



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



**EVALUACIÓN DE LOS ALCANCES Y LIMITACIONES DE
LA CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y PETROLÓGICA DE
CONDRIOS ORDINARIOS MEDIANTE MINERALOGÍA
AUTOMATIZADA QEMSCAN®**

Memoria para optar al Título de Geóloga

Javiera Estela Flores Rojas

Profesor Patrocinante: Dra. Verónica Laura Oliveros Clavijo
Profesores Comisión: Dr. Alexey Novoselov
Dr. Oscar Rafael Figueroa Arriagada

Concepción, 2023

Los científicos no estudian la naturaleza porque les sea útil; la estudian porque les place, y les place porque es bella. Si la naturaleza no fuese bella, no valdría la pena conocerla, no valdría la pena vivir la vida.

Henri Poincaré

ÍNDICE

	Página
RESUMEN	
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivos	3
1.1.1. Objetivo General	3
1.1.2. Objetivos Específicos	3
1.2. Metodología de Trabajo	3
1.2.1. Etapa Gabinete 1	3
1.2.2. Etapa de Laboratorio	3
1.1.2. Etapa Gabinete 2	4
1.3. Trabajos Anteriores	5
1.4. Agradecimientos	6
2. MARCO TEÓRICO	7
2.1. Conceptos generales de meteorítica	7
2.2. Clasificación general de meteoritos	7
2.3. Condritos: química y clasificación	11
2.3.1. Condritos Ordinarios	17
2.3.1.1. Clasificación	18
2.3.1.2. Mineralogía y componentes principales	20
2.3.1.3. Metamorfismo y estado de choque	25
2.3.1.4. Procesos de meteorización terrestre	28
3. METODOLOGÍA Y ANÁLISIS QEMSCAN	30
3.1. Fundamentos de la técnica	30
3.2. Reclasificación estadística de pixeles	32
3.3. Reclasificación en iDiscover	37
3.4. Reclasificación de las fases olivino y piroxeno de alto Ca	37
3.5. Adición de datos UCN	39

4. ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y QUÍMICO	40
4.1. Caracterización petrográfica meteoritos CAT-5 y CAT-M9	40
4.1.1. CAT-M5	40
4.1.1.1. Cóndrulos	40
4.1.1.2. Matriz	40
4.1.1.3. Mineralogía primaria	41
4.1.1.4. Mineralogía secundaria	41
4.1.2. CAT-M9	41
4.1.2.1. Cóndrulos	41
4.1.2.2. Matriz	43
4.1.2.3. Mineralogía primaria	43
4.1.2.4. Mineralogía secundaria	43
4.2. Geoquímica de meteoritos CAT-M5 y CAT-M9	43
4.2.1. Química elemental de CAT-M5 y CAT-M9	43
4.2.2. Mineralogía modal de CAT-M5 y CAT-M9	46
4.2.3. Composiciones de olivinos y ortopiroxenos	47
4.3. Mapas mineralógicos en falso color para las muestras CAT-M5 y CAT-M9	48
5. RESULTADOS	52
5.1. Clasificación química de los meteoritos CAT-5 y CAT-M9	52
5.2. Clasificación según Tipo Petrológico	59
5.2.1. Muestra CAT-M5	60
5.2.1.1. Dispersión en la composición de olivinos	60
5.2.1.2. Estado estructural de piroxenos bajos en Ca	61
5.2.1.3. Presencia y tamaño de feldespatos	61
5.2.1.4. Vidrio primario	62
5.2.1.5. Contenido de Ni en minerales metálicos	62
5.2.1.6. Contenido de Ni en minerales sulfurados	62
5.2.1.7. Texturas (integración cóndrulos – matriz)	63
5.2.1.8. Contenidos de C y H ₂ O	63
5.2.2. Muestra CAT-M9	64

5.2.2.1. Dispersión en la composición de olivinos	64
5.2.2.2. Estado estructural de piroxenos bajos en Ca	64
5.2.2.3. Presencia y tamaño de feldespatos	65
5.2.2.4. Vidrio primario	65
5.2.2.5. Contenido de Ni en minerales metálicos	65
5.2.2.6. Contenido de Ni en minerales sulfurados	65
5.2.2.7. Texturas (integración cóndrulos – matriz)	65
5.2.2.8. Contenidos de C y H ₂ O	66
5.3. Evidencias de metamorfismo y caracterización del estado de choque	66
5.3.1. Muestra CAT-M5	66
5.3.2. Muestra CAT-M9	68
5.4. Procesos de meteorización terrestre	69
5.4.1. Muestra CAT-M5	69
5.4.2. Muestra CAT-M9	71
6. DISCUSIÓN	73
6.1. Evaluación de reclasificación a través de nueva lista SIP: comparaciones con microscopía óptica	73
6.2. Evaluación de reclasificación a través de nueva lista SIP: comparaciones con microscopía electrónica de barrido (SEM: <i>Scanning Electron Microscopy</i>)	73
6.3. Aportes mapa mineralógico en falso color en clasificaciones	80
6.4. Alcances y limitaciones de la técnica QEMSCAN	81
6.5. Recomendaciones	82
7. CONCLUSIONES	83
8. REFERENCIAS	86
ANEXOS	
ANEXO 1 Procedimiento de transformación de datos químicos proporcionados por UCN a espectros EDS (“intensidades de peaks”)	
ANEXO 2 Resumen características en lista SIP para cada fase mineral	

ANEXO 3 Resumen de datos para fórmulas empíricas de fases minerales de lista SIP

ANEXO 4 Gráficos de la señal de rayos X para las fases olivino, vidrio y ortopiroxeno a partir de análisis SEM

