



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA



**METODOLOGÍA INTEGRADA DE MICROSCOPIA
ÓPTICA Y DIFRACCIÓN DE RAYOS X PARA EL
ANÁLISIS MINERALÓGICO EN CORTES
TRANSPARENTES DE MUESTRAS PROVENIENTES DE
UN DEPÓSITO DE TIPO SKARN**

Memoria para optar al Título de Geóloga

María Victoria Stevenson Baeza

Profesor Patrocinante: MSc. Abraham Elías González Martínez

Profesional Guía: MSc. Héctor Iván Suazo Caroca

Profesores Comisión: MSc. Liubow Nikolaivna González Martínez
Sr. Ramiro Ulises Bonilla Parra

Concepción, 2025

A mis padres y hermana

A mi esposo Javier

Y a mí, por lograrlo

ÍNDICE

	Página
RESUMEN	
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Generalidades	1
1.1.1. Generalidades de los depósitos de tipo skarn	2
1.2. Objetivos	6
1.2.1. Objetivo general	6
1.2.2. Objetivos específicos	6
1.3. Metodología de trabajo	6
1.3.1. Etapa de gabinete 1	6
1.3.2. Etapa de gabinete 2	6
1.4. Trabajos anteriores	7
1.5. Agradecimientos	8
2. MARCO TEÓRICO	10
2.1. Generalidades	10
2.2. Microscopía óptica	10
2.2.1. Microscopio de polarización o petrográfico	12
2.2.2. Descripción sistemática de minerales en sección delgada utilizando luz transmitida	12
2.2.2.1. Propiedades en luz polarizada plana	12
2.2.2.2. Propiedades en nicoles cruzados	13
2.2.3. Descripción sistemática de minerales en sección delgada utilizando luz reflejada.....	15
2.2.3.1. Propiedades observadas utilizando luz polarizada plana	15
2.2.3.2. Propiedades observadas utilizando nicoles cruzados	15
2.3. Difracción de rayos X	16
3. METODOLOGÍA	20
3.1. Metodología integrada para la caracterización mineralógica	20
3.2. Preparación de muestras	20
3.2.1. Microscopía óptica	20
3.2.2. Difracción de rayos X	20
3.3. Análisis petrográfico y calcográfico	22
3.4. Análisis mediante difracción de rayos X	24
3.5. Integración e interpretación	24
4. RESULTADOS	25
4.1. M-0012	25
4.2. M-0026	27
4.3. M-0027	29
4.4. M-0030	31
4.5. M-0036	33
4.6. M-0161	35

4.7. M-0209	37
4.8. M-0222	39
4.9. M-0276	42
4.10. M-0287.....	45
5. DISCUSIÓN	48
5.1. Consideraciones generales	48
5.2. Caracterización petrográfica: alcances y limitaciones de la microscopía óptica	48
5.3. Difracción de rayos X como herramienta de validación mineralógica	50
5.4. Limitaciones y consideraciones de la metodología aplicada	52
6. CONCLUSIONES	53
REFERENCIAS	54
ANEXOS	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. 1. Tipos de formación de skarn	3
2. 1. Microscopio petrográfico	11
2. 2. Carta de colores de interferencia de Michel Lévy	14
2. 3. Geometría de la difracción constructiva de rayos X	17
2. 4. Esquemización de difractómetro	19
3. 1. Preparación de cortes pulidos	21
3. 2. Preparación de muestras para difracción de rayos X	22
3. 3. Microscopio petrográfico Leica DM2700P	23
4. 1. Fotomicrografías de la muestra M-0012	26
4. 2. Difractograma de la muestra M-0012	27
4. 3. Fotomicrografías de la muestra M-0026	28
4. 4. Difractograma de la muestra M-0026	29
4. 5. Fotomicrografías de la muestra M-0027	30
4. 6. Difractograma de la muestra M-0027	31
4. 7. Fotomicrografías de la muestra M-0030	32
4. 8. Difractograma de la muestra M-0030	33
4. 9. Fotomicrografías de la muestra M-0036	34
4. 10. Difractograma de la muestra M-0036	35
4. 11. Fotomicrografías de la muestra M-0161	36
4. 12. Difractograma de la muestra M-0161	37
4. 13. Fotomicrografías de la muestra M-0209	38
4. 14. Difractograma de la muestra M-0209	39
4. 15. Fotomicrografías de la muestra M-0222	41

4.	16.	Difractograma de la muestra M-0222	41
4.	17.	Fotomicrografías muestra M-0276	43
4.	18.	Difractograma de la muestra M-0276	44
4.	19.	Fotomicrografías de la muestra M-0287	46
4.	20.	Difractograma de la muestra M-0287	46

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Página	
1.	1.	Mineralogía de skarn	5
4.	1.	Mineralogía de la muestra M-0012	25
4.	2.	Mineralogía de la muestra M-0026	27
4.	3.	Mineralogía de la muestra M-0027	29
4.	4.	Mineralogía de la muestra M-0030	32
4.	5.	Mineralogía de la muestra M-0036	34
4.	6.	Mineralogía de la muestra M-0161	36
4.	7.	Mineralogía de la muestra M-0209	38
4.	8.	Mineralogía de la muestra M-0222	40
4.	9.	Mineralogía de la muestra M-0276	44
4.	10.	Mineralogía de la muestra M-0287	47

RESUMEN

Este estudio desarrolla una metodología integrada de microscopía óptica y difracción de rayos X (DRX) aplicada a un conjunto de 10 muestras provenientes de un depósito de tipo skarn, con el objetivo de mejorar la precisión en la identificación mineralógica. La investigación responde a la necesidad de complementar la información obtenida mediante observación petrográfica con una técnica cristalográfica capaz de resolver ambigüedades derivadas de propiedades ópticas similares, intercrecimientos finos, texturas de reemplazo y grados variables de recristalización.

El marco teórico revisa los fundamentos de ambas técnicas. La microscopía óptica permite describir texturas, reconocer relaciones paragenéticas y utilizando propiedades ópticas como relieve, pleocroísmo, birrefringencia, colores de interferencia, ángulos de extinción, mientras que la DRX aporta información cristalográfica indispensable para diferenciar minerales ópticamente semejantes. Este marco conceptual se complementa con la revisión de los procesos metasomáticos que originan los skarns, caracterizados por asociaciones minerales complejas producto de la interacción entre fluidos magmáticos y rocas carbonatadas.

La metodología consistió en la descripción petrográfica detallada de cortes transparentes pulidos y la obtención de difractogramas. Se buscó correlacionar las observaciones ópticas con las fases identificadas por DRX para validar interpretaciones y resolver discrepancias. Las muestras permitieron examinar una variedad de texturas y asociaciones típicas del metasomatismo, incluyendo relictos del protolito, zonas de reemplazo y sectores afectados por recristalización intensa.

Los resultados muestran asociaciones dominadas por diópsido, tremolita–actinolita, epidota, plagioclasa, cuarzo, micas, cloritas, serpentinas (particularmente lizardita y antigorita), carbonatos (calcita y dolomita) y minerales metálicos como piritita, calcopirita y magnetita típico de skarn magnesianos. En varias muestras, la identificación óptica se vio limitada por minerales de baja birrefringencia, pleocroísmos poco distintivos o intercrecimientos entre anfíboles, micas y serpentinas. La DRX permitió confirmar variedades mineralógicas específicas, discriminar carbonatos con rasgos ópticos similares y reconocer fases menores que no pudieron observarse de manera confiable al microscopio. La comparación entre ambas técnicas fortaleció la interpretación mineralógica al corregir o validar determinaciones petrográficas y otorgar coherencia a las asociaciones identificadas.

Se evidencia que la integración de microscopía óptica y DRX constituye un enfoque metodológico especialmente adecuado para abordar la complejidad mineralógica del sistema. Mientras la microscopía entrega el contexto textural y paragenético esencial para interpretar los procesos de reemplazo y la evolución metasomática, la DRX aporta la certeza cristalográfica necesaria para resolver minerales problemáticos, mejorar la consistencia de las interpretaciones y reducir la incertidumbre analítica en fases con propiedades ópticas similares.

En conclusión, el uso combinado de ambas técnicas resulta altamente efectivo para la caracterización mineralógica de rocas de tipo skarn. La metodología integrada mejora significativamente la precisión en la identificación de minerales, permite reconstruir con mayor detalle los procesos de alteración y zonación metasomática, y constituye una herramienta sólida y replicable para estudios petrográficos avanzados en ambientes donde la complejidad textural y mineralógica supera las capacidades de una sola técnica.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Generalidades

La caracterización mineralógica proporciona información clave sobre la génesis, evolución y zonación de los depósitos minerales. En minería es fundamental en todas las etapas del desarrollo de un proyecto minero, desde la etapa de exploración hasta el procesamiento mineral.

La microscopía óptica en luz transmitida y reflejada, aplicada a cortes transparentes constituye una técnica clásica pero fundamental para la descripción mineralógica. Es un método no destructivo con relativamente elevada resolución espacial que permite identificar fases minerales, analizar texturas, estructuras y establecer relaciones paragenéticas. Sin embargo, esta técnica está limitada cuando la composición química de soluciones sólidas necesita ser conocida o cuando el material es de grano tan fino que impide la identificación de fases individuales (Raith *et al.*, 2012).

La difracción de rayos X (DRX) es una técnica analítica no destructiva utilizada para identificar y caracterizar fases cristalinas (Bunaciu *et al.*, 2015). Esta técnica semi-cuantitativa permite determinar la composición mineralógica, incluso en muestras con minerales finamente intercrecidos o de difícil identificación óptica, sirviendo como una técnica complementaria en el análisis mineralógico (Amaral *et al.*, 2006).

En la práctica, aunque una muestra observada con microscopía óptica clásica no revele con claridad la totalidad de los minerales presentes, la difracción permite verificar o refinar los resultados ópticos, consolidando la interpretación geológica. La integración de ambas técnicas permite, por tanto, superar las limitaciones de cada una y ofrecer una visión más completa y rigurosa de la mineralogía de un depósito.

A pesar de la amplia aplicación de la microscopía óptica y la difracción de rayos X en estudios mineralógicos, existe una limitada disponibilidad de trabajos académicos orientados a estudiantes o geólogos en formación que aborden de manera integrada ambas técnicas aplicadas específicamente a cortes transparentes. En este contexto, el presente estudio propone el desarrollo de una metodología que combine de forma sistemática la microscopía óptica y la difracción de rayos X para la caracterización mineralógica de cortes transparentes pulidos provenientes de un depósito tipo skarn, con el fin de ofrecer una guía práctica, comparativa y aplicable a estudios similares.

1.1.1. Generalidades de los depósitos de tipo skarn

Los depósitos de tipo skarn son uno de los más abundantes en la corteza terrestre y se forman en rocas de casi todas las edades. El skarn es un tipo de roca relativamente simple definida por una mineralogía dominada generalmente por minerales calcosilicatos como el granate y el piroxeno. Aunque la mayoría de los skarns se encuentran en litologías que contienen al menos algo de caliza, pueden formarse en casi cualquier tipo de roca durante el metamorfismo regional o de contacto y a partir de una variedad de procesos metasomáticos en los que intervienen fluidos de origen magmático, metamórfico, meteórico y/o marino. La mayoría se encuentra junto a plutones, pero también pueden aparecer a lo largo de fallas y zonas de cizalle importantes, en sistemas geotermales poco profundos, en el fondo marino y a menor profundidad de la corteza en terrenos metamórficos profundamente enterrados (Meinert, 1992; Meinert *et al.*, 2005).

Los skarns pueden subdividirse según varios criterios. Exoskarn y endoskarn son términos comunes utilizados para indicar un protolito sedimentario e ígneo, respectivamente. Estos términos también pueden referirse a la ubicación del skarn en relación con el intrusivo; exoskarns, formados fuera del cuerpo ígneo en rocas carbonatadas mediante reemplazo metasomático; y endoskarns, desarrollados dentro del cuerpo ígneo, producto de la alteración del propio plutón. Para describir la composición dominante del protolito y de los minerales de skarn resultantes pueden utilizarse los términos magnésico y cálcico (Meinert *et al.*, 2005).

Meinert (1992) distingue cuatro tipos principales de formación de skarns según el grado de transferencia metasomática y el control composicional del protolito. Los hornfels calcosilicatados (Fig. 1A) se forman por metamorfismo de unidades carbonatadas impuras como calizas limosas o esquistos calcáreos. Los skarns de reacción (Fig. 1B) pueden formarse a partir del metamorfismo isoquímico de unidades de esquistos y carbonatos finamente interestratificadas, donde la transferencia metasomática entre litologías adyacentes puede ocurrir a pequeña escala. El skarnoide (Fig. 1C) es una roca calcosilicatada fina, pobre en hierro, que refleja parcialmente el control composicional del protolito y representa una transición entre hornfels y skarn metasomático. En estos tres casos, la composición del protolito controla en gran medida el skarn resultante. Por el contrario, la mayoría de los depósitos de skarn económicamente importantes son el resultado de

una transferencia metasomática a gran escala, donde la composición del fluido controla el skarn, dando origen a skarns de grano grueso con mineralización económica significativa.

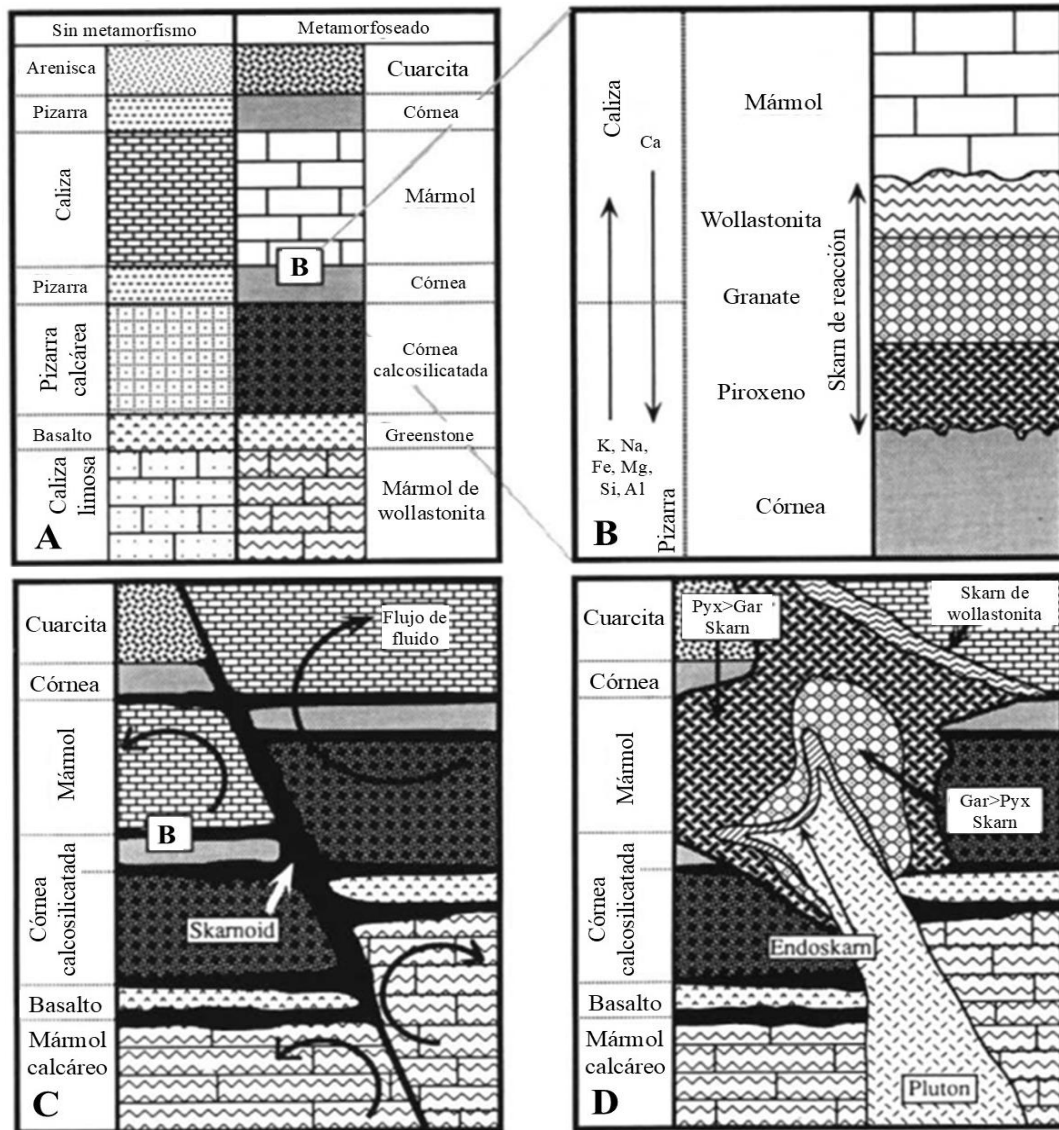


Figura 1.1: Tipos de formación de skarn (modificado de Meinert, 1992). A. El metamorfismo isoquímico implica recristalización y cambios en la estabilidad mineral sin transferencia de masa significativa. B. El skarn de reacción es el resultado del metamorfismo de litologías intercaladas, como pizarras y calizas, con transferencia de masa entre capas a pequeña escala. C. El skarnoides es el resultado del metamorfismo de litologías impuras con cierta transferencia de masa por movimiento de fluidos a pequeña escala. D. El skarn metasomático controlado por fluidos suele ser de grano grueso y no refleja fielmente la composición o textura del protolito.

La formación de un depósito tipo skarn es un proceso dinámico, en el que se produce una transición desde el metamorfismo temprano/distal, formando hornfels, skarn de reacción y skarnoides, hasta

el metasomatismo tardío/proximal, que da lugar a skarn de grano grueso mineralizados. Esta evolución está impulsada por fuertes gradientes térmicos y circulación de fluidos generados por intrusiones magmáticas. Fluidos metasomáticos más complejos, con la posible adición de componentes magmáticos como Fe, Si y Cu, producen un continuo entre procesos metamórficos y metasomáticos. Tras estas etapas de alta temperatura, el sistema suele experimentar alteración retrógrada, a medida que la temperatura disminuye (Meinert, 1992; Meinert *et al.*, 2005).

La mineralogía de los skarns está dominada por silicatos de calcio, hierro y magnesio, como granates, piroxenos, anfíboles y epidotas. Minerales como cuarzo y calcita son comunes en la mayoría de los skarns, mientras que otros, como serpentina, talco y humita, son típicos de skarns magnesianos (Meinert, 1992). La Tabla 1.1. resume los principales minerales de skarn y su composición.

La gran mayoría de los depósitos de skarn están asociados a arcos magmáticos relacionados con subducción bajo la corteza continental (Meinert *et al.*, 2005). Por ejemplo, el depósito de skarn de Cu-Zn de Antamina en Perú se asocia a magmatismo en arcos continentales activos.

Tabla 1.1. Mineralogía de skarn. Modificado de Meinert (1992).

