56	18,14				3,92			1,62	100,01	0,14	819,4259882
2	1	2	reemplazo	65,73		7,68	2,15	16,88		0,11	0,15	3,89		0,09	3,33	100,01	0,30	762,0027248
2	1	3	reemplazo	66,02		9,45	0,42	18,01				3,98			2,11	99,99	0,18	803,4372837
2	2	4	acumulada	66,18		7,7	1,37	17,31				3,98		0,12	3,35	100,01	0,30	761,7556561

2	2	5	acumulada	65,88		9,03	1,28	17,48				3,9		0,08	2,35	100	0,21	795,1533392
2	2	6	acumulada	65,35		10,93	0,76	17,96				3,81			1,19	100	0,10	832,5771452
2	3	1	acumulada	66,5		8	0,97	17,38				4		0,14	3,01	100	0,27	772,044505
2	3	2	acumulada	65,51		10,8		18,34				3,91		0,09	1,34	99,99	0,11	828,3640857
2	3	3	acumulada	66,25		8,87	0,65	17,81				3,83		0,11	2,48	100	0,22	791,007489

**Tabla 8: Datos obtenidos mediante SEM de la muestra IMÁN14-03, entregados en % atómico.**

Sample area	Sample amphibole	Sample point	Texture	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Total	Fe-number	Temperature (°C)
1	1	1	reemplazo	65,85		8,63		18,3				4,1		0,18	2,94	100	0,25	778,7065687
1	1	2	reemplazo	65,72		8,31	1,5	17,29				4,13		0,13	2,91	99,99	0,26	776,8917112
1	1	3	reemplazo	65,13	0,25	7,27	2,22	16,85		0,15	0,2	4,08		0,16	3,7	100,01	0,34	749,9685506
1	1	4	reemplazo	64,55		8,31	1,69	16,43			0,06	3,93		0,1	2,54	97,61	0,23	785,6179724
1	2	1	reemplazo	65,57		9,17	0,89	17,95				3,93		0,11	2,38	100	0,21	795,3060606
1	2	2	reemplazo	65,86		7,84	0,82	17,86				4,1		0,23	3,28	99,99	0,29	764,5899281
1	2	3	reemplazo	65,69		8,29		18,39				4,12		0,21	3,3	100	0,28	768,1264021
1	2	4	reemplazo	65,41		9,6	0,88	17,85				4,05		0,08	2,13	100	0,18	803,7621483

1	3	7	Intercrecimiento	65,54		9,38	1,05	17,62				4,14		0,09	2,18	100	0,19	801,3451557
1	4	9	acumulada	65,36		9,41	0,82	17,96				4,03		0,12	2,3	100	0,20	798,6391973
2	1	1	reemplazo	65,18		9,26	1,06	17,78				4,09		0,13	2,49	99,99	0,21	793,2834043
2	1	2	reemplazo	65,59		8,1	1,1	17,79		0,07		4,11		0,16	3,08	100	0,28	771,3175313
2	1	4	reemplazo	65,04		10,07	0,55	18,23				4,14			1,98	100,01	0,16	809,7290456
2	1	5	reemplazo	65,62		7,28	0,43	18,04	0,37			4,26		0,16	3,85	100,01	0,35	746,9874214
2	2	1	reemplazo	65,12		9,15	1,01	18,03				4,08		0,12	2,49	100	0,21	792,5914948
2	2	2	reemplazo	65,12		10,05	0,38	18,42				4,1		0,1	1,83	100	0,15	813,2790404
2	2	3	reemplazo	65,62		8,39		18,48				4,08		0,26	3,17	100	0,27	771,7564879
2	2	4	reemplazo	65,11		10,39	1,11	17,58		0,09	0,11	4,03	0,12		1,45	99,99	0,12	824,1879223
2	2	5	reemplazo	65,93		7,31		18,56				4,13		0,18	3,9	100,01	0,35	746,2992864
2	2	6	reemplazo	65,19		9,37	1,13	17,83				4,17			2,31	100	0,20	798,1690925
3	1	1	reemplazo	64,9		10,54	0,39	18,36		0,07		3,93			1,8	99,99	0,15	816,1029173
3	1	2	reemplazo	65,65		9,32		18,36				4,1			2,58	100,01	0,22	791,5932773
3	1	3	reemplazo	66,12		7,26		18,34				4,04		0,62	3,63	100,01	0,33	751,3333333
3	1	4	reemplazo	65,73		9,15	0,56	18,03				4,04		0,13	2,37	100,01	0,21	795,4205729
3	1	5	reemplazo	66,4		7,54	0,33	17,88	0,11			4,02		0,26	3,46	100	0,31	757,8245455

3	2	6	acumulada	65,55		9,44	0,41	18,3				4,02		0,11	2,19	100,02	0,19	801,4402408
3	2	7	acumulada	66,67		7,04		18,09				4,02		0,69	3,5	100,01	0,33	751,7703985
3	3	8	acumulada	65,81		7,23		18,43				4,16		1,02	3,34	99,99	0,32	757,3259224
3	3	9	acumulada	65,65		9,08	0,45	18,19				4,04		0,12	2,47	100	0,21	792,6138528