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
2. 1.	Ejemplos de distintos tipos de meteoritos	9
2. 2.	Resumen del número de meteoritos “caídos” respecto del total de meteoritos existentes para cada grupo de meteoritos condriticos y valores totales de meteoritos acondriticos	10
2. 3.	Clasificación taxonómica para meteoritos condriticos, acondriticos y otros meteoritos ígneos con sus respectivas subdivisiones	10
2. 4.	Componentes principales de un condrito: cóndrulos, metales, matriz y CAIs (inclusiones ricas en Ca y Al)	11
2. 5.	Composición de las razones Mg/Si, Fe/Si y Al/Si para meteoritos condriticos	14
2. 6.	Distribución de Ni y Fe total y metálico en condritos ordinarios de los grupos L y LL	15
2. 7.	Razón Fe ⁰ /Fe vs razón Fe/SiO ₂ para los grupos químicos de condritos	16
2. 8.	Tipos petrológicos y alteraciones involucradas	16
2. 9.	Razón fayalita (Fa) (% molar en olivinos) vs rangos de Fe ⁰ /Fe para grupos H, L y LL de condritos ordinarios	19
2. 10.	Contenidos de hierro, expresados como % molar de Fe ₂ SiO ₄ (Fayalita = Fa) y FeSiO ₃ (Ferrosilita = Fs) del olivino y piroxeno bajo en Ca respectivamente, en condritos ordinarios equilibrados	20
2. 11.	Condiciones redox de los meteoritos condriticos	20
2. 12.	Ejemplos de características texturales en cóndrulos	23
2. 13.	Kamacita y troilita	24
2. 14.	Resumen del tipo y abundancia relativa de las características de choque que componen la clasificación en base a los minerales opacos de Bennett y McSween (1996)	27
3. 1.	Ejemplo del proceso operativo de la generación de imágenes en el modo Field Scan	33
3. 2.	Matriz de correlaciones entre variables definidas	34

3. 3.	Gráfica “Elbow point”	35
3. 4.	Diagrama de bigotes o box plot de acuerdo con el rango de electrones retrodispersados (BSE) para los 8 clusters definidos mediante análisis estadístico en RStudio	36
3. 5.	Vista general de fases mineralógicas sin reclasificación de olivinos y ortopiroxenos utilizando k-means (A) y con reclasificación (B) para la muestra CAT-M5	38
4. 1.	Fotomicrografías de microscopio óptico (SIAMS) de la muestra CAT-M5	42
4. 2.	Fotomicrografías de microscopio óptico (SIAMS) de la muestra CAT-M9	44
4. 3.	Vista general del mapa mineralógico QEMSCAN obtenido para la muestra CAT-M5 en falso color	50
4. 4.	Vista general del mapa mineralógico QEMSCAN obtenido para la muestra CAT-M9 en falso color	51
5. 1.	Imágenes SEM que muestran la ocurrencia de cóndrulos en las muestras CAT-M5 y CAT-M9	52
5. 2.	Gráfico de las razones Al/Si (a) y Fe/Si (b) vs. Mg/Si para la clasificación según clase de condrito y las proyecciones de las muestras CAT-M5 y CAT-M9	53
5. 3.	Gráfico de clasificación de condritos Fe^0/Fe vs. Fe/SiO_2 según lo propuesto por Van Schmus y Wood (1967)	56
5. 4.	Gráfico de clasificación de condritos ordinarios Fayalita (% molar) vs. Fe^0/Fe según Van Schmus & Wood (1967)	59
5. 5.	Gráfico de clasificación en base a contenidos de hierro, expresados en % molar de Fe_2SiO_4 (Fayalita = Fa) y $FeSiO_3$ (Ferrosilita = Fs) del olivino y piroxeno bajo en Ca respectivamente, en condritos ordinarios equilibrados	59
5. 6.	Definición de bordes de cóndrulos en la integración matriz - cóndrulo	63
5. 7.	Mapas de composición de olivino para la muestra CAT-M9 obtenidos a partir de QEMSCAN	64
5. 8.	Integración matriz-cóndrulos de la muestra CAT-M9 en luz reflejada, con nicoles paralelos	66
5. 9.	Fotomicrografías que evidencian el proceso de metamorfismo de choque en la muestra CAT-M5	67
5. 10.	Fotomicrografías que evidencian el proceso de metamorfismo de choque en la muestra CAT-M9	68
5. 11.	Secciones del mapa en falso color elaborado por QEMSCAN caracterizando el grado de meteorización en la muestra CAT-M5	70