Grupo General	Mineral	Abreviatura	Composición
Granate	Grosularia	Gr	$\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$
	Andradita	Ad	$\text{Ca}_3\text{Fe}_2(\text{SiO}_4)_3$
	Espesartina	Sp	$\text{Mn}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$
	Almandino	Al	$\text{Fe}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$
	Piropo	Py	$\text{Mg}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$
Piroxeno	Diópsido	Di	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$
	Hedenbergita	Hd	$\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$
	Johannsenita	Jo	$\text{CaMnSi}_2\text{O}_6$
	Fassaita	Fas	$\text{Ca}(\text{Mg,Fe,Al})(\text{Si,Al})_2\text{O}_6$
Olivino	Larnita	Ln	Ca_2SiO_4
	Forsterita	Fo	Mg_2SiO_4
	Fayalita	Fa	Fe_2SiO_4
	Tefroíta	Tp	Mn_2SiO_4
Piroxenoide	Ferrosilita	Fs	FeSiO_3
	Rodonita	Rd	MnSiO_3
	Wollastonita	Wo	CaSiO_3
Anfíbol	Tremolita	Tr	$\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
	Ferroactinolita	Ft	$\text{Ca}_2\text{Fe}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
	Actinolita magnésica	Mn	$\text{Ca}_2\text{Mn}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
	Hornblenda	Hb	$\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe,Al})_4\text{Si}_7\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
	Pargasita	Pg	$\text{NaCa}_2(\text{Mg,Fe,Al})_5\text{Si}_6\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
	Cummingtonita	Cm	$\text{Mg}_2(\text{Mg,Fe})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
	Danemorita	Dm	$\text{Mn}_2(\text{Fe,Mg})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
Epidota	Grunerita	Gru	$\text{Fe}_2(\text{Fe,Mg})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
	Piemontita	Pm	$\text{Ca}_2(\text{Mn,Fe,Al})_3(\text{SiO}_4)_3(\text{OH})$
	Alanita	All	$(\text{Ca,REE})_2(\text{Fe,Al})_3(\text{SiO}_4)_3(\text{OH})$
	Epidota	Ep	$\text{Ca}_2(\text{Fe,Al})_3(\text{SiO}_4)_3(\text{OH})$
Plagioclasa	Clinzoisita	Cz	$\text{Ca}_2\text{Al}_3(\text{SiO}_4)_3(\text{OH})$
	Anortita	An	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$
Escapolita	Meionita	Me	$\text{Ca}_4\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}(\text{CO}_3,\text{SO}_4)$
Otros	Vesuvianita (idocrasa)	Vs	$\text{Ca}_{10}(\text{Mg,Fe,Mn})_2\text{Al}_4\text{Si}_8\text{O}_{34}(\text{OH,Cl,F})_4$
	Prehnita	Pr	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_5\text{O}_{10}(\text{OH})_2$

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Desarrollar una metodología de análisis mineralógico en cortes transparentes mediante la integración de datos obtenidos por microscopía óptica y difracción de rayos X de muestras provenientes de un depósito de tipo skarn.

1.2.2. Objetivos específicos

1. Exponer los principios, alcances y limitaciones de la microscopía óptica en el análisis de minerales en cortes transparentes.
2. Analizar la utilidad de la difracción de rayos X (DRX) como herramienta complementaria para la identificación de fases minerales.
3. Describir la mineralogía de las muestras de tipo skarn mediante microscopía óptica y difracción de rayos X.
4. Integrar los resultados obtenidos por microscopía óptica y DRX.
5. Evaluar la consistencia y precisión del tratamiento de datos mineralógicos obtenidos mediante la metodología desarrollada.

1.3. Metodología de trabajo

1.3.1. Etapa de gabinete 1

La primera etapa consiste en una revisión de los principios de la microscopía óptica y DRX, destacando sus aplicaciones y limitaciones en la identificación mineralógica. Además, se describirá el procedimiento de preparación de las muestras y los equipos utilizados en cada técnica.

1.3.2. Etapa de gabinete 2

Durante esta fase se llevará a cabo el análisis y la descripción mineralógica de 10 muestras de un depósito de tipo skarn, empleando una metodología integrada basada en la observación petrográfica de cortes transparentes y el análisis mineralógico por DRX. Cada muestra será caracterizada mediante microscopía óptica, permitiendo identificar las fases minerales, texturas y relaciones paragenéticas. Posteriormente, los resultados serán complementados con los análisis de DRX, con

el fin de confirmar la presencia de fases minerales que no hayan podido ser determinadas de forma concluyente a través del microscopio.

La integración de los resultados obtenidos por cada técnica permitirá contrastar y correlacionar estos datos para una correcta interpretación geológica de las muestras provenientes de un depósito de tipo skarn.

1.4. Trabajos anteriores

Diversos estudios han abordado la caracterización mineralógica mediante el uso combinado de técnicas analíticas como la microscopía óptica y la difracción de rayos X, así como de otras metodologías complementarias. Estos trabajos evidencian la necesidad de enfoques integrados para interpretar sistemas mineralizados complejos y constituyen antecedentes relevantes para el desarrollo del presente estudio.

Amaral *et al.* (2006) comparan las técnicas DRX y petrografía en el análisis de rocas como granito, gabro y cuarcita. La DRX permitió identificar minerales principales de forma rápida y semicuantitativa, aunque con cierta variabilidad en los resultados. La petrografía, en cambio, entregó información más precisa sobre la textura, tamaño de grano y microestructura de las rocas. Los autores concluyeron que ambas técnicas se complementan, DRX aporta datos composicionales, mientras la petrografía es clave para la caracterización textural.

Setiawan *et al.* (2018) analiza la composición mineral de tres tipos de rocas, granito, andesita y esquisto, utilizando difracción de rayos X para complementar el análisis petrográfico.

Al-Rawas *et al.* (2008) caracterizaron un meteorito utilizando microscopía óptica, DRX y espectroscopía Mössbauer. Los minerales identificados mediante petrografía fueron respaldados por los resultados de la difracción.

Hill *et al.* (1993) aplicaron el método Rietveld a datos de DRX para cuantificar con precisión la composición mineral de rocas ígneas, volcánicas y metamórficas. La técnica demostró ser altamente efectiva, con resultados comparables a métodos ópticos tradicionales, permitiendo detectar minerales en proporciones bajas.

Tzvetanova *et al.* (2020) demostraron la eficacia del método Rietveld aplicado a DRX en polvo para el análisis cuantitativo de rocas tipo skarn. La técnica permitió identificar múltiples fases minerales por muestra con alta precisión. Los resultados mostraron una buena concordancia con observaciones petrográficas y análisis químicos, destacando la utilidad del método frente a enfoques tradicionales.

1.5. Agradecimientos

En primer lugar, deseo expresar mi más sincero agradecimiento a Héctor Suazo, mi jefe en SGS del área de microscopía óptica y difracción de rayos X. Gracias por permitirme realizar mi práctica profesional en pandemia, por brindarme la oportunidad de desarrollarme en estas áreas y por confiar en mí para llevar a cabo mi memoria en la empresa. Agradezco profundamente tu disposición constante para ayudar, resolver dudas y entregarme las herramientas necesarias tanto para este trabajo como para el desempeño diario en la empresa. Valoro tu trayectoria como geólogo mineralogista y también tu futura faceta de filósofo.

Agradezco igualmente el patrocinio del profesor Msc. Abraham González, por su ayuda, compromiso y comprensión durante el desarrollo de esta memoria. Gracias por la confianza durante todo este proceso.

Extiendo mis agradecimientos al Dr. Mauricio Belmar, gerente del área de Geología en SGS, por motivarme a culminar esta tesis y por su constante preocupación por el área.

A mis colegas mineralogistas, a quienes tengo especial cariño, gracias por sus palabras de aliento y preocupación: Javiera Vera, Paulina Andaur, Felipe Martínez, Carolina Moya, Tania Alegría, Francisca Castillo, Claudia Molina, Álvaro Alarcón y Nicole Yévenes. A quienes prepararon las muestras de óptica y difracción, Esteban Martínez, Francisca Jorquera, Iván Yáñez y Jean Sáez, muchas gracias por su trabajo y disposición. Agradezco también a Carolina Estay, Jorge Díaz, Camila Sánchez, Catalina Echevarría, Nicolás Cueto, Javiera Venegas, Marcela Águila y Rafael Solís por su buena onda y apoyo diario.

A los profesores y funcionarios del Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Concepción, por los conocimientos entregados, por su dedicación docente y por el apoyo brindado

en las salidas a terreno. A los profesores de la comisión evaluadora y a la secretaria de la carrera, Sra. Carolina, por su gestión y acompañamiento durante el desarrollo de esta tesis.

A mis amigos y amigas de la universidad, quienes hicieron de esos años un hermoso recuerdo y con quienes mantengo una amistad que valoro profundamente: Rocío, Eduardo, las Catas, Kevin, Jorge, Sebastián, Rubén y Susana. Un agradecimiento especial a quien fue mi amigo y hoy es mi marido, Javier, por su infinito amor, apoyo, cariño y paciencia, así como a su familia, quienes se han preocupado por mí en todo momento.

A mis amigos de la vida, María Paz, Fray Félix, Roberto, Josefa, Cecilia, Francisco, Pablo, Ale, Javi, y a mis primeros colegas y amigos de SGS, Cata, Cesiah y Byron, gracias por acompañarme en distintos momentos y etapas.

Finalmente, agradezco con todo mi corazón a mi familia. A mis padres, Mario y Gladys, por su apoyo incondicional, amor y por los valores que me inculcaron; sin duda, no sería la persona que soy hoy sin ustedes. A mi hermana Daniela, el ser más maravilloso de este universo. A mis tíos y tías, y especialmente a mis abuelos, que están en el cielo y sé que me acompañan y cuidan.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Generalidades

La caracterización mineralógica constituye una herramienta fundamental en geología económica, ya que permite comprender los procesos que controlan la génesis, evolución y zonación de los depósitos minerales. La identificación de las fases minerales, sus relaciones texturales y su distribución espacial, aporta información clave para interpretar condiciones fisicoquímicas, secuencias paragenéticas y estilos de alteración hidrotermal.

La microscopía óptica y la difracción de rayos X son técnicas clásicas para la caracterización mineral y sus principios se detallarán en este capítulo.

2.2. Microscopía óptica

La investigación microscópica en luz transmitida o reflejada de minerales y rocas en lámina delgada es un método clásico y hasta hoy irremplazable para el estudio de estos materiales. La microscopía de polarización es un método no destructivo y potente para la determinación de sustancias sólidas (cristalinas o amorfas), posee relativamente elevada resolución espacial y además pueden ser estudiadas las relaciones texturales de los minerales (estructura, fábrica, asociaciones de fases, texturas de reacción) obteniendo así importante información para comprender la génesis de un depósito (Raith *et al.*, 2012).

2.2.1. Microscopio de polarización o petrográfico

Para analizar características mineralógicas y texturales de una roca en lámina delgada con una resolución mayor a la que permite el ojo es necesario usar un microscopio (Figura 2.1). El microscopio de polarización o petrográfico es un instrumento que sirve para determinar las propiedades ópticas de los cristales y estudiar las rocas. Su función primaria es suministrar una imagen aumentada de un objeto ubicado en la platina (Gribble y Hall, 1985; Klein y Hurlbut, 1997; Raith *et al.*, 2012).



Figura 2.1: Microscopio petrográfico.

El aumento se produce por la combinación de dos grupos de lentes, el objetivo y el ocular. La función del lente objetivo, situada en el extremo inferior del tubo microscopio, es producir una imagen nítida y clara. El ocular amplía esta imagen. Un condensador está situado debajo de la platina. La lente superior del condensador, utilizada con objetivos muy potentes, hace que la luz sea altamente convergente, y puede ser girada fácilmente hacia dentro o hacia fuera del sistema óptico. Un diafragma tipo iris, también situado debajo de la platina, puede abrirse o cerrarse para controlar la profundidad de foco y para regular la intensidad de la luz que incide sobre el objeto (Gribble y Hall, 1985; Klein y Hurlbut, 1997).

Además de las lentes, condensador y diafragma, el microscopio de polarización consta de más elementos. El polarizador, situado debajo de la platina, es una placa polarizante, o prisma de Nicol, que transmite luz polarizada en un sólo plano que vibra en la dirección N-S, lo que se denomina luz polarizada plana. El analizador, montado en el tubo situado encima de la platina, es una placa o prisma similar que transmite la luz que vibra sólo en la dirección E-O. El polarizador y analizador

se llaman conjuntamente polares. Cuando los dos polares están en posición, se dice que la muestra se observa con nicoles cruzados. Para cambiar la orientación de los cristales se usa la platina rotatoria cuyo eje de rotación es el mismo que el eje del microscopio (Gribble y Hall, 1985; Klein y Hurlbut, 1997).

2.2.2. Descripción sistemática de minerales en sección delgada utilizando luz transmitida

Las propiedades ópticas de cada mineral se determinan con luz polarizada plana y nicoles cruzados. A luz transmitida estas propiedades son detalladas por Gribble y Hall, (1985) y se resumen a continuación.

2.2.2.1. Propiedades en luz polarizada plana

Color

Los minerales presentan una amplia gama de colores, desde incoloros (como el cuarzo y feldspatos) hasta coloreados (biotita marrón, estauroлита amarilla y hornblenda verde). El color está relacionado con la longitud de onda de la luz visible y depende de la absorción selectiva de ciertas longitudes de onda de la luz visible: en minerales incoloros ninguna longitud es absorbida, en los opacos se absorben todas, y en los coloreados sólo algunas.

Pleocroísmo.

Algunos minerales coloreados cambian de color cuando se gira la platina del microscopio, observándose dos veces los colores extremos durante una rotación completa de 360°. Esta propiedad se conoce como pleocroísmo y se debe a la absorción desigual de la luz por parte del mineral en diferentes orientaciones, debido a su estructura cristalográfica.

Hábito

Se refiere a la forma de un mineral, puede ser euهدral con caras cristalinas bien definidas, o anhedral, sin caras cristalinas definidas. Otros términos descriptivos son prismáticos, cuando el cristal es alargado en una dirección, o acicular, cuando el cristal tiene forma de aguja, o fibroso, cuando los cristales se asemejan a fibras. Los cristales planos y delgados se denominan tabulares o laminares.

Exfoliación

La mayoría de los minerales pueden exfoliarse a lo largo de ciertas direcciones cristalográficas específicas que están relacionadas con planos de debilidad en la estructura atómica del mineral.

Relieve

El borde de los minerales puede aparecer más rugoso cuando el índice de refracción del mineral presenta mayor diferencia con el índice de refracción de la resina de la sección pulida.

Alteración

La causa más común de alteración mineral es el agua o el CO₂ generando fases minerales nuevas y estables. Por ejemplo, el agua reacciona con los feldespatos y produce minerales arcillosos. En secciones delgadas, esta alteración aparece como un área sucia dentro del grano transparente del feldespato. La alteración puede ser tan avanzada que el mineral sea completamente sustituido por una nueva fase mineral. Por ejemplo, olivino pseudomorfizado por serpentina.

2.2.2.2. Propiedades en nicols cruzados

Isotropía

Los minerales que pertenecen al sistema cúbico son isótropos y permanecen oscuros bajo nicols cruzados, independientemente de su orientación óptica. Todos los demás minerales son anisótropos y suelen aparecer coloreados y se extinguen (es decir, se oscurecen) cuatro veces durante una rotación completa de la sección mineral.

Birrefringencia y color de interferencia

El color de la mayoría de los minerales anisótropos en nicols cruzados varía y un mismo mineral muestra diferentes colores dependiendo de su orientación cristalográfica. Estos colores se dividen según ordenes los que se pueden observar en la carta de colores de interferencia de Michel Lévy (Figura 2.2). El grosor de la sección delgada es constante (30 micras), por lo que los colores de interferencia dependen de la birrefringencia; cuanto mayor es la birrefringencia, mayor es el orden de los colores de interferencia.

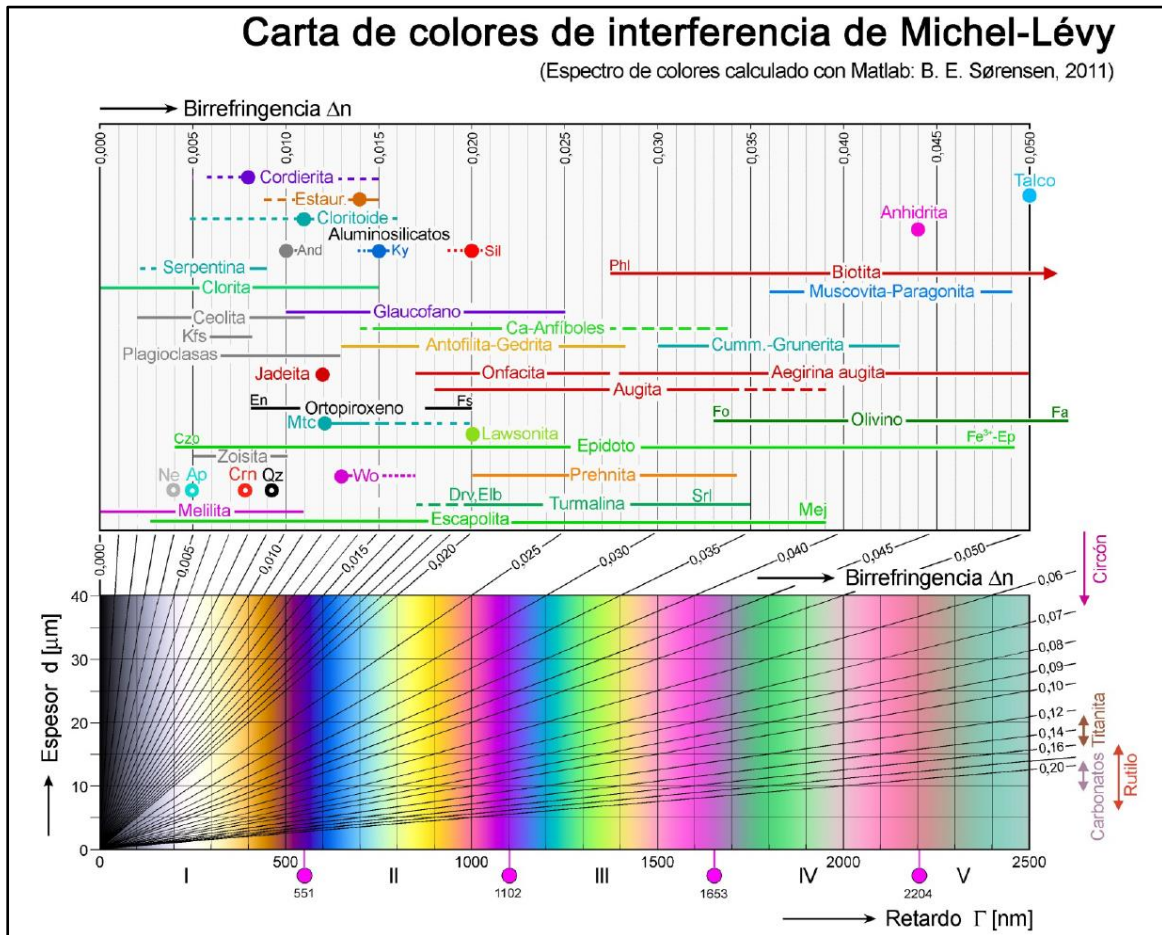


Figura 2.2: Carta de colores de interferencia de Michel Lévy. Extraído de Raith *et al.*, 2012.

Ángulo de extinción

Corresponde al ángulo entre la posición de extinción de un cristal y alguna dirección bien definida del cristal. Los minerales anisótricos se extinguen cuatro veces durante una rotación completa de 360° de una sección mineral.

Zonación

La variación composicional (zonación) dentro de un mismo mineral puede expresarse en términos de cambios de color de una zona a otra contigua; por cambios en la birrefringencia; o por cambios en la orientación de extinción.

2.2.3. Descripción sistemática de minerales en sección delgada utilizando luz reflejada

Las propiedades ópticas de cada mineral se determinan con luz polarizada plana (LPP) y nicoles cruzados (NC). A luz reflejada estas propiedades se detallan en Gribble y Hall, 1985 y se resumen a continuación.

2.2.3.1. Propiedades observadas utilizando luz polarizada plana

Color

La mayoría de los minerales solo presentan un ligero color cuando se observan con LPP y la sensación de color depende de factores como el tipo de microscopio, la fuente de luz y la sensibilidad de los ojos de cada persona.

Pleocroísmo

El color de un mineral varía de un grano a otro y los granos cambian de color al girar la platina.

Reflectancia

Es el porcentaje de luz reflejada por la superficie pulida del mineral. Un mineral con alta reflectancia se verá más iluminado.

Birreflectancia

Es una medida de la diferencia entre los valores máximos y mínimos de reflectancia.

2.2.3.2. Propiedades observadas utilizando nicoles cruzados

Anisotropía

Esta propiedad varía notablemente con la orientación cristalográfica de una sección de un mineral no cúbico. En un mineral isotrópico todos los granos permanecen oscuros al girar la platina y en un mineral fuertemente anisotrópico el cambio es pronunciado en el brillo y color.