5. 12.	Secciones del mapa en falso color elaborado por QEMSCAN caracterizando el grado de meteorización en la muestra CAT-M9	72
6. 1.	Comparaciones entre clasificación de QEMSCAN con fotomicrografías óptimas con luz transmitida, bajo nicoles paralelos para la muestra CAT-M5	74
6. 2.	Comparaciones entre clasificación de QEMSCAN con fotomicrografías óptimas con luz transmitida, bajo nicoles paralelos para la muestra CAT-M9	75
6. 3.	Comparaciones entre clasificación de QEMSCAN (izquierda) con análisis puntuales realizados con microscopía electrónica de barrido (SEM) (derecha)	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Página
2. 1.	Sumario de las propiedades petrográficas de meteoritos condriticos	12
2. 2.	Composiciones químicas de roca total media para los grupos de condritos (%wt)	13
2. 3.	Características de los distintos tipos petrográficos	17
2. 4.	Valores promedios de las propiedades de condritos ordinarios equilibrados	18
2. 5.	Valores en % peso promedio de las razones de hierro metálico y total de los tres grupos de condritos ordinarios y los pesos de las razones de FeO/(FeO + MgO)	19
2. 6.	Abundancias aproximadas (% peso) de los principales minerales en condritos recristalizados	22
2. 7.	Composiciones minerales promedio en condritos recristalizados	23
2. 8.	Resumen de los criterios empleados para establecer el estado de choque de un condrito ordinario	26
2. 9.	Grado de meteorización terrestre W (Wlotza, 1993)	28
3. 1.	Sumario de estadísticos que permiten discriminar el número de clústeres a definirse	36
3. 2.	Fases minerales definidas a partir del análisis estadístico y su respectivo código	37
4. 1.	Tabla resumen datos para conocer fórmula empírica de la fase mineral apatito definida en esta memoria	45
4. 2.	Concentraciones (wt%) de elementos químicos en las muestras CAT-M5 y CAT-M9 y concentraciones normalizadas al 100%, además de algunas razones elementales	46
4. 3.	Concentraciones (wt%) de minerales en las muestras CAT-M5 y CAT-M9	47
4. 4.	Aporte elemental de Fe para cada una de las fases minerales de mayor relevancia	48
4. 5.	Concentraciones (wt%) de la serie del olivino en las muestras CAT-M5 y CAT-M9	49

4. 6.	Concentraciones (wt%) de la serie de ortopiroxeno en las muestras CAT-M5 y CAT-M9	49
5. 1.	Porcentaje en peso (wt%) de óxidos mayores para la muestra CAT-M5	54
5. 2.	Porcentaje en peso (wt%) de óxidos mayores para la muestra CAT-M9	55
5. 3.	Producto de la razón Fe^0/Fe total	55
5. 4.	Porcentaje de fayalita representativo para la muestra CAT-M5 y los valores asociados al procedimiento	57
5. 5.	Porcentaje de fayalita representativo para la muestra CAT-M9 y los valores asociados al procedimiento	57
5. 6.	Porcentaje de ferrosilita representativo para la muestra CAT-M5 y los valores asociados al procedimiento	58
5. 7.	Porcentaje de ferrosilita representativo para la muestra CAT-M9 y los valores asociados al procedimiento	58
5. 5.	Resultados análisis puntuales para granos de olivino de la muestra CAT-M5 a través de SEM	61
6. 1.	Análisis químico puntual efectuado con microscopía electrónica de barrido (SEM) para las fases minerales olivino, vidrio y ortopiroxeno	79

RESUMEN

Los meteoritos son de gran importancia científica ya que el estudio de ellos permite conocer parte de la historia primitiva del sistema solar. Más precisamente, los condritos proporcionan información sobre la abundancia de elementos en el sistema solar, también sobre procesos que ocurrieron durante la formación del Sol y de los planetas a partir de una nube de polvo y gas que colapsó, además de los procesos geológicos que afectaron a los asteroides de más de 4.5 Ga. Por otra parte, en el desierto de Atacama, al norte de Chile, ocurre una gran concentración de meteoritos, los cuales, a su vez, están bien preservados debido a las condiciones de aridez de larga data imperantes en este lugar. Sin embargo, y pese al enorme valor de dichos materiales, los meteoritos que se han encontrado en el desierto de Atacama, son llevados a otros lugares para su colección o estudio, puesto que en Chile no existen las condiciones necesarias para su almacenamiento ni para su análisis. Típicamente, para llevar a cabo este análisis, se utiliza como herramienta la microsonda electrónica, técnica no destructiva de análisis químico cualitativo y cuantitativo a escala micrométrica. En este trabajo de memoria, se busca llegar a la clasificación química y petrológica de dos muestras de meteoritos provenientes del sector Catalina, comuna de Taltal en la región de Antofagasta, denominadas como CAT-M5 y CAT-M9, dado por el prefijo CAT que proviene de Catalina, utilizando mineralogía automatizada (QEMSCAN: Evaluación Cuantitativa de Minerales mediante Microscopio Electrónico de Barrido), debido a que esta herramienta permite conocer la mineralogía automatizadamente de manera cuantitativa, además de elaborar mapas mineralógicos en falso color que permiten analizar la textura de las muestras. Por último, se espera evaluar los alcances y limitaciones de la técnica. Para realizar la clasificación, primeramente, se debió crear una lista SIP (del inglés, *Species Identification Protocols*) que contuviera la información necesaria para poder clasificar cada pixel de las muestras, en base a la intensidad de peak de sus señales. Esta lista, se llevó a cabo haciendo la lectura de una de las muestras, CAT-M5, debido a que conserva de mejor manera su textura original, en comparación con la otra muestra, lo que en primera instancia indica una menor afectación por procesos posteriores a su formación, con una lista SIP por defecto. Estos datos se analizaron estadísticamente, buscando básicamente, una agrupación de la información de acuerdo a sus similitudes. De esta manera se “crearon” las fases minerales que fueron ingresadas a QEMSCAN, como una nueva lista SIP, y se leyeron nuevamente las muestras, pero esta vez, entrega información en base a las fases ingresadas a partir del análisis estadístico. Gracias a este procedimiento, y a que QEMSCAN entrega información química, junto con la adición de datos específicos (contenidos de forsterita y enstatita) entregados por la Universidad Católica del Norte (UCN), se pudo llevar a cabo la clasificación química de las muestras. La caracterización del grado de meteorización también se pudo hacer de manera cualitativa con los mapas mineralógicos en falso color que entrega QEMSCAN como uno de sus productos finales. La clasificación petrológica y del estado de choque, se llevó a cabo utilizando microscopía óptica y QEMSCAN como herramienta complementaria. Los resultados indican que la muestra CAT-M5 se clasifica como condrito ordinario L/LL de tipo petrológico 4, con estado de choque S3 y grado de meteorización W2. La muestra CAT-M9 también corresponde a un condrito ordinario, del grupo LL de tipo petrológico 5-6, con estado de choque S4 y grado de meteorización W5. Por último, se discuten los alcances y las limitaciones de QEMSCAN al momento de realizar clasificaciones de condritos ordinarios.