Reflejos internos

Corresponde a la luz reflejada desde el interior de ciertos minerales no cúbicos cuando la reflexión en la superficie pulida no es total.

2.3. Difracción de rayos X

El DRX es una técnica común para el estudio de estructuras cristalinas y el espaciado atómico, usada ampliamente para la identificación de fases minerales. Esta técnica se basa en la interferencia constructiva de rayos X monocromáticos y una muestra cristalina. Estos rayos X son generados por un tubo de rayos catódicos, filtrados para producir radiación monocromática, alineados para concentrarlos y dirigidos hacia la muestra (Moore y Reynolds, 1997; Bunaciu *et al.*, 2015).

Los rayos X, fueron descubiertos por primera vez en 1895 por el físico alemán William Conrad Röntgen y años más tarde, en 1912 la difracción de rayos X fue descubierta por Max von Laue (Moore y Reynolds, 1997). Posteriormente, William Henry Bragg y William Laurence Bragg en 1913 desarrollaron lo que se conoce hoy en día como la Ley de Bragg, la cual establece las condiciones necesarias para que los rayos incidentes en una muestra se difracten de manera constructiva en un cristal. Esta ley se traduce en la siguiente fórmula:

$$n \lambda = 2 d \sin \theta$$

donde n es un número entero, λ es la longitud de onda de los rayos X, d es el espaciado interplanar que genera la difracción y θ es el ángulo de difracción (Figura 2.3) (Moore y Reynolds, 1997; Cullity, 1978; Bunaciu *et al.*, 2015). Esta ley relaciona la longitud de onda de la radiación electromagnética incidente con el ángulo de difracción y la separación de la red en una muestra cristalina. Los rayos X difractados se detectan, procesan y cuentan. Escaneando la muestra a través de un rango de ángulos 2θ , todas las posibles direcciones de difracción de la red cristalina deberían alcanzarse debido a la orientación aleatoria del material en polvo. La conversión de los *peaks* de difracción en espaciamientos d permite la identificación del compuesto, ya que cada compuesto tiene un conjunto de espaciamientos d únicos. Esto se consigue comparando los espaciamientos d con patrones de referencia estándar (Bunaciu *et al.*, 2015).

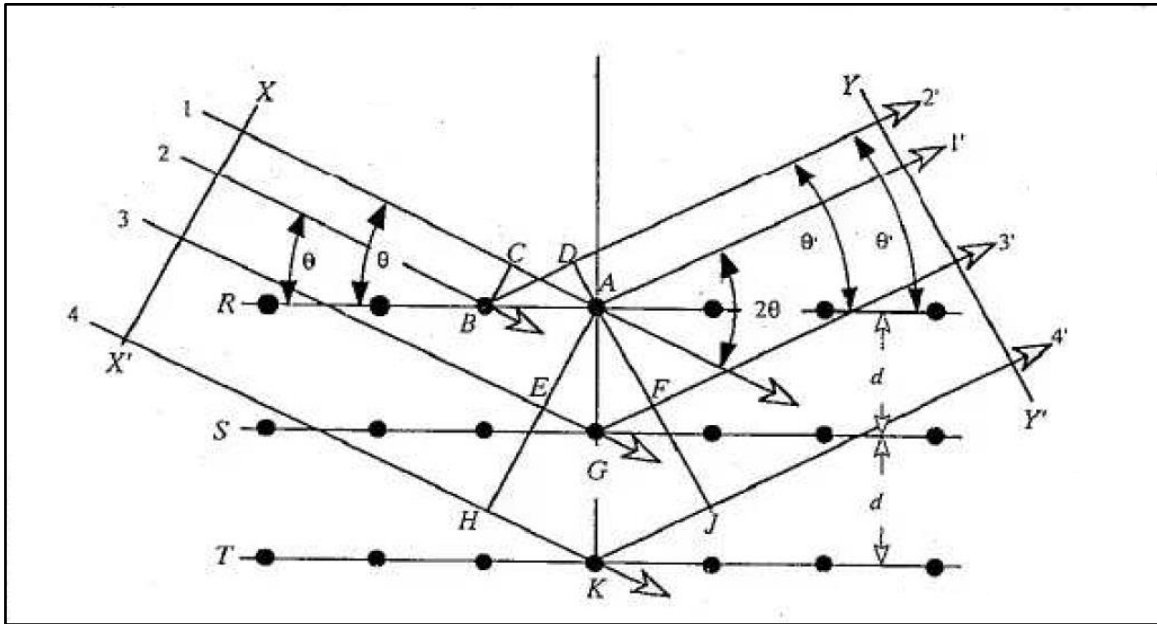


Figura 2.3: Geometría de la difracción constructiva de rayos X. Extraído de Moore y Reynolds (1997).

Los rayos X se generan en un tubo de rayos catódicos calentando un filamento para producir electrones, acelerando los electrones hacia un objetivo aplicando un voltaje y bombardeando el material objetivo con electrones. Cuando los electrones tienen energía suficiente para desalojar los electrones de la capa interna del material objetivo, se producen espectros de rayos X característicos. Estos espectros constan de varios componentes, siendo los más comunes K_{α} y K_{β} . K_{α} se compone, en parte, de $K_{\alpha 1}$ y $K_{\alpha 2}$. $K_{\alpha 1}$ tiene una longitud de onda ligeramente más corta y el doble de intensidad que $K_{\alpha 2}$ (Bunaciu *et al.*, 2015).

Las longitudes de onda específicas son características del material objetivo (Cu, Fe, Mo, Cr). Para producir los rayos X monocromáticos necesarios para la difracción es necesario filtrarlos mediante láminas o monocromador de cristal. El cobre es el material objetivo más común para la difracción monocristalina, con una radiación $\text{CuK}_{\alpha} = 1,5418 \text{ \AA}$. Estos rayos X se coliman y se dirigen hacia la muestra. Al girar la muestra y el detector, se registra la intensidad de los rayos X reflejados. Cuando la geometría de los rayos X incidentes que inciden sobre la muestra satisface la ley de Bragg, se produce una interferencia constructiva y aparece un *peak* de intensidad. Un detector registra y procesa esta señal de rayos X y la convierte en una tasa de recuento, que se envía a un dispositivo como una impresora o un monitor de ordenador (Bunaciu *et al.*, 2015).

Las características esenciales de un difractor se muestran en la Figura 2.4. Una muestra de polvo C, en forma de placa plana, se apoya sobre una superficie H, que puede girar alrededor de un eje O perpendicular al plano del dibujo. La fuente de rayos X es S, el punto focal lineal en el objetivo T del tubo de rayos X; S también es normal al plano del dibujo y, por lo tanto, paralelo al eje O del difractor. Los rayos X divergen de esta fuente y son difractados por la muestra para formar un haz difractado convergente que se enfoca en la rendija F y luego entra en el contador G. A y B son rendijas especiales que definen y colimatan los haces incidente y difractado. El filtro suele colocarse en un soporte especial (no mostrado) en el haz difractado, en lugar de en el incidente; un filtro en el haz difractado no solo cumple su función principal (supresión de la radiación $K\beta$), sino que también reduce la radiación de fondo procedente de la muestra (Cullity, 1978).

Las ranuras receptoras y el contador se apoyan en el carro E, que puede girar alrededor del eje O y cuya posición angular 2θ puede leerse en la escala graduada K. Los soportes E y H están acoplados mecánicamente de modo que una rotación del contador de $2x$ grados va acompañada automáticamente de una rotación de la muestra de x grados. Este acoplamiento garantiza que los ángulos de incidencia y reflexión de la muestra plana sean siempre iguales entre sí e iguales a la mitad del ángulo total de difracción, una disposición necesaria para mantener las condiciones de enfoque. El contador puede ser accionado a una velocidad angular constante alrededor del eje del difractor o movido manualmente a cualquier posición angular deseada (Cullity, 1978).

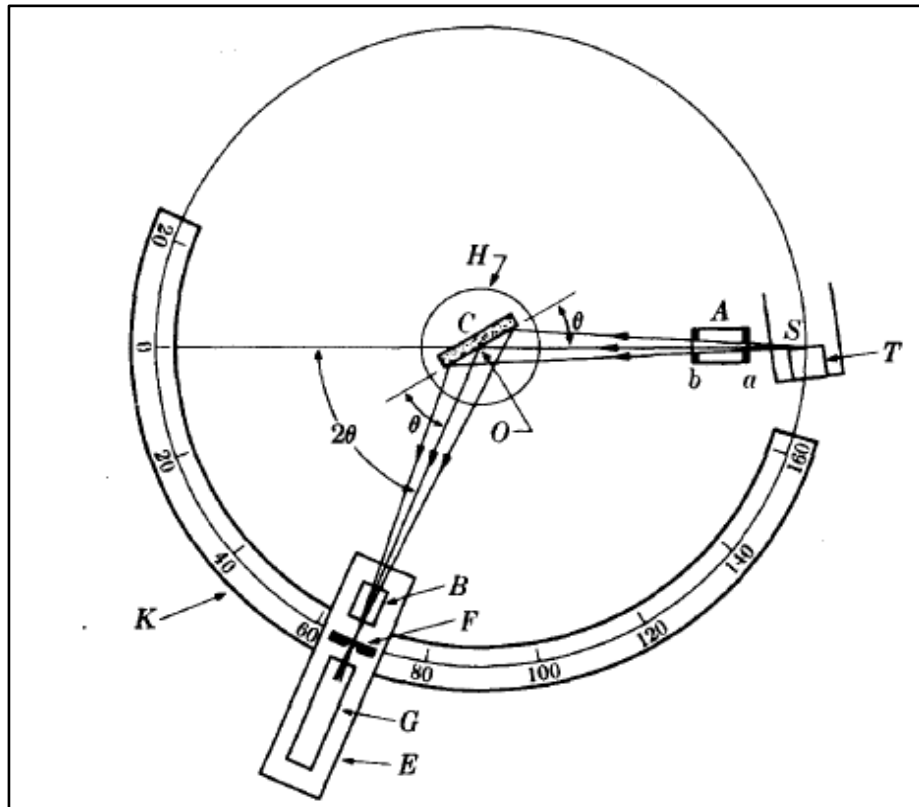


Figura 2.4: Esquemática de difractómetro. Modificado de Cullity, 1978.

La difracción de rayos X en polvo se utiliza sobre todo para la identificación de materiales cristalinos desconocidos (por ejemplo, minerales, compuestos inorgánicos). La determinación de sólidos desconocidos es fundamental para los estudios de geología, ciencias medioambientales, ciencia de los materiales, ingeniería y biología. Otras aplicaciones incluyen la caracterización de materiales cristalinos, la identificación de minerales de grano fino como arcillas y arcillas de capas mixtas que son difíciles de determinar ópticamente, la determinación de las dimensiones de la celda unitaria y la medición de la pureza de la muestra (Bunaciu *et al.*, 2015).

Con técnicas especializadas, la DRX puede utilizarse para determinar estructuras cristalinas mediante el refinamiento de Rietveld, determinar cantidades modales de minerales (análisis cuantitativo), caracterizar muestras de películas delgadas y realizar mediciones de textura, como la orientación de los granos, en una muestra policristalina (Bunaciu *et al.*, 2015).

3. METODOLOGÍA

3.1. Metodología integrada para la caracterización mineralógica

El estudio se basó en una metodología integrada que combina microscopía óptica y DRX para la caracterización mineralógica en cortes transparentes pulidos de muestras provenientes de un depósito de tipo skarn.

Se seleccionaron diez muestras de un conjunto de ejemplares estudiados en el laboratorio de Geología de SGS Minerals identificadas como: M-12, M-26, M-27, M-30, M-36, M-161, M-209, M-222, M-276 y M-287. Estas muestras forman parte de una colección representativa de rocas de skarn con diferentes grados de alteración y mineralización.

3.2. Preparación de muestras

3.2.1. Microscopía óptica

Para la preparación de cortes transparentes, las muestras de roca son cortadas por una sierra (Figura 3.1.A) y se dejan como bloque de roca (*blank*) (Figura 3.1.B), luego se desbasta y se pega a un vidrio de 27 x 46 mm. Posteriormente el *blank* es cortado con una sierra (Figura 3.1.C) y la muestra adosada al vidrio se desbasta hasta llegar a un grosor de 30 μm (Figura 3.1.D). Por último, el corte transparente pasa por el proceso de pulido (Figura 3.1.E) al igual que el *blank* asociado a la muestra (Figura 3.1.F).

3.2.2. Difracción de rayos X

Para la preparación de muestras en polvo se utilizó parte del restante de la roca original (rechazo), la cual fue pulverizada y homogeneizada (Figura 3.2.A). Luego, se vertió 3 g en un portamuestras metálico y se prensó la superficie hasta que quedara pareja y nivelada (Figura 3.2.B). Finalizado este proceso, las muestras fueron montadas y leídas en el equipo de difracción de rayos X Bruker® D8 Endeavor (Figura 3.2.C y Figura 3.2.D). Este equipo está provisto de un tubo de cobalto ($\text{CoK}\alpha$) y fue operado a 35 kV y 28 mA. Las lecturas se procesaron en el rango 2θ de 3° a 70° durante 20 minutos.

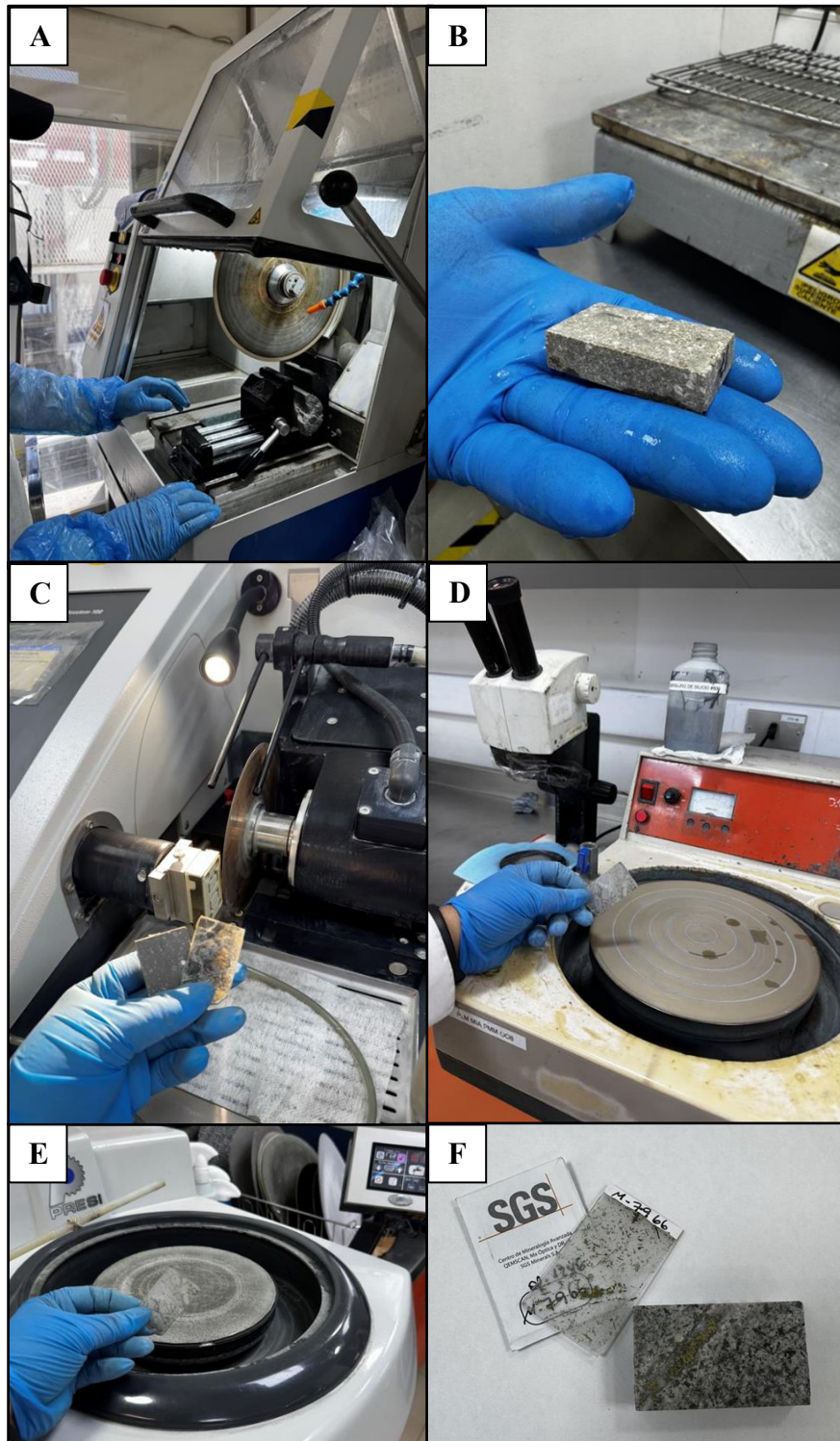


Figura 3.1: Preparación de cortes pulidos. A. Sierra para cortar rocas. B. Bloque de roca (*blank*). C. *Blank* y muestra adosada al vidrio. D. Desbaste de muestra hasta los 30 μm de grosor. E. Corte transparente y pulidora. F. Corte transparente pulido y *blank* asociado a la muestra.

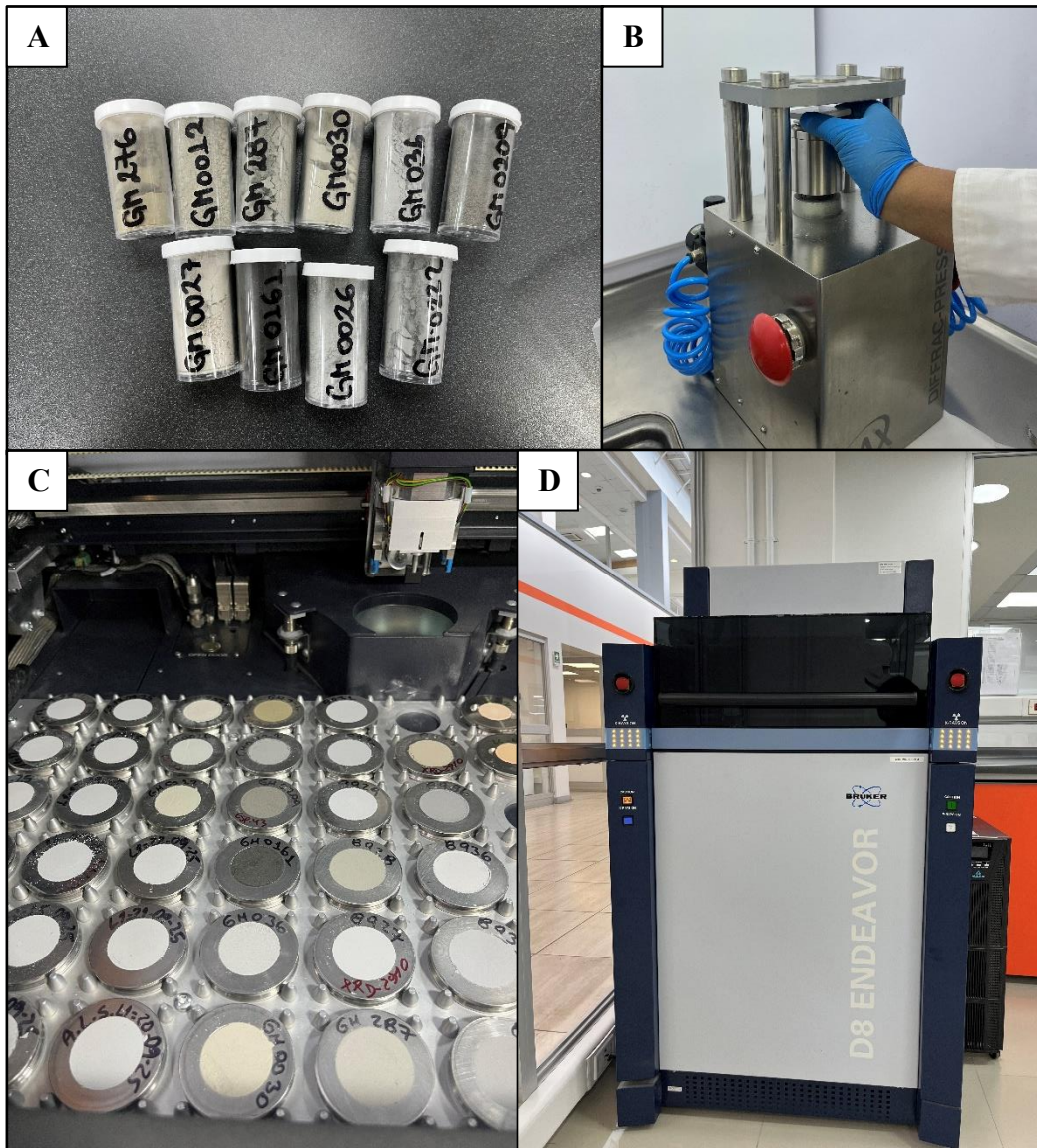


Figura 3.2: Preparación de muestras para difracción de rayos X. A. Muestras de roca pulverizadas. B. Prensado de muestras. C. Muestras montadas en equipo de difracción de rayos X. D. Equipo de lectura de difracción de rayos X Bruker® D8 Endeavor.

3.3. Análisis petrográfico y calcográfico

Las muestras se estudiaron utilizando un microscopio petrográfico Leica DM2700P (Figura 3.3) y se les realizaron los siguientes análisis:

Análisis petrográfico: consiste en la identificación y descripción de los minerales formadores de roca y de alteración mediante luz transmitida en un microscopio petrográfico polarizante en un

corte o sección transparente y/o transparente-pulida. El objetivo de este análisis es obtener una clasificación de la roca analizada, la cuantificación de cada especie mineral mediante estimación visual, además de su ocurrencia, indicando además la textura, tipo y grado de alteración de la roca o muestra.

Análisis calcográfico: consiste en la identificación y descripción de minerales opacos (metálicos) que no transmiten la luz, sino que la reflejan, los que son observados sobre una superficie de roca pulida y/o un(a) sección o corte transparente-pulido mediante luz reflejada al microscopio petrográfico polarizante. La descripción de estas especies minerales incluye cuantificación por medio de una estimación visual, modo de ocurrencia de cada especie, hábito, asociación y relaciones texturales.



Figura 3.3: Microscopio petrográfico Leica DM2700P

3.4. Análisis mediante difracción de rayos X

Los patrones de difracción leídos por el equipo Bruker® D8 Endeavor fueron procesados mediante el software DIFFRAC.EVA 7.1, utilizando la base de datos del Centro Internacional de Datos de Difracción (ICCD), PDF-5+ 2025 para la identificación de fases minerales.

3.5. Integración e interpretación

Una vez obtenidos los resultados de microscopía óptica y DRX, se procedió a su revisión e integración con el objetivo de confirmar y validar la presencia de fases minerales, asegurando una caracterización mineralógica óptima de los cortes transparentes.

4. RESULTADOS

4.1. M-0012

La muestra consiste en una roca completamente afectada por una alteración pervasiva de calcita y menor siderita junto a una asociación de serpentina-clorita, con clorita intercrecida con posible antigorita, además de cúmulos locales de lizardita (Figura 4.1). En función de su mineralogía y textura (Tabla 4.1), la roca se clasifica como un skarn de serpentina-clorita.

El skarn es cortado por vetillas que están asociadas con alteración puntual de pirita-calcopirita. La mineralización de magnetita se asocia esencialmente a la lizardita y calcita.

Tabla 4.1. Mineralogía de la muestra M-0012.

Mineral	%	Características especiales / Modo de ocurrencia
Clorita	25	Alteración masiva dispuesta como relleno masivo entre la calcita e intercrecida con la serpentina.
Lizardita	15,5	Cúmulos y/o "parches" u oquedades rellenas con lizardita asociada localmente con opacos. En matriz fina intercrecida con clorita
Antigorita	10	Alteración masiva en matriz rellenando intersticios entre carbonatos e intercrecida con clorita
Calcita	40	Alteración masiva con cristales y cúmulos diseminados en toda la muestra. Relleno parcial de vetillas
Siderita	3	Cristales diseminados asociados con clorita y localmente a pirita
Pirita	4,5	Cristales diseminados entre carbonatos y clorita-serpentina. Asociación con calcopirita y magnetita
Calcopirita	1	Reemplazo de pirita en cúmulos y asociación local con magnetita
Magnetita	1	Asociación con pirita en guías y diseminado

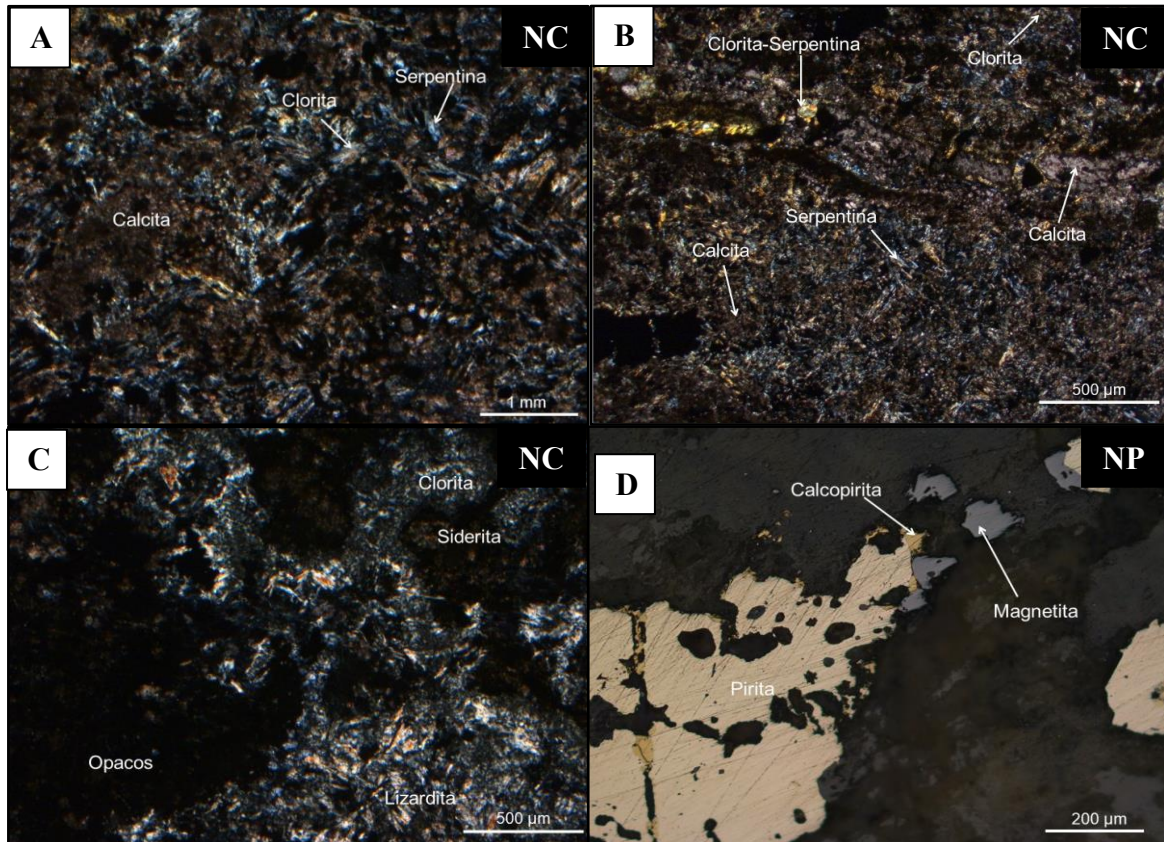


Figura 4.1: Fotomicrografías de la muestra M-0012. A) Alteración masiva de clorita interrecida con serpentina y calcita. B) Muestra cortada por vetilla de clorita-serpentina. C) Cristales diseminados de siderita junto con clorita interrecida con lizardita. D) Cristales de calcopirita y magnetita asociadas a pirita.

Los minerales identificados de la lectura de difracción de rayos X de la muestra M-0012 (Figura 4.2) son: calcita, antigorita (serpentina), clinocloro (clorita), lizardita (serpentina), magnetita, pirita y cuarzo.

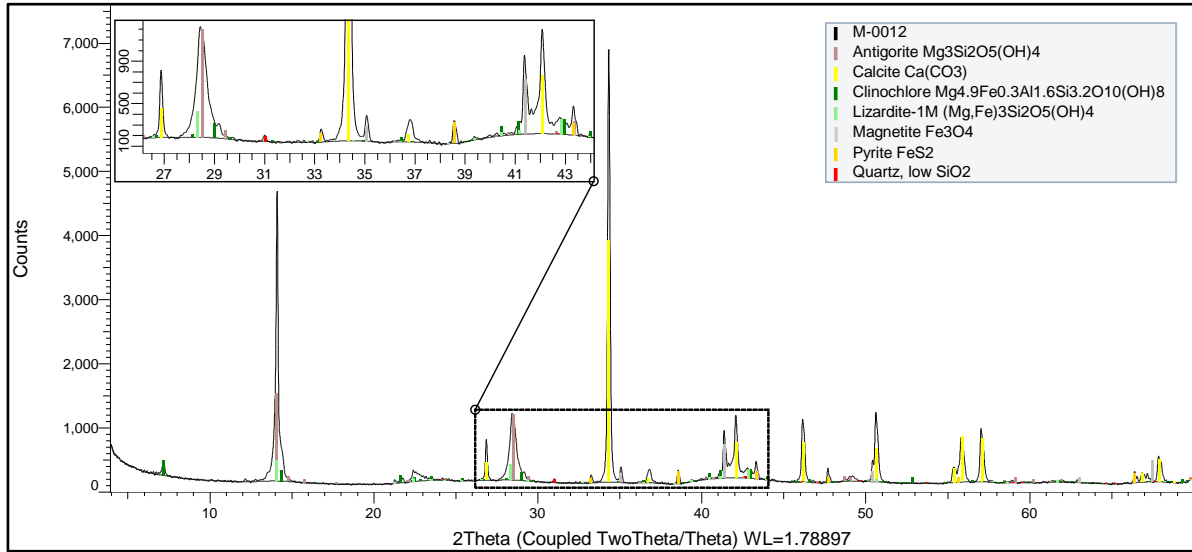


Figura 4.2: Difractograma de la muestra M-0012.

4.2. M-0026

La muestra corresponde a una roca completamente skarnificada, caracterizada por una alteración masiva en zonas de actinolita-tremolita masiva y otras zonas ricas en micas, dispuestas en general en cúmulos de gran tamaño y en algunas zonas de traslape donde ambas fases: micas y anfíboles, se observan entrecrecidos (Figura 4.3). De manera puntual se identifican cristales relictos de piroxeno, posiblemente diópsido, parcialmente reemplazados por actinolita–tremolita y por talco.

La mineralización metálica consiste en pirita y menor calcopirita asociadas en las zonas ricas en actinolita/tremolita. En función de su composición mineralógica (Tabla 4.2), la roca se clasifica como un skarn de tremolita–actinolita/mica.

Tabla 4.2. Mineralogía de la muestra M-0026.

Mineral	%	Características especiales / Modo de ocurrencia
Tremolita-Actinolita	53	Ocurrencia masiva, parcialmente asociado con mica y puntualmente reemplazando por piroxenos
Flogopita	38	Cúmulos de cristales euhedrales y subhedrales. Asociación parcial con tremolita/actinolita
Diópsido	1,5	Cristales relictos con reemplazo de actinolita y talco
Talco	4	Presencia en cúmulos y/o "parches" al parecer como reemplazo de piroxenos
Pirita	3,2	Granos diseminados asociados con actinolita y junto a calcopirita
Calcopirita	0,3	Granos diseminados asociados con actinolita y junto a pirita

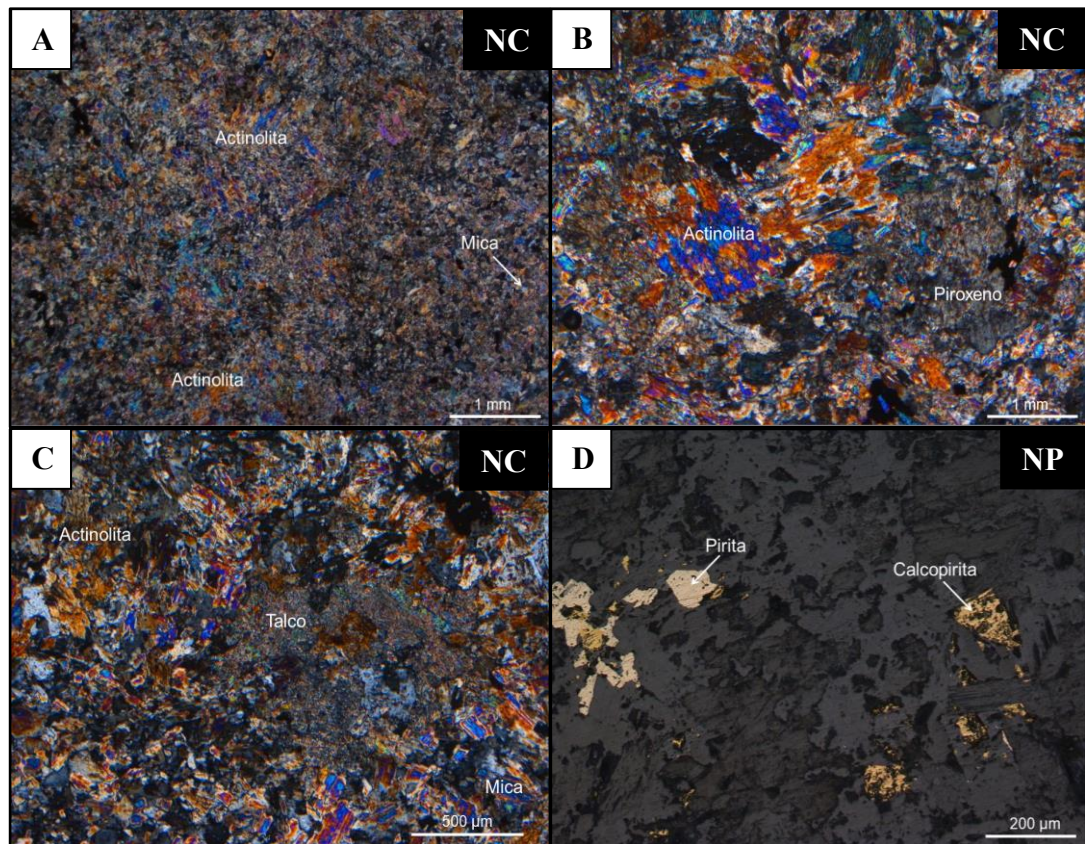


Figura 4.3: Fotomicrografías de la muestra M-0026. A) Alteración masiva de actinolita asociada con mica B) Cristales relictos de piroxeno con reemplazo de actinolita y posible talco. C) Talco posiblemente reemplazando piroxenos. D) Cristales de calcopirita y pirita asociados a actinolita.

Los minerales identificados de la lectura de difracción de rayos X de la muestra M-0026 (Figura 4.4) son: flogopita, talco, clinocloro (clorita), actinolita (anfíbol), tremolita (anfíbol), diópsido (piroxeno), pirita.

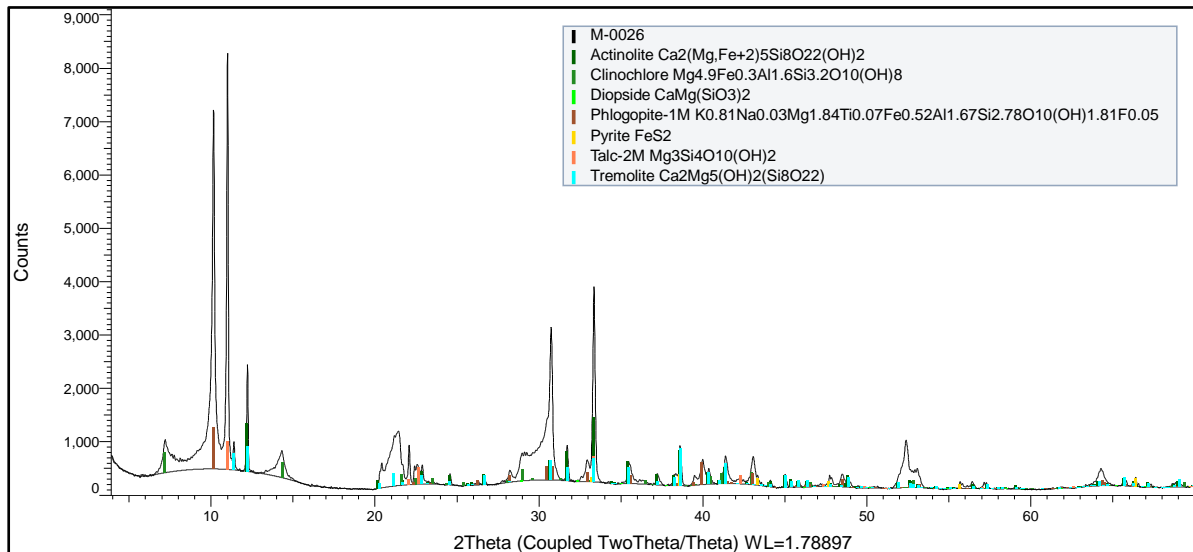


Figura 4.4: Difractograma de la muestra M-0026.

4.3. M-0027

La muestra consiste en una roca alterada masivamente por talco. Este mineral ocurre por reemplazo a modo de pseudomorfización de una zona primitiva rica en cúmulos de olivino, de los cuales se conserva su forma. Entre los espacios de estos pseudomorfos talcificados se reconoce relleno intersticial de serpentina (lizardita) y clorita, reconociéndose también oquedades y fracturas menores con siderita asociada con lizardita (Figura 4.5). En función de su composición mineralógica (Tabla 4.3), la roca se clasifica como un skarn de talco-serpentina.

Tabla 4.3. Mineralogía de la muestra M-0027.