1. INTRODUCCIÓN

Los meteoritos contienen información sobre variados procesos que pueden haber sufrido, tales como aquellos que ocurrieron en la nebulosa solar antes de la formación de los planetas, los sucedidos en cuerpos similares a los planetas, siendo el resultado de colisiones entre objetos interplanetarios y aquellos producidos por interacción con rayos cósmicos y galácticos (Wasson, 1974).

La tarea de los científicos que estudian meteoritos, por lo tanto, se centra en extraer la mayor cantidad de información posible a partir de estos materiales que caen en la superficie terrestre. Para lo anterior, la clasificación de meteoritos corresponde al marco básico con el cual los científicos trabajan, correspondiendo a un proceso diseñado para agrupar materiales similares (Weisberg y otros, 2006).

En Chile, la meteorítica corresponde a una rama de la geología aún poco desarrollada, pese a que el desierto de Atacama se trata de un laboratorio natural para el estudio de meteoritos debido a la gran acumulación y buena conservación de estos materiales gracias a las condiciones de aridez de larga data (Huzler y otros, 2016). Además, la falta de legislación e infraestructura para el almacenamiento y análisis de los especímenes encontrados en el norte de Chile, han provocado que la abrumadora mayoría del material recolectado sea llevado fuera del país y/o se encuentre en colecciones privadas o comercializado (Valenzuela, 2009). Es por esta razón, que, con este trabajo de memoria, se busca contribuir al desarrollo de la meteorítica en el país, al buscar la clasificación de dos muestras de meteoritos provenientes del sector “Catalina”, región de Antofagasta, recopiladas por Millarca Valenzuela Picón de la Universidad Católica del Norte, denominadas como CAT-M5 y CAT-M9.

Tradicionalmente, la clasificación de meteoritos se realiza mediante microsonda electrónica (del inglés, *electron micro probe analyzer* o EPMA), la cual constituye una técnica no destructiva de análisis químico cualitativo y cuantitativo a escala micrométrica. Esta técnica permite realizar clasificaciones con alta precisión, puesto que analiza a fondo la composición química de los materiales. En Chile, sin embargo, esta tecnología no está operativa aún, debido a su alto costo, por lo tanto, es necesario buscar otras herramientas que permitan cumplir con este objetivo. Es por este motivo, que se plantea a QEMSCAN (del inglés, *Quantitative Evaluation of Minerals by SCANNing electron microscopy*) como herramienta a utilizar en este

trabajo de memoria, debido a su capacidad de entregar mineralogía cuantitativa mediante la no destrucción de la muestra, como también por tener como producto, mapas mineralógicos en falso color que permiten analizar la textura de las muestras, además de estar presente en la Universidad de Concepción.

En cuanto a la clasificación de meteoritos, estos materiales se ordenan en dos grandes grupos, de acuerdo a sus composiciones y texturas: condritos y acondritos (Krot y otros, 2014). Los condritos son más numerosos y se consideran como primitivos, debido a que no han sufrido procesos de fusión, conservando su material original. Los acondritos en contraste, se constituyen por materiales diferenciados, y sus composiciones reflejan la ocurrencia de fusión, cristalización y otros procesos evolucionados. Los condritos, se dividen en tres clases principales: carbonáceos (C), ordinarios (O) y enstatita (E) (Hutchinson, 2004). Dentro de estas tres clases, los condritos ordinarios corresponden al tipo de meteorito más común que se presenta en la Tierra, constituyendo un 95% del total de meteoritos, según Krot y otros, 2014. Este tipo de meteorito se compone texturalmente por matriz y cóndrulos, los cuales a su vez se forman por silicatos (olivino, piroxeno y plagioclasa), troilita, y una fase metálica de Fe-Ni, además de otras fases accesorias como cromita y apatito (Dunn y otros, 2010).

La clasificación de Van Schmus y Wood (1967), constituye el marco general que permite diferenciar a los condritos ordinarios, entre los grupos químicos H, L y LL, mediante el contenido de fayalita (% molar) de sus olivinos con el contenido de la razón Fe metálico y Fe total. Los condritos del grupo H presentan un alto contenido de Fe (28 wt%), mientras que los condritos del grupo LL presentan el menor contenido de Fe (19 wt%), siendo los condritos del grupo L, un intermediario en el contenido de Fe (22 wt%) (Vernazza y otros, 2015). Van Schmus y Wood (1967), detallan aún más la clasificación de los condritos, teniendo en cuenta no solo parámetros químicos, sino que, además, los grados de alteración termal y/o acuosa que experimentan estos materiales, dado por el tipo petrológico. Por otra parte, una vez los meteoritos tocan la superficie terrestre, pueden sufrir meteorización, debido a las nuevas condiciones sobre las que se someten. La meteorización terrestre, afectará principalmente a aquellos minerales con Fe, los que se transformarán a arcilla y óxidos e hidróxidos de Fe (Ulloa, 2017), lo cual es descrito por Wlotza (1993) y Valenzuela (2011) lo hace específicamente para meteoritos encontrados en el desierto de Atacama. Otro proceso que afecta a los meteoritos, corresponde al metamorfismo de choque, lo que es el resultado de colisiones a altas velocidades en los cuerpos parentales. El estudio del metamorfismo de choque es una fuente de información

sobre la historia geológica y colisional de los cuerpos parentales de los meteoritos, por lo que es importante entender los cambios físico-químicos asociados a los impactos, cuyas principales señales quedan evidenciadas en los minerales que constituyen a los meteoritos (Stöffler y otros, 1991).