Mineral	%	Características especiales / Modo de ocurrencia
Talco	63	Alteración masiva como pseudomorfos de cúmulos de olivino primitivos
Lizardita	9,5	Relleno de espacios entre los cristales pseudomorfizados de olivino y relleno de oquedades junto a siderita
Clorita	18	Relleno de espacios y oquedades entre los granos pseudomorfizados de olivino
Siderita	7	Relleno de oquedades y fracturas asociada con lizardita
Pirita	2	Pequeñas guías de pirita asociada con calcopirita menor y granos diseminados, incluyendo granos muy finos dispersos por toda la muestra
Calcopirita	0,4	Granos asociados a pirita y pequeños granos diseminados
Rutilo	0,1	Pequeños granos aislados

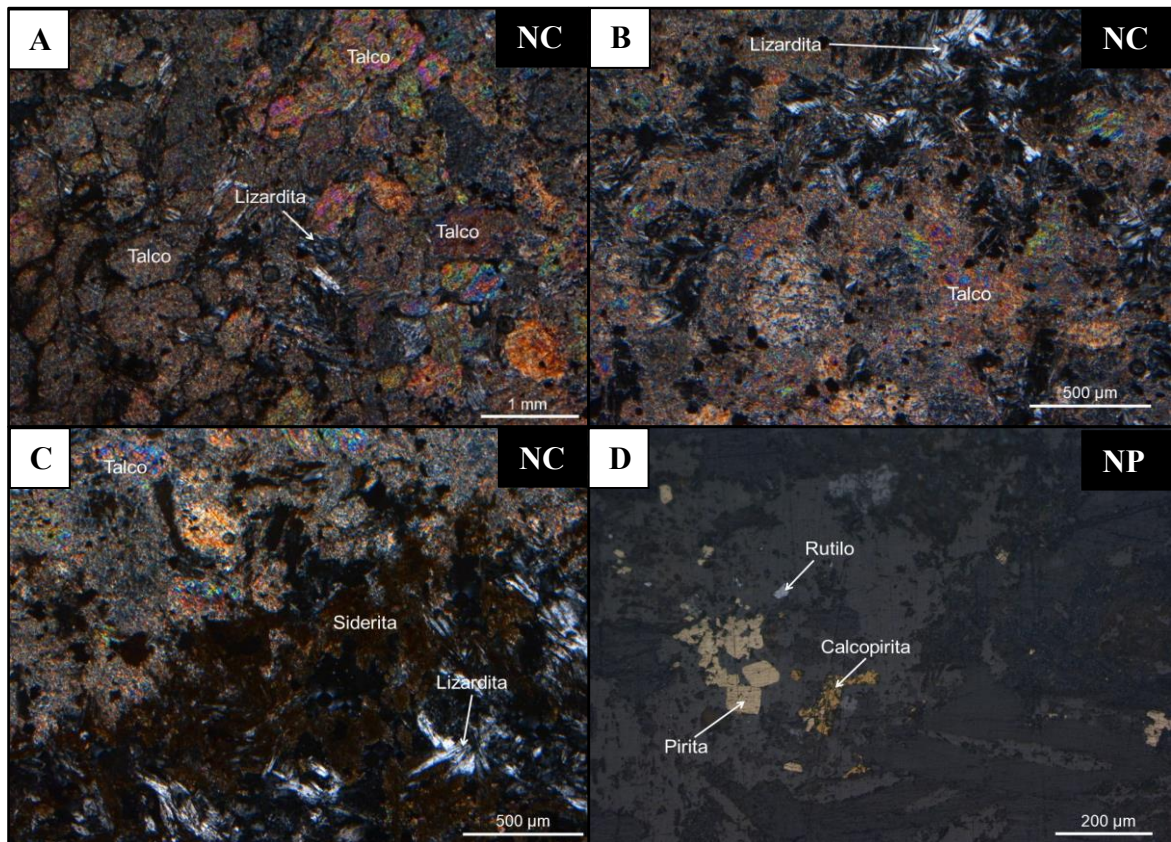


Figura 4.5: Fotomicrografías de la muestra M-0027. A) Alteración masiva de talco como pseudomorfos de olivino con relleno de lizardita. B) Alteración masiva de talco y relleno de lizardita. C) Alteración masiva de talco con relleno de lizardita y siderita. D) Cristales de calcopirita y pirita diseminados.

Los minerales identificados de la lectura de difracción de rayos X de la muestra M-0027 (Figura 4.6) son: talco, lizardita (serpentina), clinocloro (clorita), flogopita, siderita, pirita.

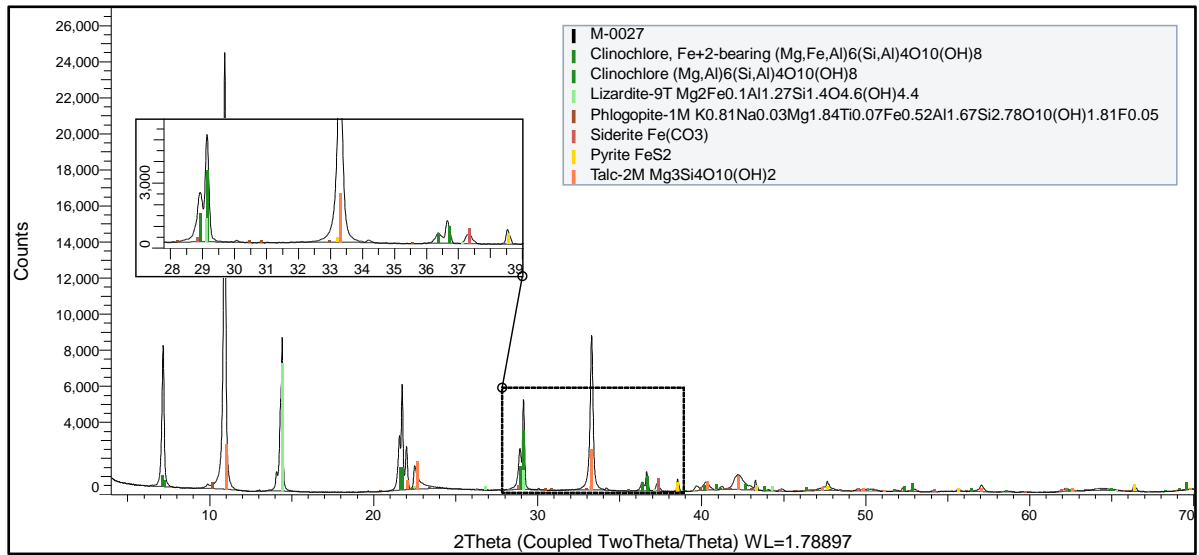


Figura 4.6: Difractograma de la muestra M-0027.

4.4. M-0030

La muestra consiste en una roca completamente alterada mayoritariamente por diópsido en agregados masivos de cristales subhedrales y euhedrales con intercrecimiento y/o reemplazo posterior de tremolita-actinolita (Figura 4.7). Además, la muestra se compone de actinolita-tremolita en cristales gruesos prismáticos, los cuales se disponen tanto entre el diópsido o bien se presentan como agregados masivos con menor cuarzo y albita intersticial. De manera local, se reconocen cúmulos de micas incoloras en cristales subhedrales a euhedrales dispuestas entre los cristales de diópsido y de la actinolita-tremolita. Finalmente, de forma muy puntual se reconoce calcita y siderita, asociados a cuarzo y albita, entre las micas y actinolita-tremolita. En función de su mineralogía (Tabla 4.4), la roca se clasifica como un skarn de tremolita-diópsido.

Tabla 4.4. Mineralogía de la muestra M-0030.

Mineral	%	Características especiales / Modo de ocurrencia
Diópsido	48	Cúmulos de diópsido en cristales subhedrales y euhedrales, localmente intercrecidos con actinolita-tremolita posterior
Tremolita-Actinolita	31	Ocurrencia masiva en cristales prismáticos gruesos. Reemplazo local de diópsido
Flogopita	9	Pequeños cristales subhedrales intercrecidos con la tremolita-actinolita
Cuarzo	3	Ocurrencia intersticial entre cristales de actinolita
Albita	5	Ocurrencia intersticial entre cristales de actinolita
Calcita	1	Pequeños cristales asociados con albita-cuarzo-actinolita
Siderita	1	Cristales diseminados o intersticiales entre micas y anfíbolos
Pirita	1,5	Granos diseminados intercrecidos con la actinolita/tremolita
Calcopirita	0,5	Granos diseminados intercrecidos con la actinolita/tremolita

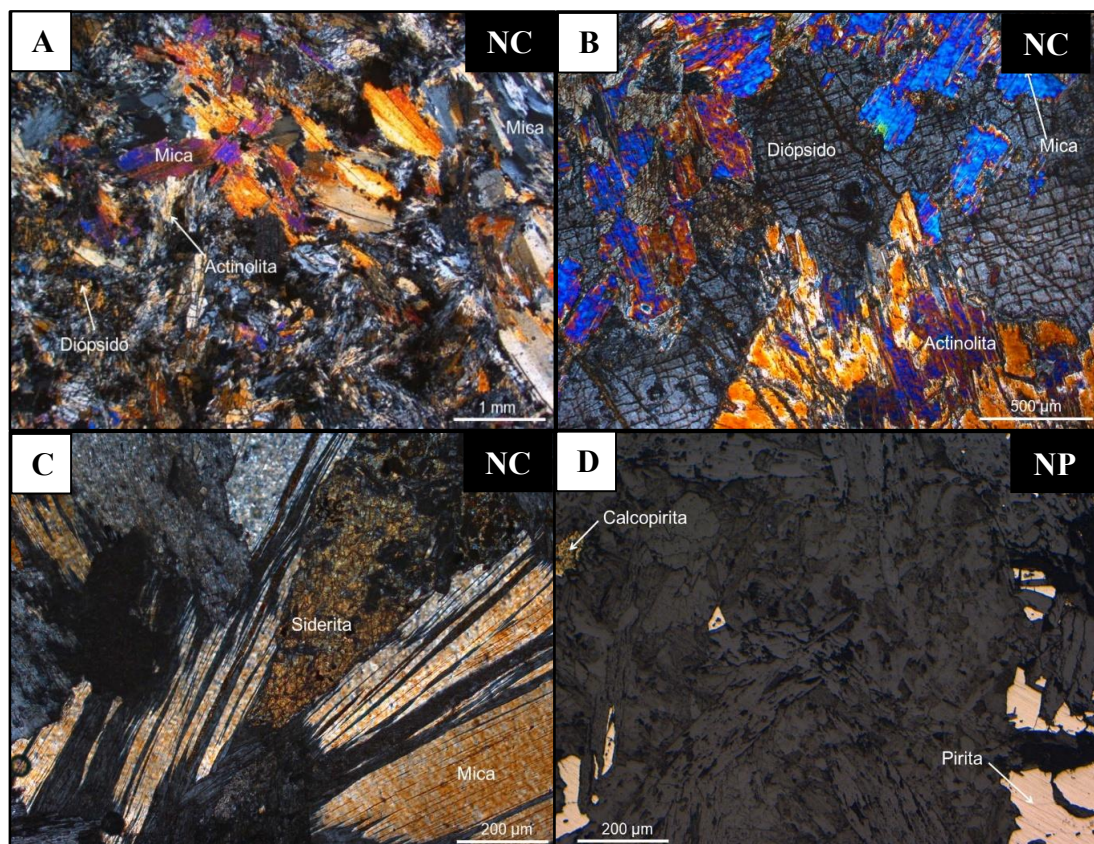


Figura 4.7: Fotomicrografías de la muestra M-0030. A) Ocurrencia masiva de tremolita-actinolita con intercrecimiento de flogopita. B) Cúmulos de diópsidos. C) Siderita diseminada entre micas. D) Cristales de calcopirita y pirita diseminados.

Los minerales identificados de la lectura de difracción de rayos X de la muestra M-0030 (Figura 4.8) son: actinolita, tremolita, flogopita, clinocloro (clorita), diópsido, talco, siderita y cuarzo.

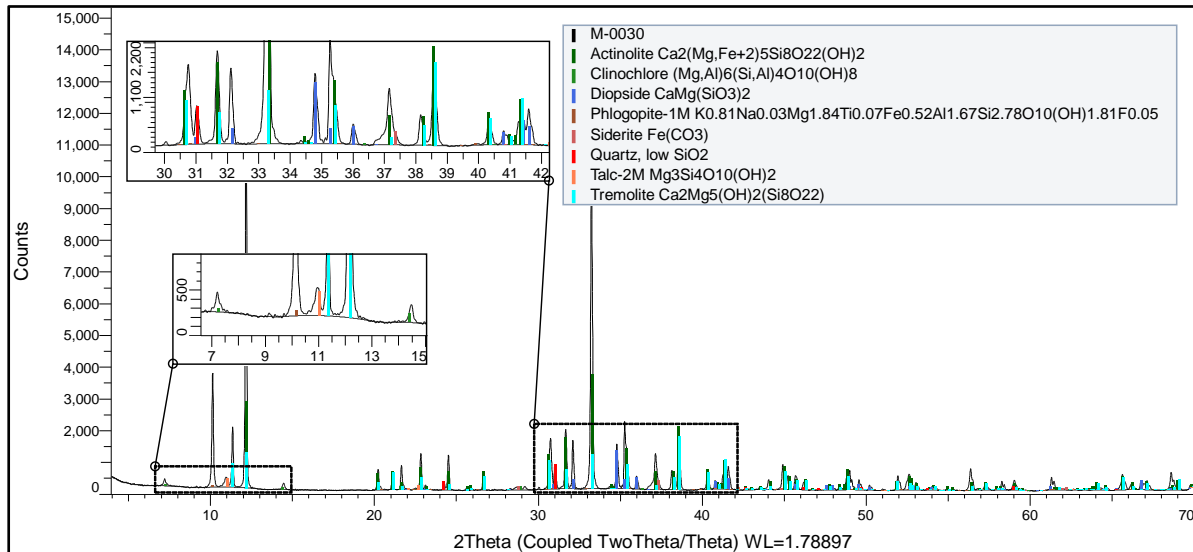


Figura 4.8: Difractograma de la muestra M-0030.

4.5. M-0036

La muestra corresponde a una roca intrusiva de textura fanerítica inequigranular compuesta por cristales subhedrales de plagioclasa con alteración leve a moderada de albita y feldespato potásico con una superposición posterior de sericita y alteración menor a arcillas (Figura 4.9). Estos cristales se encuentran inmersos en una masa intersticial de grano más fino de cristales anhedral de cuarzo y menor feldespato potásico. Se observan algunos cristales subhedrales de biotita de bordes parcialmente irregulares con alteración menor de clorita y sericita. De manera puntual aparece biotita de grano más fino posiblemente asociada con una alteración potásica débil temprana. La muestra es cortada por una veta de cuarzo gruesa que desarrolla un halo de sericita gruesa que afecta a los feldespatos y plagioclasas. La mineralización metálica se concentra en la veta y halo, consiste en pirita, calcopirita y escasa molibdenita. En función de su composición mineralógica y textura (Tabla 4.5), la muestra se clasifica como granodiorita.

Tabla 4.5. Mineralogía de la muestra M-0036.

Mineral	%	Características especiales / Modo de ocurrencia
Plagioclasa	37	Cristales subhedrales
Cuarzo	27	Relleno de veta gruesa. Cristales anhedrales intersticiales
Feldespato potásico	14	Cristales anhedrales intersticiales. Reemplazo de plagioclasas asociada alteración potásica
Biotita	5	Cristales subhedrales y pequeños cristales asociados a alteración potásica anterior
Sericita	11	Reemplazo de plagioclasas y menor de feldespatos; Halos de vetillas, reemplazo débil de biotita
Caolinita	1	Reemplazo de feldespatos
Clorita	0,5	Reemplazo de biotita
Pirita	2,8	Relleno de vetillas, diseminado irregular en halos y roca
Calcopirita	1,5	Relleno de vetillas, diseminado irregular en halos
Molibdenita	0,05	Ocurrencia en cristales tabulares pequeños en veta de cuarzo
Rutilo	0,15	Ocurrencia diseminada

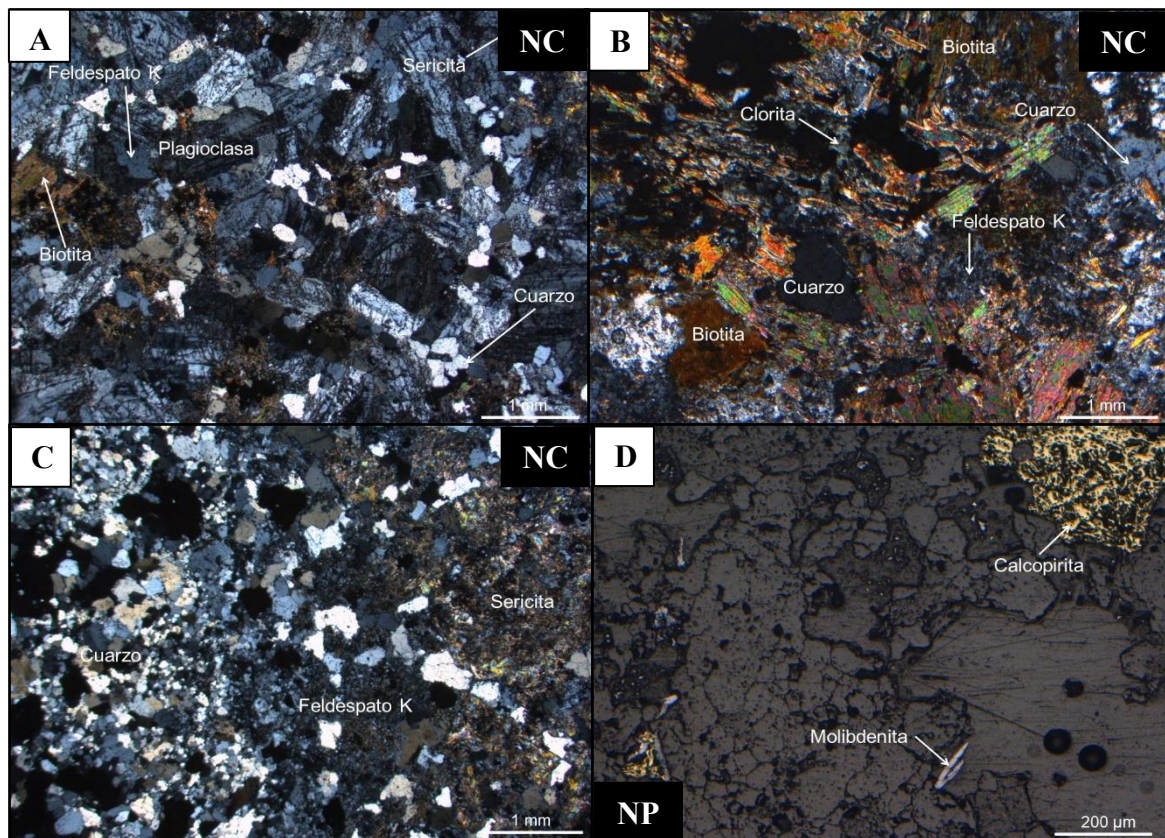


Figura 4.9: Fotomicrografías de la muestra M-0036. A) Plagioclasas, cuarzo y feldespato potásico intersticial B) Cristales de biotitas y clorita en reemplazo. C) Veta de cuarzo D) Cristales de calcopirita y molibdenita.

Los minerales identificados de la lectura de difracción de rayos X de la muestra M-0036 (Figura 4.10) son: cuarzo, anortita (plagioclasa), biotita, chamosita (clorita), muscovita, ortoclasa, calcopirita, pirita y molibdenita.

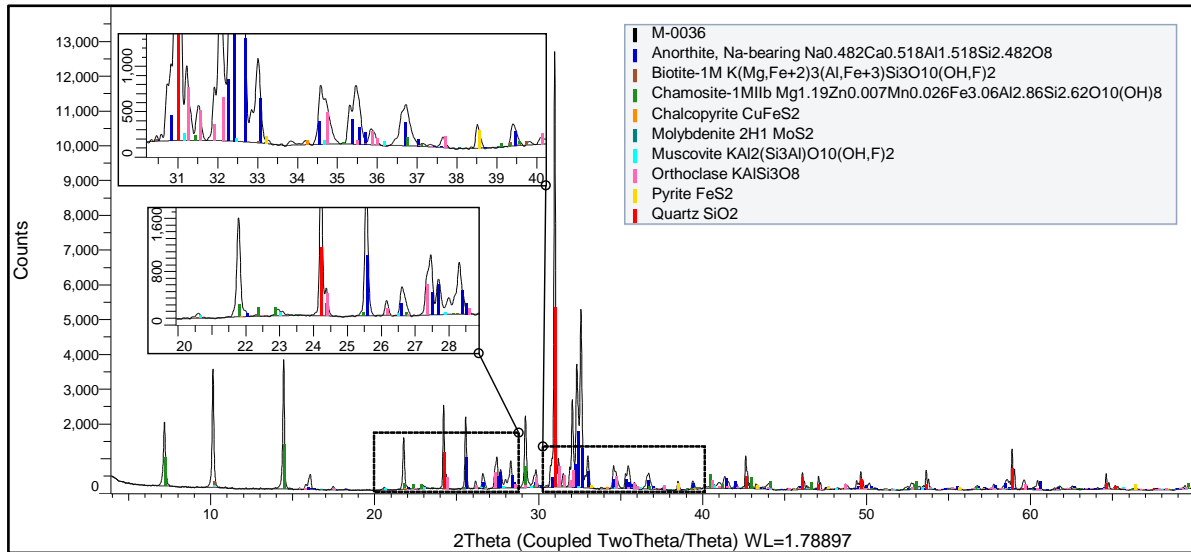


Figura 4.10: Difractograma de la muestra M-0036.

4.6. M-0161

La muestra corresponde a una roca completamente alterada compuesta mayormente de magnetita masiva. Esta magnetita se encuentra inmersa en una alteración masiva de lizardita, junto con serpentina fina indiferenciada finamente intercrecida con clorita. Puntualmente, se reconoce talco rellenando intersticios y siderita como producto de alteración de magnetita. La muestra es atravesada por una estructura compuesta por cristales bien desarrollados de dolomita, rellenando espacios entre la magnetita. Asociado al reemplazo de la magnetita se reconocen sulfuros, como pirita sobrecreciendo a la magnetita, además de pirrotina y calcopirita reemplazando a la pirita y magnetita. La pirrotina también se presenta localmente entrecrecida entre el clivaje de la serpentina (Figura 4.11). En función a su mineralogía (Tabla 4.6) la muestra se clasifica como skarn de magnetita-serpentina.

Tabla 4.6. Mineralogía de la muestra M-0161.

Mineral	%	Características especiales / Modo de ocurrencia
Lizardita	12,5	Ocurrencia masiva asociada con siderita-magnetita. Relleno intersticial muy fino intercrecido con clorita
Clorita	5	Presente en la matriz de grano fino intercrecida con la serpentina indiferenciada
Talco	3	Relleno de intersticios entre cristales de magnetita
Dolomita	2,5	Relleno intersticial entre sulfuros y siguiendo estructuras. Cristales polihédricos zonados
Siderita	1,5	Producto de alteración de la magnetita, granos disseminados asociados con lizardita
Magnetita	55	Ocurrencia masiva de cúmulos inmersos en la lizardita, reemplazo parcial de siderita. Asociación con pirrotina-pirita-calcopirita
Pirita	10	Cúmulos reemplazando a magnetita y reemplazada por calcopirita
Pirrotina	8	Reemplazo envolvente de magnetita y localmente entrecrecida entre el clivaje de la serpentina
Calcopirita	2,5	Reemplazando a pirita y pirrotina, reemplazo envolvente a la magnetita

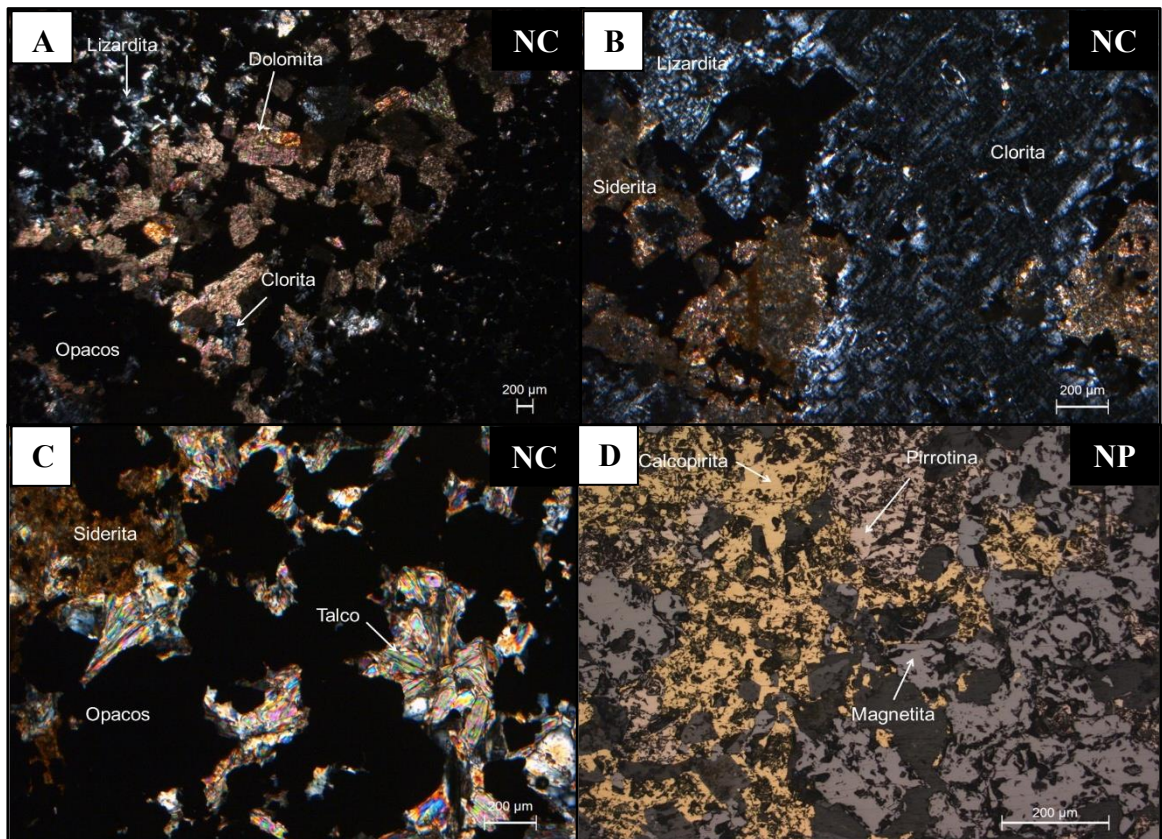


Figura 4.11: Fotomicrografías de la muestra M-0161. A) Cristales de dolomita. B) Clorita intercrecida con lizardita. C) Talco como relleno de intersticios entre magnetita. D) Magnetita masiva junto a calcopirita y pirrotina.

Los minerales identificados de la lectura de difracción de rayos X de la muestra M-0161 (Figura 4.12) son: magnetita, clinocloro (clorita), lizardita (serpentina), pirita, pirrotina, dolomita, talco, siderita y calcopirita.

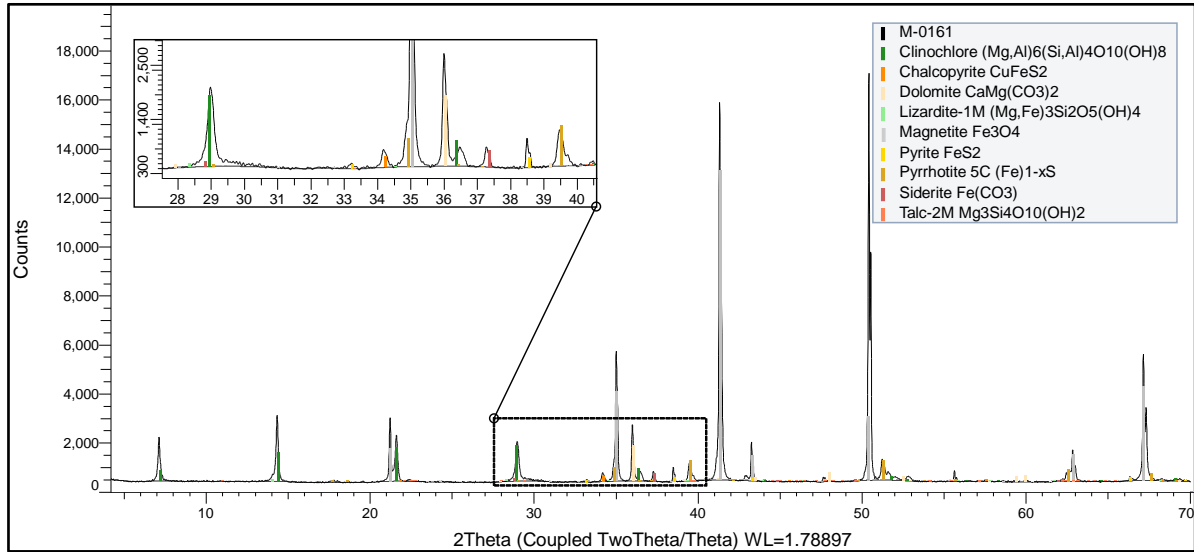


Figura 4.12: Difractograma de la muestra M-0161.

4.7. M-0209

La muestra corresponde a una roca completamente alterada, compuesta principalmente de magnetita masiva inmersa en una matriz mayoritariamente de serpentina muy fina e indiferenciada, intercrecida con clorita producto de alteración de olivino (Figura 4.13). Entre los cúmulos masivos de magnetita se reconocen cúmulos de cristales de olivino fracturados y rodeados por una alteración masiva de serpentina intercrecida finamente con clorita. Dentro de esta matriz de serpentina se identifican zonas menores con cristales más desarrollados de lizardita. Se observa siderita producto de alteración de la magnetita. Entre los espacios de los cúmulos de magnetita se identifica pirita. En función de su mineralogía (Tabla 4.7) la muestra se clasifica como skarn de magnetita-serpentina.

Tabla 4.7. Mineralogía de la muestra M-0209.

Mineral	%	Características especiales / Modo de ocurrencia
Lizardita	18	Intercrecimiento fino con clorita en matriz. Cúmulos y parches rodeando a granos de olivino y asociados con siderita-magnetita
Clorita	5	Presente en la matriz de grano fino intercrecida con la serpentina
Olivino	17	Cúmulos de granos parcialmente fracturados envueltos por serpentina-lizardita
Siderita	5	Producto de alteración de la magnetita principalmente en los bordes de ésta
Magnetita	54	Cúmulos masivos inmersos en la serpentina con relictos de olivino en los espacios intergranulares
Pirita	1	Presencia local asociada con magnetita rellenando intersticios entre cúmulos de magnetita y como cristales mayores locales

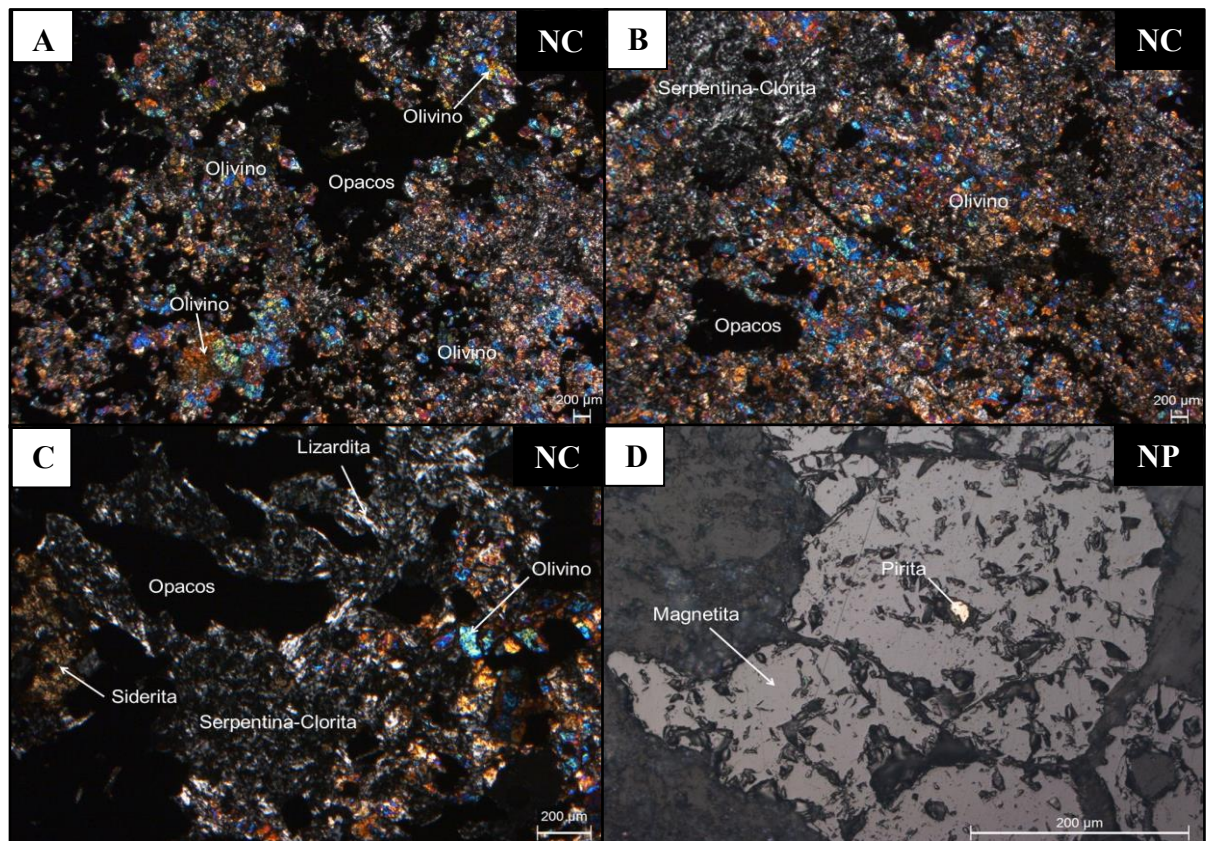


Figura 4.13: Fotomicrografías de la muestra M-0209. A) Cúmulos de olivino. B) y C) Cúmulos de olivino envuelto por serpentina-clorita. D) Magnetita masiva.

Los minerales identificados de la lectura de difracción de rayos X de la muestra M-0209 (Figura 4.14) son: magnetita, clinocloro (clorita), lizardita (serpentina), forsterita, hydroxylclinohumita.

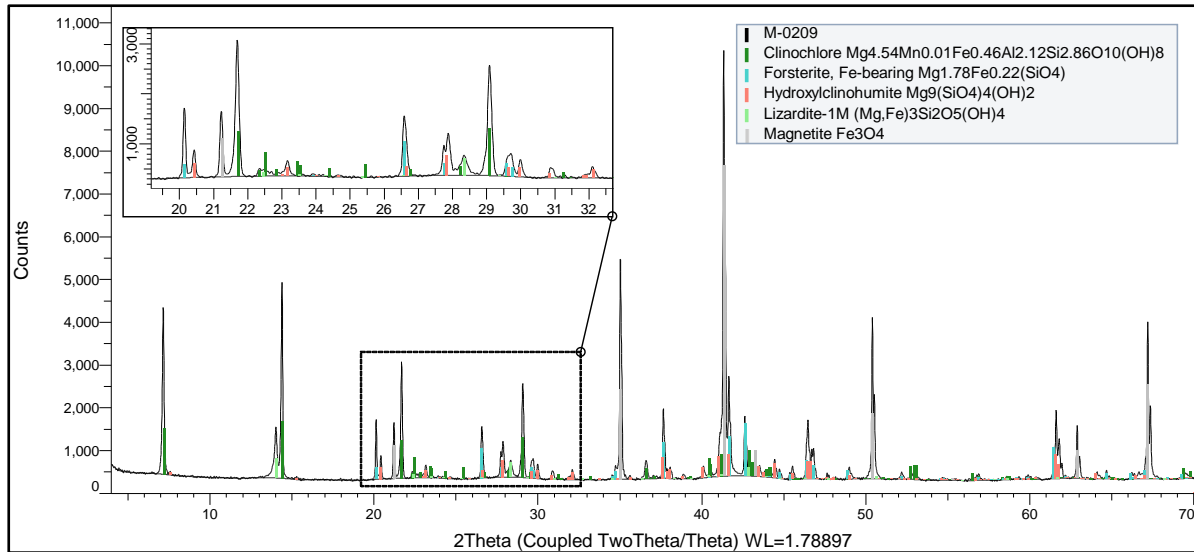


Figura 4.14.: Difractograma de la muestra M-0209.

4.8. M-0222

La muestra corresponde a una roca completamente alterada, compuesta mayormente por serpentina y clorita masiva (Figura 4.15). Esta asociación muestra variaciones locales en su distribución, con cúmulos de serpentina del tipo antigorita y delgadas bandas de serpentina del tipo lizardita, mientras que el resto de la matriz está constituido por un intercrecimiento fino de clorita con serpentina indiferenciada. Distribuidos de manera irregular en la muestra se reconocen cúmulos de siderita y dolomita que se presentan como relleno de fracturas discontinuas. De manera muy puntual se observa talco en la matriz, posiblemente como alteración de relictos de olivino. La mineralización metálica se compone en cúmulos de pirita asociada a magnetita, la que presenta un reemplazo de esfalerita y calcopirita, encontrándose éstas dos últimas localmente en textura de exsolución. En función de su mineralogía (Tabla 4.8) la muestra se clasifica como un skarn de serpentina.

Tabla 4.8. Mineralogía de la muestra M-0222.

Mineral	%	Características especiales / Modo de ocurrencia
Lizardita	24	Ocurrencia en bandas ricas en serpentina dentro de la matriz de serpentina-clorita, intercrecida con clorita
Clorita	21	Presente en la matriz de grano fino intercrecida con serpentina indiferenciada
Antigorita	37	Alteración en cúmulos locales dentro de la matriz asociada con talco. En matriz fina intercrecida con clorita
Talco	1,25	Pequeños parches inmersos en la matriz de serpentina. Posiblemente asociado a relictos de olivino
Siderita	4.5	Cúmulos dispersos a lo largo de la matriz. Producto de alteración de magnetita en bordes
Dolomita	3	Cúmulos locales y relleno de estructuras irregulares de espacios abiertos.
Magnetita	2	Ocurrencia masiva de cúmulos locales inmersos en la serpentina, con reemplazo de calcopirita y esfalerita
Pirita	6	Cúmulos reemplazados por esfalerita y calcopirita
Esfalerita	0,75	Reemplazando a pirita, intercrecida con calcopirita en textura de exsolución localmente
Calcopirita	0,5	Reemplazando a pirita e intercrecida con la esfalerita y como reemplazo de magnetita

Los minerales identificados de la lectura de difracción de rayos X de la muestra M-0222 (Figura 4.16) son: talco, antigorita, lizardita, calcopirita, magnetita, calcita, dolomita, pirita, siderita y clinocloro (clorita).

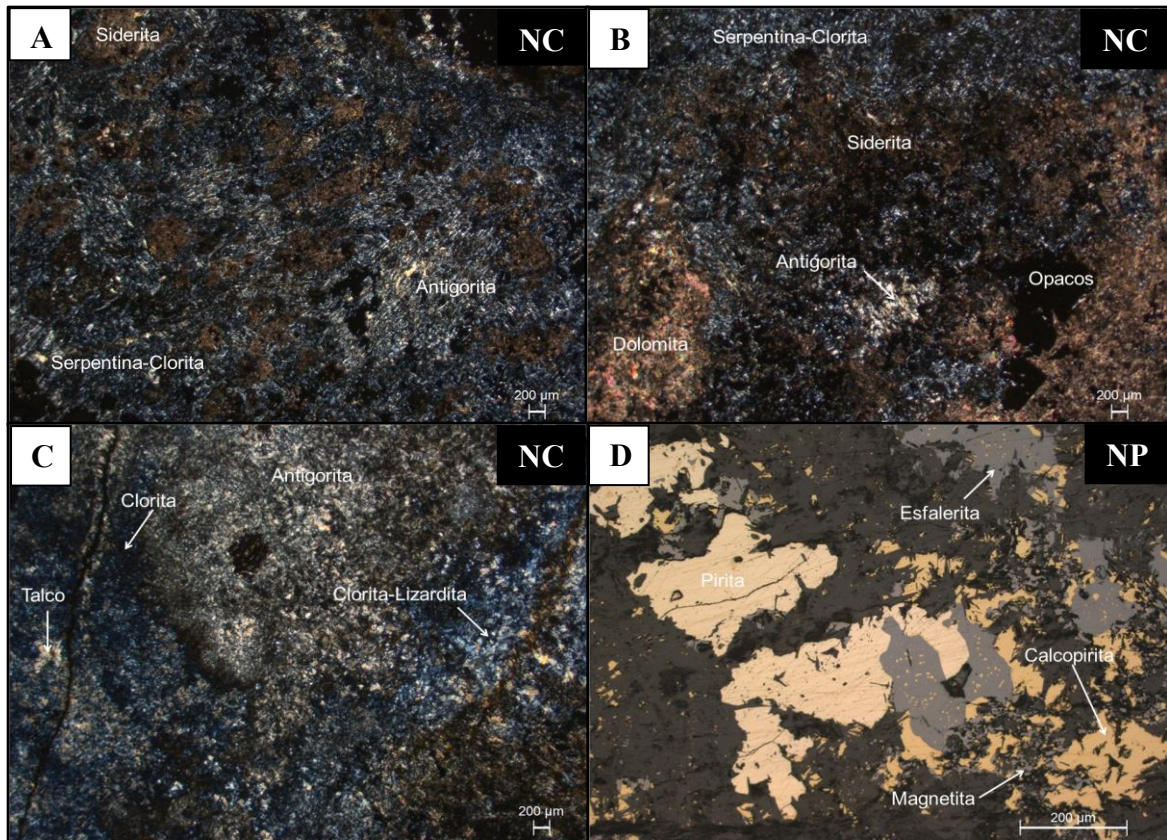


Figura 4.15: Fotomicrografías de la muestra M-0222. A) Cúmulos de siderita en matriz de serpentina-clorita. B) Cúmulos de siderita y dolomita en matriz de serpentina-clorita. C) Matriz fina de clorita-lizardita junto a antigorita. D) Calcopirita y esfalerita reemplazando a pirita.