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

Evaluar la eficiencia de la mineralogía automatizada para clasificación de condritos ordinarios.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Elaborar lista paramétrica SIP (del inglés, *Species Identification Protocols*), basadas en intensidades de peaks de los elementos observados en espectros de rayos-x, obtenidos mediante EDS (del inglés, *Energy Dispersive Spectrometry*) en conjunto con el brillo o señal de electrones retrodispersados (BSE, del inglés *Backscattered Electrons*), emitidos por cada fase mineral presente en los condritos ordinarios, para identificar las principales fases minerales presentes en estas muestras.
- Aplicar lista SIP para la clasificación química y petrológica de las muestras CAT-M5 y CAT-M9 de condritos ordinarios.
- Verificar resultados QEMSCAN en base a otras técnicas disponibles.
- Interpretar procesos geológicos de los cuerpos parentales y terrestres a partir de la caracterización mineralógica y textural, determinando el estado de choque y grado de meteorización de las muestras CAT-M5 y CAT-M9.

1.2. Metodología de Trabajo

1.2.1. Etapa Gabinete 1

Recopilación bibliográfica científica y estudio sobre meteorítica (generalidades, tipos de meteoritos, clasificaciones, etc.) y sobre elaboración de listas SIP que permitan el reconocimiento de minerales formadores de condritos en QEMSCAN. Además, se estudiaron trabajos previos de diversa índole realizados con RStudio (software profesional en la ciencia de datos), utilizado para la separación y clasificación o clusterización de grandes bases de datos, con el fin de comprender su lenguaje y funcionamiento.

1.2.2. Etapa de Laboratorio

Elaboración de lista SIP para QEMSCAN utilizando técnicas estadísticas. Para lo anterior es necesario en primer lugar, realizar el procesamiento estadístico de datos geoquímicos utilizando el software RStudio. La base de datos (*pixel data*) se obtiene a partir del reconocimiento de píxeles a través QEMSCAN en base a intensidades de peaks del brillo o señal de electrones retrodispersados (BSE). Las herramientas estadísticas que se utilizan con el fin de agrupar o “clusterizar” dicha información asociada a píxeles corresponden al Análisis de Componentes Principales, lo cual permite ver la “forma” general de los datos, identificando cuáles muestras son similares y cuáles son diferentes, y, por lo tanto, especificar el número de grupos. Luego, se utiliza *K Means Clustering*, que corresponde a un algoritmo no lineal que agrupa datos en función de la similitud o grupos similares. Busca dividir las observaciones en un número pre-especificado de grupos. La segmentación de datos se lleva a cabo para asignar cada ejemplo de entrenamiento a un segmento llamado clúster, que corresponderán a las fases minerales que se identifiquen. A continuación, utilizando el software de procesamiento de datos de QEMSCAN, iDiscover, se ingresa la nueva lista SIP a partir de los parámetros estadísticos que entrega el análisis estadístico previo. De esta manera, se crean mapas mineralógicos de QEMSCAN en falso color, que identifican las fases minerales de la lista SIP y además permite obtener información química, modal y textural de los granos minerales para el total de las muestras.

En una última etapa del trabajo práctico, se utiliza el microscopio óptico con el fin de describir petrográficamente las dos muestras de condritos analizadas y para contrastar dichas observaciones con los resultados obtenidos con QEMSCAN. También se utilizó microscopía electrónica de barrido (SEM: del inglés, *Scanning Electron Microscopy*) para corroborar con análisis químicos puntuales la clasificación realizada por QEMSCAN.

1.2.3. Etapa Gabinete 2

Realizar clasificaciones de las muestras y evaluar los resultados finales con los productos obtenidos en la Etapa de Laboratorio. Para lo anterior se utilizan los diagramas resultantes de las clasificaciones de Van Schmus y Wood (1967), Valenzuela (2003, con los datos de Von Michaelis y otros, 1969) y Valenzuela (2003, con los datos de Keil y Fredriksson, 1964 y de Fredriksson y otros, 1968). Además, se evaluaron los alcances y limitaciones de la técnica utilizada, además de entregar recomendaciones para continuar con este trabajo en una próxima etapa.

1.3 Trabajos Anteriores

Debido a la gran cantidad de trabajos que tratan sobre la naturaleza y/o clasificaciones de meteoritos, no es posible nombrar todos los documentos que se han realizado en estos ámbitos, por lo que a continuación solo se citarán algunos trabajos de mayor importancia, los cuales han sentado las bases para el estudio de meteoritos.

Van Schmus y Wood (1967) establecen la clasificación bimodal de meteoritos que considera parámetros químicos y petrológicos que es usada hasta el día de hoy para clasificar meteoritos condriticos.

Stoffler y otros (1991) proponen la clasificación del estado de choque (S) de los meteoritos, la cual se basa en el análisis de las señales que quedan en silicatos como olivino y plagioclasa, producto del metamorfismo de choque por colisiones entre cuerpos asteroidales.

Bennett y McSween (1996) plantean una clasificación para estimar el estado de choque de los meteoritos basada en señales que manifiestan los minerales opacos debido a la acción del metamorfismo de choque.

Wlotzka (1993) define el grado de meteorización (W) que corresponde a la primera clasificación que permite medir la influencia de la meteorización terrestre que afecta a todos los meteoritos que caen en la superficie de la Tierra.

Valenzuela (2003) crea el primer trabajo de meteoritos realizado en Chile, el cual consiste en un estudio petrográfico y geoquímico del meteorito Paposó encontrado en el Desierto de Atacama.

Valenzuela (2011) estudia los procesos de meteorización de condritos ordinarios del Desierto de Atacama, cuantificando el porcentaje de oxidación mediante espectroscopia Mössbauer, y obteniendo edades terrestres, a través de ^{14}C , que permitieron inferir que para Atacama estos procesos están controlados principalmente por la porosidad inicial del meteorito, la cual está íntimamente asociada a su estado de choque, y secundariamente por las condiciones ambientales imperantes al momento de la caída, lo cual difiere para otros desiertos del mundo.

Pinto (2017) realiza el primer trabajo en Chile que pretende realizar una clasificación química del meteorito PAMPA-A mediante mineralogía automatizada QEMSCAN ®.

1.4. Agradecimientos

Este trabajo de memoria fue posible gracias a la recolección de muestras que fue financiada a través del proyecto REDI170155 de la Dra. Millarca Valenzuela de la Universidad Católica del Norte, en conjunto con el trabajo analítico que fue financiado por el Fondo de Incentivo a Publicaciones de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad de Concepción.

En primer lugar, agradezco a la profesora Verónica Oliveros por confiarme este interesante trabajo de memoria y por ser mi guía. Por darse el tiempo de atenderme cuando lo necesité y por su apoyo. Agradezco también enormemente al profesor Alexey Novoselov por enseñarme las nociones de QEMSCAN y a trabajar en el análisis estadístico de datos, durante un prolongado periodo. También por su paciencia y dedicación. A la profesora Millarca Valenzuela por facilitarnos datos que permitieron cumplir con el objetivo de esta memoria.

Agradezco a mi familia por apoyarme y entregarme tanto cariño siempre. Soy muy afortunada de tenerlos. A mis amigos por animarme y alentarme, además de acompañarme estos siete años de carrera, que, sin duda, fueron de los mejores que he vivido. A Diego por su preocupación y cariño.

Por último, agradezco a todas las lindas y cálidas personas que conforman y conformaron el Departamento Ciencias de la Tierra de la Universidad de Concepción.

Y a la geología en todos sus ámbitos, por ser una ciencia maravillosa y fascinante.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Conceptos generales de meteorítica

Los meteoritos se han definido tradicionalmente como objetos sólidos que han caído a la Tierra desde el espacio. Esta definición, sin embargo, ya no es adecuada puesto que, en las últimas décadas, objetos hechos por el hombre han caído a la Tierra desde el espacio (Krot y otros, 2014). Teniendo en cuenta lo anterior, Robin & Grossman (2010) definen como “meteorito” a un cuerpo objeto sólido de origen natural de más de 10 μm de tamaño, el cual deriva de un cuerpo celeste, que fue transportado por medios naturales desde el cuerpo sobre el que se formó a una región fuera de la influencia gravitatoria dominante de ese cuerpo y que luego chocó con un cuerpo natural o artificial más grande que él mismo (incluso si es el mismo cuerpo desde el que fue lanzado o cuerpo parental). Además, los mismos autores definen “meteoroides”, cuyas dimensiones son menores que las de un asteroide, como un objeto sólido natural de 10 μm a 1 m de tamaño que se mueve en el espacio interplanetario (formando los precursores de los meteoritos antes del impacto), y a un “micrometeoroides” como un meteoroides de 10 μm a 2 mm de tamaño. Cuando un meteoroides ingresa a la atmósfera terrestre, se produce la fricción entre ese cuerpo y la atmósfera, aumentando la temperatura superficial del material, la cual dependerá principalmente del tamaño, velocidad y ángulo de incidencia del objeto entrante (Hutchinson, 2004). Este aumento de temperatura es tan alto, que la superficie del cuerpo se funde y se vuelve incandescente. Este cuerpo, se denomina “meteorito” (Ulloa, 2017).

2.2 Clasificación general de meteoritos

De manera general, los meteoritos que son recuperados luego de observar sus trayectorias por el cielo, se denominan como “caídos”, mientras que aquellos que no pueden ser asociados con caídas observadas se denominan como “encontrados” (Krot y otros, 2014). Esta es una distinción importante porque los meteoritos “encontrados”, dependiendo del tiempo que pasaron en la Tierra, son más propensos a la interacción química con el medio terrestre. Por lo tanto, las tendencias químicas que registran deben entenderse cuidadosamente (Weisberg y otros, 2006).

Según el contenido de metal Fe-Ni y silicatos, los meteoritos se clasifican en meteoritos de hierro (compuestos principalmente de hierro metálico), hierro-rocosos (compuestos por proporciones similares de silicatos y hierro metálico) y rocosos (compuestos principalmente por silicatos) (Hutchison, 2004).

Con frecuencia se utilizan los términos “rocosos” para meteoritos formados únicamente por silicatos, “sideritos” o “metálicos” para aquellos formados solo de metal (Figura 2.1 (a)) y “siderolito” o “mixtos” para los que constituyen una mezcla de minerales silicatados y metal (Varela, 2015). Sin embargo, estos términos son bastante generales y sólo sirven para una descripción inicial del material.