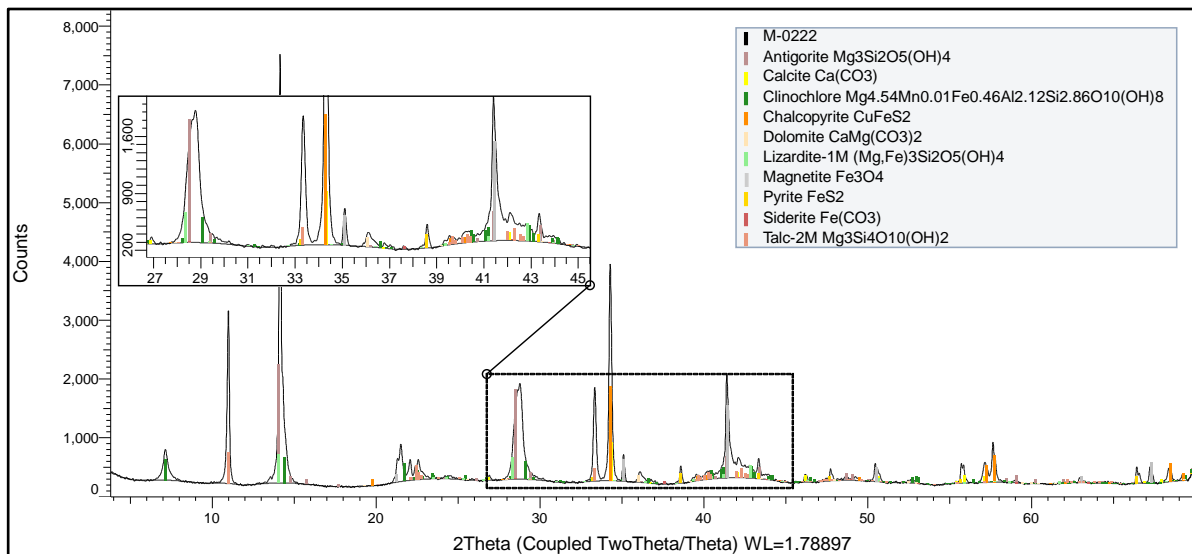


Figura 4.16: Difractograma de la muestra M-0222.

4.9. M-0276

La muestra consiste en una roca completamente alterada, compuesta por granos aislados y cúmulos de olivino inmersos en una matriz rica en carbonatos (Figura 4.17). La matriz está dominada por magnesita, la que se presenta englobando a los granos de olivino, acompañada por abundante siderita y zonas locales con calcita. La muestra presenta además una zona rica en magnetita y óxidos de hierro masivos, con granos de magnetita reemplazados por goethita-limonitas-hematita y siderita. También, se reconocen fracturas rellenas por limonitas y clorita-esmectita. Puntualmente se reconocen unos "bolsones" compuestos de cristales subhedrales/euhedrales de anfíbola verde asociados a clorita-esmectita y limonitas. Estos bolsones de anfíbolos aparentan ser heredados desde otra zona o alteración anterior. Como mineralización metálica se reconoce pirita junto a magnetita y también asociada a los carbonatos. Además, se observa esfalerita local reemplazando a pirita, calcopirita muy puntual como exsolución en la esfalerita y asociada con magnetita. En función de su mineralogía (Tabla 4.9) la muestra se clasifica como skarn magnesiano carbonático.

Los minerales identificados de la lectura de difracción de rayos X de la muestra M-0276 (Figura 4.18) son: magnesita, siderita, lizardita, magnetita, forsterita, cuarzo, clinocloro (clorita), muscovita, calcopirita, pirita y esfalerita.

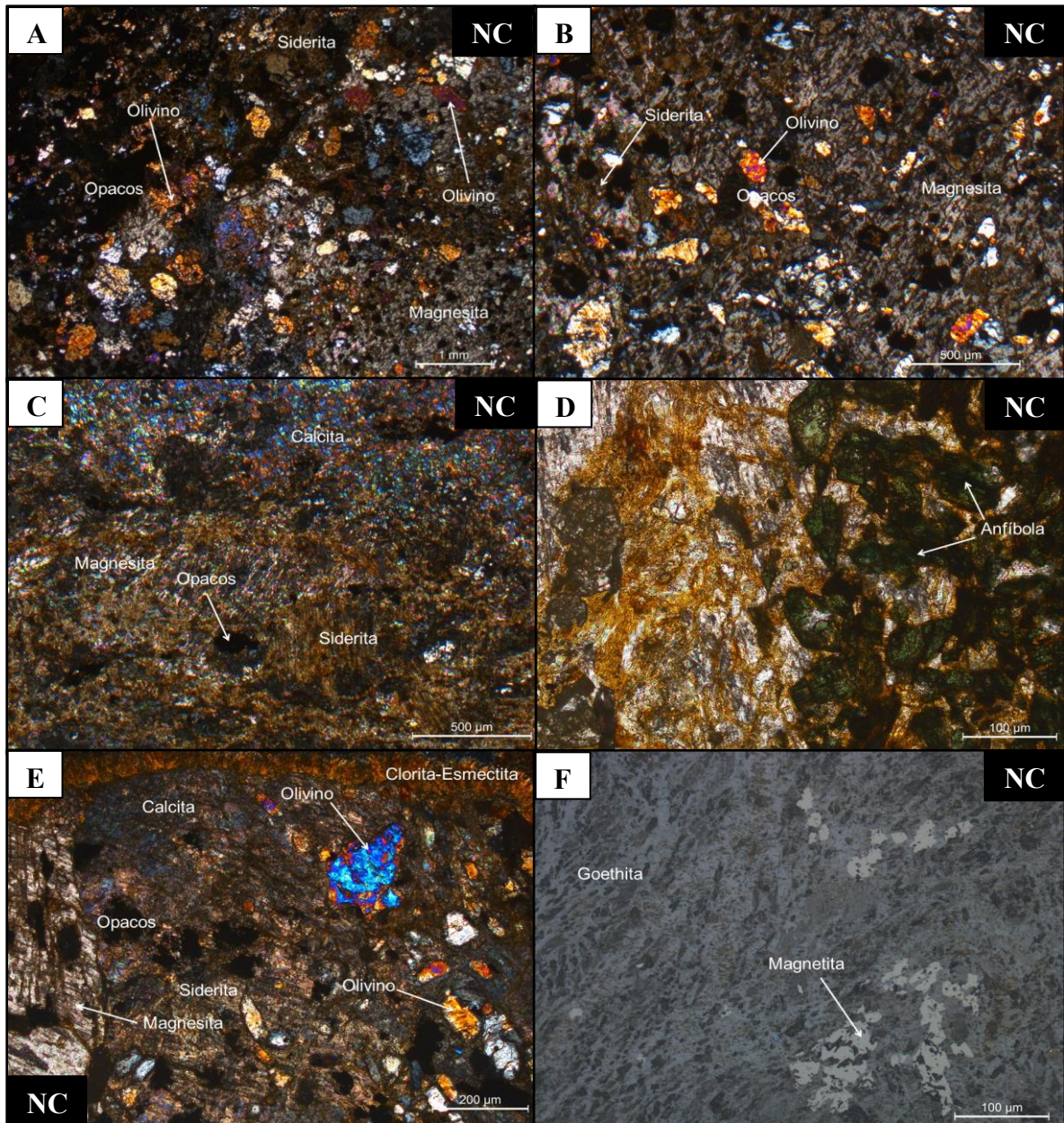


Figura 4.17.: Fotomicrografías muestra M-0276. A) y B) Cristales de olivino en matriz de carbonatos. C) Matriz de carbonatos compuesta de magnesita, siderita y calcita. D) Cristales de anfíboles relictos. E) Cristales de olivino en matriz de carbonatos con fractura rellena de clorita-esmectita. F) Cúmulos de magnetita envuelta por goethita.

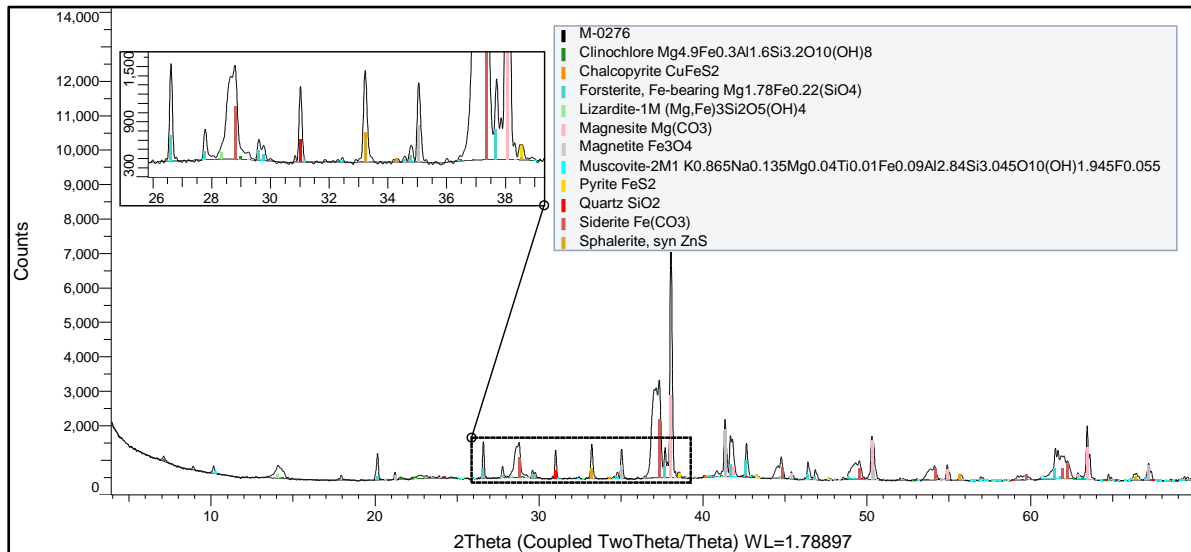


Figura 4.18: Difractograma de la muestra M-0276.

Tabla 4.9. Mineralogía de la muestra M-0276.

Mineral	%	Características especiales / Modo de ocurrencia
Olivino	21	Granos aislados fracturados o bien en cúmulos locales envueltos por una matriz de carbonatos consistente en magnesita, siderita y menor calcita
Magnesita	20	Cemento de carbonatos masivo envolviendo las zonas con mayor concentración de granos de olivino
Siderita	18	Matriz de carbonatos englobando a olivino y asociada con zonas de goethita-magnetita
Calcita	7	Placas ricas en calcita en la matriz entre siderita y magnesita
Clorita	2	Relleno de fracturas junto a esmectita
Esmectita	3	Relleno de fracturas junto a clorita
Limonitas	5	Reemplazo de magnetita, asociación y alteración de goethita, relleno de fracturas y asociación con siderita
Hornblenda	2	Cúmulos relictos de cristales euhedrales a subhedrales de anfíbolos verde intenso aparentemente heredados de otra zona de alteración, asociados con clorita-esmectita y limonitas, e inmersos en la matriz de carbonatos
Pirita	1.5	Granos diseminados entre carbonatos y clorita-serpentina. Asociación con calcopirita y magnetita
Calcopirita	0.1	Asociación con esfalerita y localmente con magnetita y pirita
Esfalerita	0.4	Cúmulos dispuestos asociados a pirita como reemplazo. En exsolución con calcopirita
Magnetita	8	Cúmulos de granos subhedrales y euhedrales envueltos por goethita y local hematita, además de siderita
Hematita	3	Cúmulos de cristales envueltos por goethita
Goethita	9	Matriz englobando a cristales de magnetita asociada parcialmente a siderita

4.10. M-0287

La muestra corresponde a una roca skarnificada de protolito probablemente intrusivo félsico. Está compuesta de una matriz recrystalizada de grano fino formada principalmente por cuarzo, feldespató potásico y albita-plagioclasa. En algunos sectores se conserva su textura primitiva con menor recrystalización, sin embargo, las plagioclasas muestran igualmente fuerte reemplazo de feldespató potásico y posterior sericita-caolinita junto con cuarzo secundario intersticial. La muestra presenta alteración de epidota como halo de vetas de pirita-cuarzo y en cúmulos asociados con sulfuros. Esta alteración de epidota se sobreimpone a una alteración anterior de actinolita-tremolita, la que se presenta en la roca como cúmulos dispersos, asociándose estos cúmulos a una alteración de clorita. Se reconocen cristales relictos de diópsido localmente reemplazados por tremolita. La epidota se sobreimpone a la tremolita/actinolita y a la clorita, y comúnmente se asocia con cristales euhedrales de esfeno. La mineralización metálica consiste mayoritariamente en pirita en vetas y en cúmulos, además de menor calcopirita reemplazando a la pirita (Figura 4.19). En función a su mineralogía (Tabla 4.10) la muestra se clasifica como una cuarzodiorita/monzodiorita skarnificada a tremolita-actinolita.

Los minerales identificados de la lectura de difracción de rayos X de la muestra M-0287 (Figura 4.20) son: anortita (plagioclasa), tremolita, actinolita, clinocloro (clorita), diópsido, epidota, ortoclasa, cuarzo, talco, calcopirita y pirita.

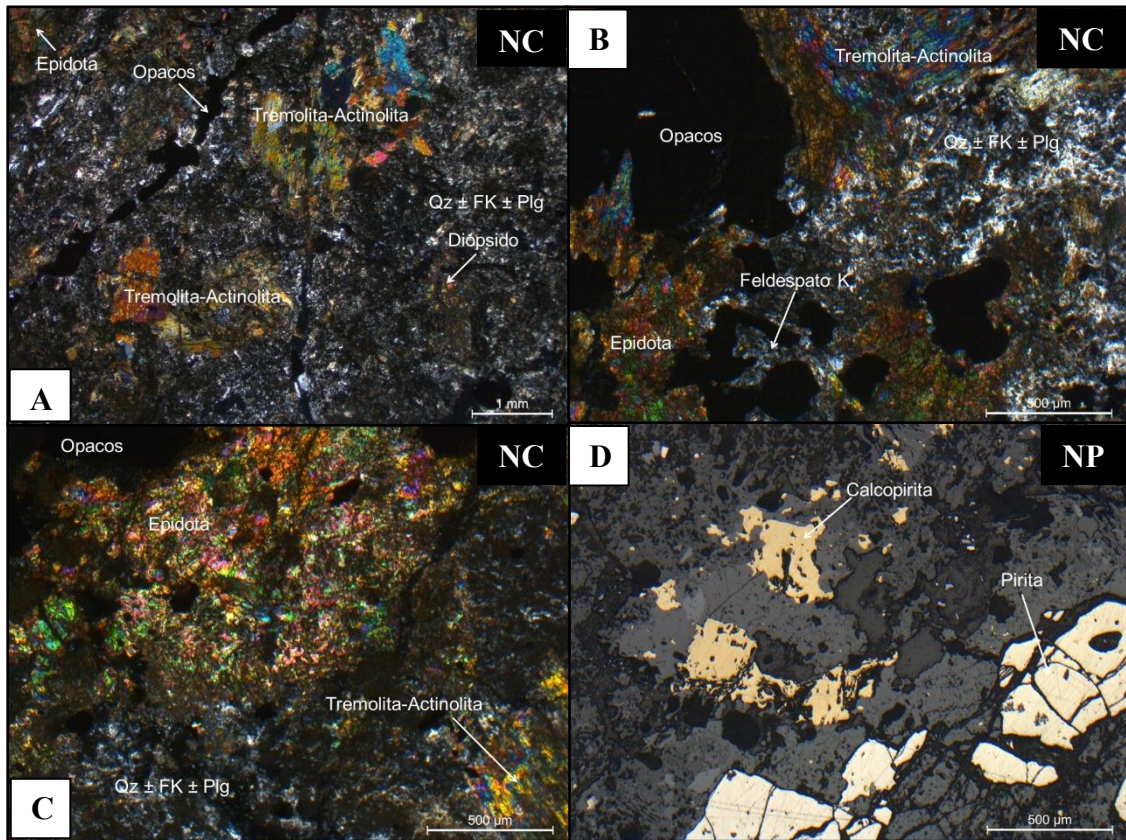


Figura 4.19: Fotomicrografías de la muestra M-0287. A) y B) Cúmulos de tremolita-actinolita en matriz recristalizada de cuarzo-albita-feldespato potásico. C) Cúmulo de epidota en matriz de cuarzo-albita-feldespato potásico. D) Cristales de calcopirita y pirita.

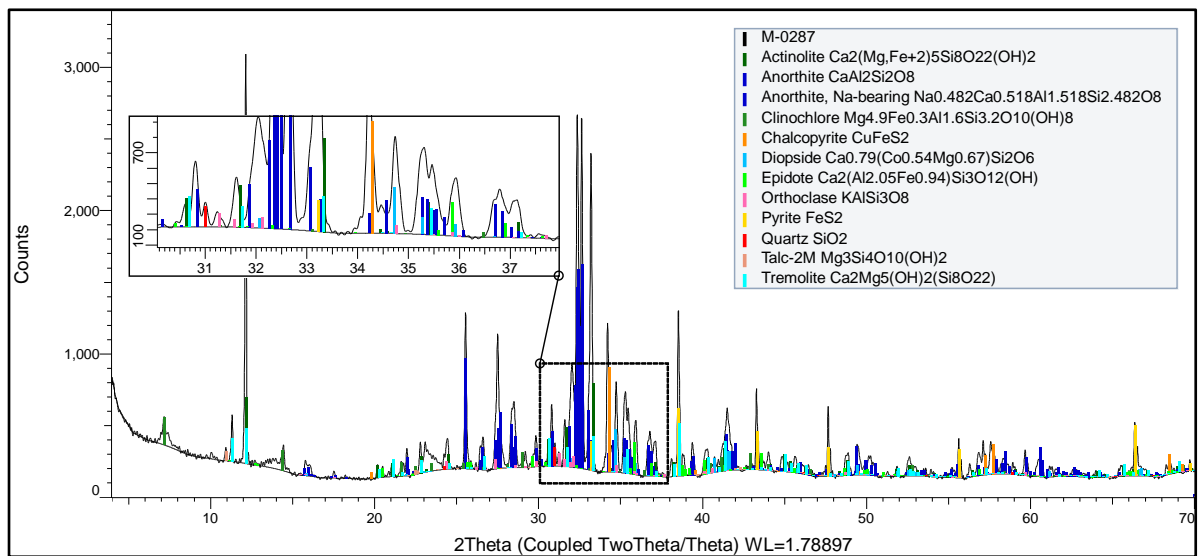


Figura 4.20: Difractograma de la muestra M-0287.

Tabla 4.10. Mineralogía de la muestra M-0287.