Según sus composiciones químicas y texturas, los meteoritos se dividen en dos grandes categorías: acondritos (Figura 2.1 (b)) y condritos (Figura 2.1 (c) y (d)) (Krot y otros, 2014). Los condritos, que constituyen el tipo de meteorito cuyas caídas observadas son mucho más numerosas en comparación con el resto de los meteoritos, como se resume en la Figura 2.2, presentan una composición química cercana a la del sol libre de volátiles. Este tipo de meteorito, por lo tanto, se considera como primitivo, en contraste con los meteoritos acondríticos, mucho menos numerosos, y que se constituyen por materiales diferenciados, cuyas composiciones manifiestan fusión, cristalización además de otros procesos (Hutchison, 2004).

Los meteoritos acondríticos carecen de texturas condriticas y se forman por fusión parcial o completa y diferenciación planetaria de asteroides precursores condriticos o cuerpos planetarios más grandes (Marte y Luna), y por lo tanto brindan oportunidades únicas para estudiar estos procesos en cuerpos extraterrestres. Varios grupos de meteoritos acondríticos experimentaron bajos grados de fusión y han conservado en gran medida sus composiciones condriticas. Para enfatizar la naturaleza relativamente sin procesar de ellos y su estado intermedio en relación con los condritos y los meteoritos altamente diferenciados, a menudo se las denomina acondritos primitivos. Sin embargo, las distinciones entre estas categorías no son claras, ya que se utilizan muchas propiedades químicas, texturales e isotópicas diferentes para distinguirlas (Krot y otros, 2014).

Los meteoritos se clasifican utilizando un esquema de clasificación, basado en su química, isótopos de oxígeno, mineralogía y petrografía. Los objetivos de este esquema de clasificación (Figura 2.3), son proporcionar etiquetas descriptivas para clases de meteoritos con orígenes o historias de formación similares que podrían derivarse del mismo cuerpo asteroidal o planetario, y revelar posibles vínculos genéticos entre varias clases (Krot y otros, 2014).

Para categorizar la diversidad de meteoritos existentes, se han considerado varios órdenes taxonómicos como superclanes, clanes, clases, grupos y subgrupos, aunque dentro de todos

ellos los más utilizados son los órdenes clase y grupo. La clase asocia a dos o más grupos de meteoritos que comparten propiedades químicas primarias de roca total y de isótopos de oxígeno. En este contexto, se reconocen tres clases principales de meteoritos condriticos: carbonáceos (C), ordinarios (O), de enstatita (E), y otros menos comunes como rumuruti (R) y kakangari (K).

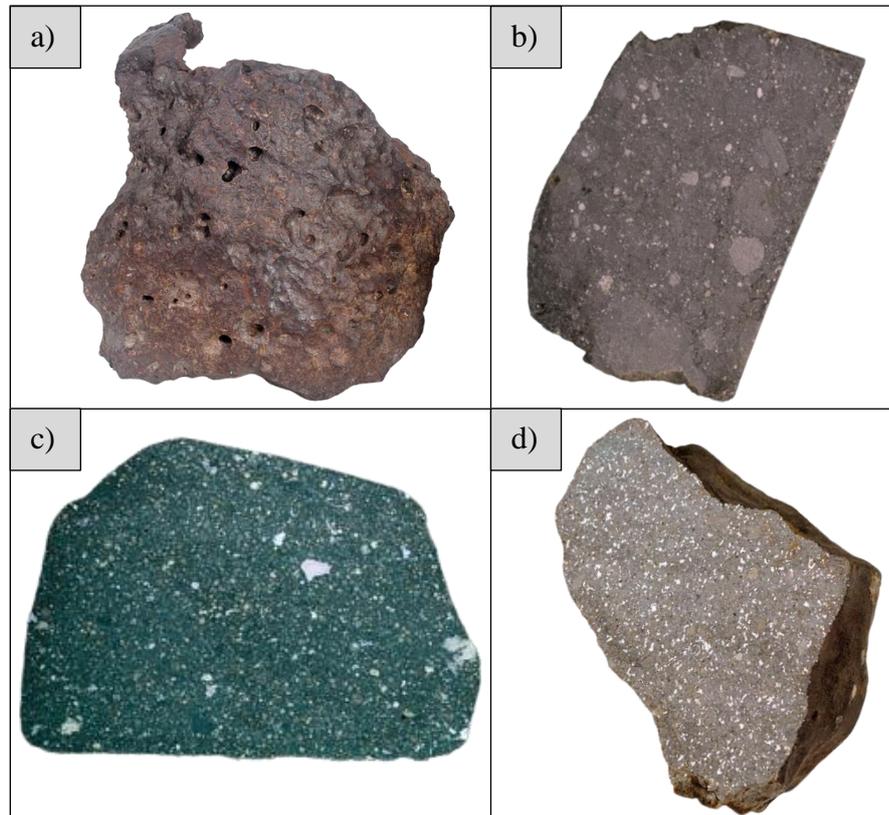


Figura 2.1: Ejemplos de distintos tipos de meteoritos. a) Siderito o meteorito metálico encontrado en Arizona, EE.UU. b) Acondrito (lunar), descubierto en Antártica. c) Condrito carbonáceo encontrado en Allende, México. d) Condrito ordinario, descubierto en Iowa, EE.UU. (Extraído de la colección de meteoritos del Instituto Smithsonian (<https://collections.nmnh.si.edu/search/ms/?v=g1>)).