Mineral	%	Características especiales / Modo de ocurrencia
Tremolita-Actinolita	9	Cúmulos dispersos en la matriz recristalizada de cuarzo-albita-feldespato potásico
Plagioclasa	32	En matriz recristalizada, mayormente como albita junto a feldespato potásico y cuarzo. Cristales primarios reemplazados por feldespato potásico.
Cuarzo	17	En matriz recristalizada junto a albita-feld. potásico. Cuarzo secundario entre plagioclasas reemplazadas por feld. potásico, relleno de fracturas y oquedades. Relleno de vetas
Feldespato potásico	19	En matriz recristalizada junto a albita-cuarzo. En matriz intercrecido con albita, cuarzo, epidota. Reemplazo de plagioclasas
Epidota	8	Halo en de vetas de sulfuros y en cúmulos englobando local y parcialmente a tremolita/actinolita y sulfuros
Diópsido	4	Cristales relictos en cúmulos. Con sobreimposición de tremolita-actinolita
Clorita	3	Asociada como alteración a los cúmulos de actinolita/tremolita y a epidota
Sericita	2	Alteración débil local sobre las plagioclasas
Caolinita	1	Producto de alteración de plagioclasas y feldespatos
Esfeno	0.5	Cristales rombohedrales diseminados
Pirita	4	En vetas y cúmulos menores englobada por epidota y reemplazada por calcopirita
Calcopirita	0.5	En veta y cúmulos como reemplazo de pirita. Asociación con epidota

5. DISCUSIÓN

5.1. Consideraciones generales

Los resultados obtenidos a partir de la microscopía óptica en luz transmitida y reflejada, complementados con la identificación mineralógica mediante DRX, permiten evaluar con detalle la eficacia y las limitaciones de ambas técnicas para la caracterización de rocas de skarn. Este tipo de depósito se caracteriza por presentar asociaciones minerales complejas, texturas superpuestas y reemplazos que generan fases finamente intercrecidas, lo que representa un desafío para un análisis petrográfico tradicional.

Desde un punto de vista mineralógico general, las asociaciones reconocidas en las muestras analizadas, caracterizadas por la presencia de minerales ricos en magnesio tales como tremolita-actinolita, flogopita, clorita, talco y serpentinas (lizardita y antigorita), junto con carbonatos como dolomita y magnesita, son coherentes con asociaciones descritas para skarns magnesianos. Este tipo de asociaciones se desarrolla típicamente a partir de protolitos carbonatados enriquecidos en magnesio y se diferencia de los skarns cálcicos por la abundancia de silicatos magnésicos y la relativa escasez de minerales cálcicos característicos, como granate y wollastonita (Meinert *et al.*, 2005). En el marco de este estudio, esta caracterización se considera como un contexto geológico de referencia, sin constituir el foco principal del análisis.

La discusión se estructura, por tanto, en función de la contribución específica de cada técnica, analizando primero los alcances y limitaciones de la microscopía óptica en la caracterización petrográfica de cortes transparentes, para posteriormente evaluar el rol de la DRX como herramienta de validación y complemento en la identificación mineralógica. Finalmente, se abordan las principales consideraciones metodológicas asociadas a la interpretación integrada de ambas técnicas, destacando la necesidad de aplicar criterios analíticos adecuados para una caracterización mineralógica consistente.

5.2. Caracterización petrográfica: alcances y limitaciones de la microscopía óptica

La microscopía óptica de luz transmitida y reflejada constituye la técnica fundamental para la caracterización mineralógica en cortes transparentes, ya que permite identificar minerales formadores de roca, reconocer minerales de alteración, establecer asociaciones texturales, incluyendo relaciones de reemplazo metasomático características de sistemas tipo skarn. En las

muestras estudiadas, esta técnica permitió distinguir de manera fiable fases como cloritas, diópsido, plagioclasas, cuarzo, biotita, sericita, olivino, epidota y mineralización metálica compuesta por calcopirita, pirita, magnetita, pirrotina y rutilo. Su identificación se basó en propiedades ópticas diagnósticas tales como color, pleocroísmo, ángulo de extinción, relieve y birrefringencia; mientras que para minerales opacos se consideró principalmente el color y la anisotropía (Anexo 1).

No obstante, la microscopía óptica presentó limitaciones inherentes a la resolución óptica y entre ciertas fases minerales con propiedades ópticas similares. Los minerales finamente intercrecidos producto de alteración metasomática mostraron bordes difusos que dificultaron su identificación y estimación visual. Un ejemplo corresponde a la muestra M-0026, donde los agregados de actinolita-tremolita se encontraron intercrecidos con flogopita (Figuras 4.3.A y 4.3.B). Ambos minerales se vieron incoloros a LPP y en NC presentaron colores de interferencia de 1er a 2do orden, pero con ángulos de extinción diferentes: la actinolita presenta frecuentemente extinción oblicua (10 a 21°) y la flogopita extinción paralela (Nesse, 1991). Esta característica permitió diferenciarlas y realizar la estimación visual pese a la complejidad de su textura. Otro ejemplo, en la muestra M-0287 la cuarzodiorita o monzodiorita presentó una matriz recristalizada de grano fino que imposibilitó su identificación mineralógica.

En segundo lugar, los carbonatos romboédricos presentes en las muestras M-0012, M-0161, M-0222 y M-0276 como calcita, dolomita y/o magnesita resultaron difíciles de diferenciar al microscopio, debido a que en LPP son incoloros y en NC presentan colores de interferencia pastel de alto orden. Aun así, muestran algunas diferencias: la calcita, en la mayoría de las rocas, se presenta como cristales anhedrales, mientras que la dolomita desarrolla cristales euhedrales de hábito romboédrico. Ambos minerales exhiben maclas laminares, a diferencia de la magnesita, que no las presenta (Nesse, 1991). Sin embargo, para un observador no entrenado, estos carbonatos siguen siendo difíciles de distinguir mediante microscopía óptica.

Finalmente, las serpentinas presentes en las muestras M-0012, M-0027, M-0161, M-0209 y M-0222, como la lizardita y/o antigorita constituyeron una de las fases más complejas de caracterizar mediante microscopía óptica. Estas especies suelen presentarse como agregados microfibrosos, laminares o criptocristalinos, con birrefringencia baja y colores de interferencia de primer orden en NC e incoloros a verde pálido en LPP. Nesse, (1991) señala que las variedades de serpentina no se pueden distinguir de manera fiable sin DRX.

Las limitaciones descritas demuestran la necesidad de complementar la observación petrográfica con DRX, técnica que se vuelve esencial para corroborar la presencia de fases mineralógicas difíciles de discriminar exclusivamente por criterios ópticos.

5.3. Difracción de rayos X como herramienta de validación mineralógica

La difracción de rayos X constituyó una herramienta clave para confirmar y complementar la identificación mineralógica realizada mediante microscopía óptica. Debido a su capacidad para reconocer fases cristalinas, la DRX permitió resolver ambigüedades generadas en muestras donde las propiedades ópticas no fueron suficientes para diferenciar minerales de características similares o de grano extremadamente fino.

En las muestras analizadas, la DRX permitió diferenciar las variedades de serpentina, cuya identificación mediante microscopía óptica resulta limitada debido a sus características similares. Los patrones de difracción mostraron que tanto la lizardita como la antigorita comparten reflexiones en $2\theta = 14^\circ$ y $2\theta = 28,5^\circ$; sin embargo, la lizardita presentó un *peak* distintivo en $2\theta = 43^\circ$, mientras que la antigorita en $2\theta = 49^\circ$ (Figura 4.2). Estas diferencias permitieron confirmar la presencia de lizardita en las muestras M-0012, M-0027, M-0161, M-0209, M-0222 y M-0279, y de antigorita en M-0012 y M-0222. La información obtenida evidencia la utilidad de la DRX para discriminar fases mineralógicas con propiedades ópticas similares y de difícil identificación en cortes transparentes.

En el caso de los carbonatos, la DRX permitió discriminar de manera precisa entre calcita, dolomita y magnesita, cuya diferenciación por microscopía óptica es limitada debido a la similitud de sus propiedades ópticas en secciones delgadas. La calcita se reconoció por reflexiones características en $2\theta = 34^\circ$, 46° , 51° y 52° (Figura 4.2); la dolomita tiene un *peak* en $2\theta = 36^\circ$ (Figura 4.12); mientras que la magnesita exhibió reflexiones distintivas en $2\theta = 38^\circ$, $50,5^\circ$ y $63,5^\circ$ (Figura 4.18). Estos patrones de difracción permitieron confirmar la presencia y distribución de las fases carbonatadas identificadas en las muestras M-0012, M-0161, M-0222 y M-0276, proporcionando una base mineralógica verificable que no puede ser resuelta únicamente mediante criterios ópticos.

En el caso de los minerales finamente intercrecidos, la DRX permitió confirmar y validar fases. En la muestra M-0026, la actinolita-tremolita se evidenció por un doble *peak* característico en $2\theta = 11^\circ$ y 12° , y un *peak* en $2\theta = 33^\circ$ (Figura 4.4). Por su parte, la flogopita fue corroborada mediante

peaks diagnósticos en $2\theta = 10^\circ$ y $2\theta = 40^\circ$ (Figura 4.4), confirmando lo identificado mediante microscopía óptica.

En la muestra M-0287, la matriz recristalizada de grano fino dificultó la identificación mineralógica mediante microscopía óptica; sin embargo, la DRX permitió reconocer los *peaks* característicos de las plagioclasas en $2\theta = 25,5^\circ$, $27,5^\circ$ y en el conjunto de reflexiones comprendidas entre $32-33^\circ$, junto con *peaks* de ortoclasa en $2\theta = 31,2-31,5$ y el *peak* característico del cuarzo en $2\theta = 31^\circ$ (Figura 4.20), lo que permitió determinar la composición mineralógica de la matriz con mayor precisión.

Para el resto de las muestras no mencionadas previamente, los resultados de DRX mostraron concordancia con las fases mineralógicas identificadas mediante microscopía óptica. En estos casos, los patrones de difracción confirmaron la presencia de los minerales descritos petrográficamente, sin evidenciar fases adicionales ni discrepancias significativas, lo que valida la interpretación óptica y refuerza la consistencia del análisis integrado.

En conjunto, los resultados evidencian que la microscopía óptica y la difracción de rayos X aportan información complementaria. La microscopía óptica entrega una caracterización esencialmente cualitativa y semicuantitativa, basada en la estimación visual de abundancias relativas y en la observación directa de relaciones texturales, eventos mineralógicos y modos de ocurrencia de las fases en un plano bidimensional correspondiente al corte transparente. Esta información permite establecer el marco petrográfico general de la muestra, identificar procesos de reemplazo, relleno o recristalización, y comprender la disposición espacial de los minerales, aspectos que no son inferidos a partir de un difractograma.

Por su parte, la DRX proporciona una identificación mineralógica cuantitativa a partir de la intensidad relativa de los *peaks* de difracción, permitiendo validar la presencia de fases reconocidas ópticamente, estimar su abundancia relativa y obtener información confiable sobre las proporciones de las fases cristalinas presentes al corroborar la cuantificación de la estimación visual de la óptica. Esta capacidad resulta particularmente relevante para minerales de grano muy fino o matrices recristalizadas, así como para minerales con propiedades ópticas similares, cuya discriminación mediante microscopía óptica es limitada.

5.4. Limitaciones y consideraciones de la metodología aplicada

Si bien la combinación de microscopía óptica y DRX demostró ser adecuada para la caracterización mineralógica de muestras de un depósito de tipo skarn, existen limitaciones inherentes a cada técnica y al enfoque integrado. En microscopía óptica, la identificación de minerales intercrecidos, de texturas criptocristalinas o de fases con propiedades ópticas similares puede ser una problemática, incluso para observadores experimentados. La DRX, por su parte, puede presentar restricciones cuando las muestras contienen múltiples fases superpuestas, minerales de baja cristalinidad o proporciones muy pequeñas que no generan señales suficientemente intensas en el patrón difractométrico (Bunaciu *et al.*, 2015).

Otro aspecto metodológico que debe considerarse en la interpretación conjunta de la microscopía óptica y la difracción de rayos X es que el corte transparente y la fracción pulverizada utilizada en el difractómetro corresponden a submuestras distintas de la misma roca, cada una con un nivel diferente de representatividad. La microscopía óptica se basa en una observación bidimensional correspondiente al plano del corte transparente, mientras que la DRX se aplica sobre una fracción representativa de la roca en su conjunto, lo que permite obtener una caracterización mineralógica global del material analizado.

Esta diferencia no constituye una discrepancia entre técnicas, sino un elemento que requiere criterio analítico al momento de interpretar los resultados, considerando que ambas metodologías entregan información complementaria: la microscopía óptica aporta información sobre relaciones texturales, modos de ocurrencia y asociaciones minerales, mientras que la DRX proporciona la identificación y proporción relativa de las fases cristalinas presentes. En consecuencia, la integración adecuada de ambas metodologías demanda una interpretación cuidadosa, reconociendo las particularidades de cada técnica y su aporte específico a la caracterización mineralógica.

6. CONCLUSIONES

El presente estudio demuestra que la integración de microscopía óptica en cortes transparentes y DRX constituye una metodología complementaria para la caracterización mineralógica de muestras provenientes de un depósito tipo skarn y aplicable a estudios de otros depósitos.

La microscopía óptica permitió identificar de manera confiable la mayoría de las fases minerales presentes, tales como diópsido, actinolita–tremolita, plagioclasas, cuarzo, epidota, biotita, flogopita, clorita, sericita, carbonatos y serpentinas, así como minerales metálicos como piritita, calcopirita, magnetita y pirrotina. Estas determinaciones se basaron en propiedades ópticas diagnósticas como color, pleocroísmo, ángulo de extinción y birrefringencia en luz transmitida, así como color y anisotropía en luz reflejada. Sin embargo, se evidenció que la microscopía presenta limitaciones inherentes a la superposición de propiedades ópticas entre ciertas especies, en especial en minerales intercrecidos, de grano fino, carbonatos romboédricos y variedades de serpentina.

La aplicación de DRX permitió confirmar y discriminar fases mineralógicas que no pudieron ser determinadas de manera concluyente mediante observación petrográfica. En particular, la técnica permitió diferenciar entre lizardita y antigorita mediante sus *peaks* diagnósticos, distinguir entre calcita, dolomita y magnesita, y validar asociaciones mineralógicas intercrecidas, como los agregados de tremolita–flogopita. Asimismo, en muestras con fuerte recristalización de grano fino, la DRX aportó información mineralógica esencial que no pudo ser obtenida ópticamente. En las muestras donde la caracterización petrográfica fue clara y sin ambigüedades, la DRX validó la mineralogía identificada por óptica.

En conjunto, los resultados obtenidos permiten concluir que la metodología integrada aplicada en este estudio proporciona una caracterización mineralógica más completa, rigurosa y confiable que la que se lograría utilizando una sola técnica. Esta aproximación no solo mejora la precisión de la identificación mineral, sino que también puede contribuir a una interpretación del depósito más robusta, esencial para el entendimiento de sistemas de skarn y para apoyar estudios futuros en geología económica y mineralogía aplicada.

REFERENCIAS

- AMARAL, P.M., CRUZ, J. Y GUERRA, L. 2006. A comparison between X-ray diffraction and petrography techniques used to determine the mineralogical composition of granite and comparable hard rocks. *Materials Science Forum*. Vol. **514-516** (1628–1632): 1628–1632.
- AL-RAWAS, A. D., GISMELSEED, A. M., AL-KATHIRI, A. F., ELZAIN, M. E., YOUSIF, A. A., AL-KATHIRI, S. B., WIDATALLAH, H. M. Y ABDALLA, S. B. 2008. Characterization of Maghsail meteorite from Oman by Mössbauer spectroscopy, X-ray diffraction and petrographic microscopy. *Hyperfine Interactions*. Vol. **186**: 105–111.
- BUNACIU, A., UDRIȘTIOIU, E. Y ABOUL-ENEIN, H. 2015. X-Ray Diffraction: Instrumentation and Applications. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*. Vol. **45**, (4): 289–299.
- CULLITY, B. D. 1978. Elements of X-ray Diffraction, 2nd ed. Addison-Wesley Pub. Co.: 555 pp. Menlo Park, CA.
- ECHESTE, H., DEL BLANCO, M. Y BODAÑO, M. 2014. Atlas de Minerales Opacos. Instituto de Recursos Minerales. Facultad de Ciencias y Naturales y Museo. Universidad Nacional de la Plata. 76 pp. La Plata.
- GRIBBLE, C. D., Y HALL, A. J. 1985. A Practical Introduction to Optical Mineralogy. Allen, G., Unwin editores: 249 pp. Londres.
- HILL, R. J., TSAMBOURAKIS, G., Y MADSEN, I. C. 1993. Improved petrological modal analyses from X-ray powder diffraction data by use of the Rietveld method: I. Selected igneous, volcanic, and metamorphic rocks. *Journal of Petrology*. Vol. **34**, (5): 867–900.
- KLEIN, C. Y HURLBUT, C. S. JR. 1997. Manual de Mineralogía. Vol. 1, cuarta edición, basado en la obra de J. D. Dana. Editorial Reverté: 368 pp. Barcelona.
- MEINERT, L.D. 1992. Skarns and skarn deposits. *Geoscience Canada*. Vol. **19**: 145–162.
- MEINERT, L.D.; DIPPLE, G.M. Y NICOLESCU, S. 2005. World skarn deposits. Economic Geology 100th Anniversary Volume (Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.H., Goldfarb, R.J., Richards, J.P. editores). Society of Economic Geologists: 1905–2005. Littleton, CO.
- MOORE, D. M. Y REYNOLDS, R. C. 1989. X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals. Oxford University Press: 332 pp. New York, NY.
- NESSE, W. D. 1991. Introduction to optical mineralogy. Segunda Edición. Oxford University Press: 335 pp. New York, NY.
- RAITH, M. M.; RAASE, P. Y REINHARDT, J. 2012. Guía para la Microscopía de Minerales en Lámina Delgada (Traducción al Español, Pedro Oyhantçabal). 126 pp. e-Book ISBN 978-3-00-040623-2 (PDF).

- SETIAWAN, M.R., IGBAL, M. Y SIREGAR, R.N. 2019. Mineral analysis in rocks using XRD and petrography. *Journal of Science and Applicative Technology*. Vol. **2** (1): 206–214.
- TZVETANOVA, Y., PETROV, O., KERESTEDJIAN, T., Y TARASSOV, M. 2020. Quantitative phase analysis of skarn rocks by the Rietveld method using X-ray powder diffraction data. *Minerals*. Vol. **10** (10): 894.

ANEXOS

ANEXO 1: PROPIEDADES ÓPTICAS DE MINERALES

Tabla 1: Propiedades de minerales transparentes (luz transmitida). Extraído de Nesse, 1991.

Mineral	Color y preocloísmo	Extinción	Birrefringencia
Diópsido	Incoloro (diópsido)	38-48° oblicua	Alta
Tremolita-actinolita	Incoloro a verde	10-28°	Moderada
Hornblenda	Marrón a verde amarillento o azulado	12-34° oblicua	Moderada
Biotita	Marrón amarillento o verdoso a marrón rojizo	Recta	Alta
Flogopita	Incoloro a amarillo pálido, marrón amarillento	Recta	Moderada
Muscovita	Incoloro	Recta	Alta
Talco	Incoloro	Recta	Alta
Clorita	Verde claro a incoloro	Recta	Baja
Epidota	Incoloro, verde amarillento, amarillo	0-11°	Alta
Calcita	Incoloro	Simétrica	Muy alta
Dolomita	Incoloro	Simétrica	Muy alta
Siderita	Incoloro a pardo amarillento	Oblicua	Alta
Magnesita	Incoloro	Oblicua	Alta
Plagioclasa	Incoloro	Oblicua variable; maclas polisintéticas	Muy baja
Cuarzo	Incoloro	Ondulosa	Muy baja
Olivino	Incoloro	Paralela	Muy alta
Ortoclasa	Incoloro	Paralela	Muy baja
Serpentina	Incoloro a verde pálido.	Paralela	Muy baja

Tabla 2: Propiedades de minerales opacos (luz reflejada). Extraído de Echeveste *et al.*, 2014.

Mineral	Color	Anisotropía/Isotropía
Calcopirita	Amarillo	Débil a muy débil, varía de amarillo, gris azulado a amarillo verdoso
Pirita	Amarillo claro	Isótropa
Magnetita	Gris con un tinte castaño	Isótropa
Pirrotina	Castaño amarillento con un tinte rosado	Fuerte, varía en los tintes amarillo verdoso a verde claro, gris azulado a gris amarillento
Rutilo	Gris a marrón rojizo	Débil a moderada
Esfalerita	Gris, ocasionalmente con un tinte castaño.	Isótropa