Un grupo corresponde a cinco o más meteoritos con una petrología y composición química similar. Según su química total se pueden diferenciar 15 grupos de meteoritos condriticos: 8 grupos de condritos carbonáceos, los que tienen contenidos variables de agua y componentes orgánicos, designados como CI, CM, CR, CH, CB, CV, CK y CO, cuya segunda letra se asocia al nombre del condrito que caracteriza cada grupo (Ivuna, Mighei, Renazzo, ALH85085, Bencubbin, Vigarano, Karoonda, Ornans, respectivamente), 3 grupos de condritos ordinarios conocidos como H, L y LL, donde las letras se relacionan con los contenidos de Fe en los meteoritos (H: high iron, L: low iron y LL: very low iron), y finalmente, 2 grupos de condritos de enstatita, EH y EL, con diferencias en su contenido de Fe metálico (H: high y L: low) (Hutchison, 2004).

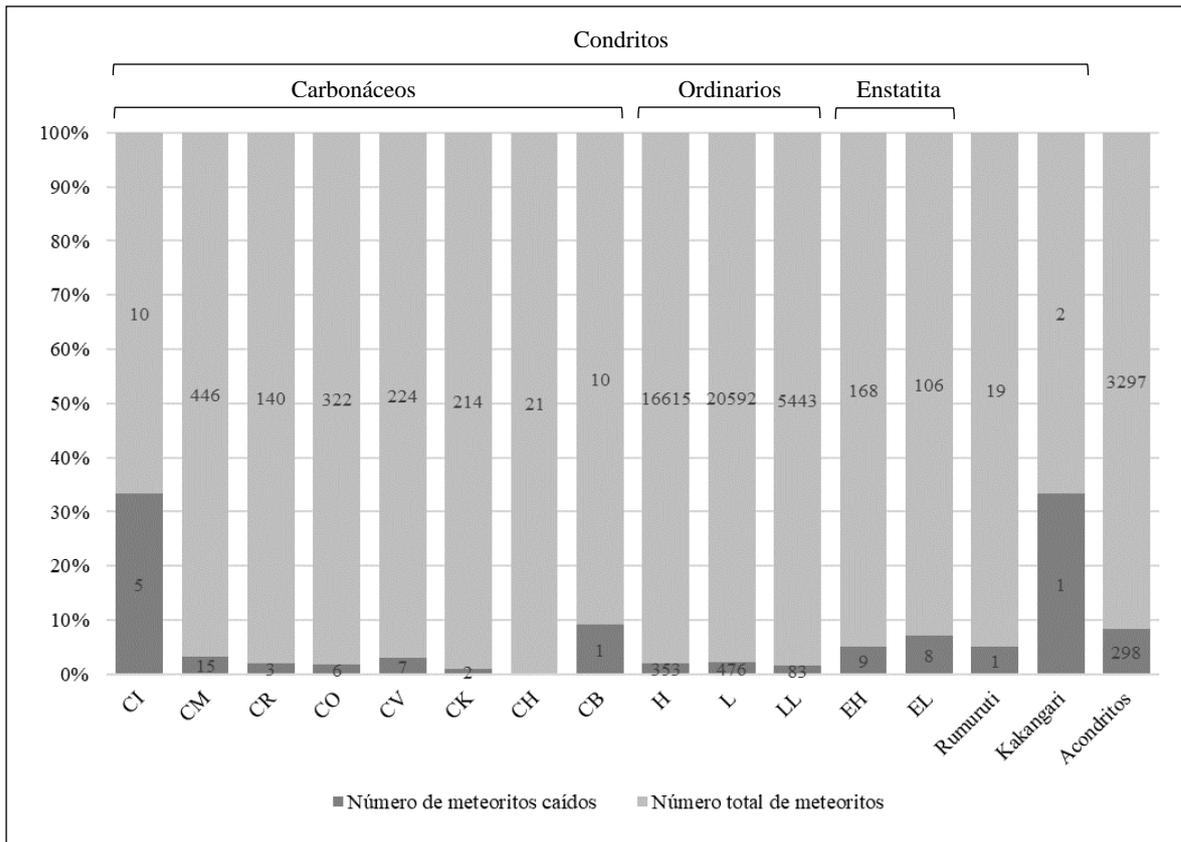


Figura 2.2: Resumen del número de meteoritos “caídos” respecto del total de meteoritos existentes para cada grupo de meteoritos condriticos y valores totales de meteoritos acondriticos. (Extraído y modificado de Krot y otros, 2014).

Condritos														
Clase →	Carbonáceos			Ordinarios	Enstatita									
Grupo →	CI	CM	CO	CR	CB-CH	CV	CK	H	L	LL	EH	EL	R	K
Tipo petrológico →	1	1-2	3-4	1-2	3	3	3-4	3-6	3-6	3-6	3-6	3-6	3-6	3
Acondritos y otros meteoritos ígneos														
Acondritos primitivos	Acondritos diferenciados			De hierro y hierro-rocosos			Planetarios							
Winonaitas	Angritas			Mesosideritos			Marcianos							
Acapodranitas	Aubritas			Pallasitas			Shergottitas							
Acapulcoitas	Ureilitas			IABC			Nahklitas							
Lodranitas	HED			IC			Chassignitas							
Brachinitas	Howarditas			IIAB			Ortopiroxenitas							
	Eucritas			IIC			Lunares							
	Diogenitas			IID										
				IIE										
				IIG										
				IIIAB										
				IIICD										
				IIIE										
				IIIF										
				IIVA										
				IIVB										

Figura 2.3: Clasificación taxonómica para meteoritos condriticos, acondriticos y otros meteoritos ígneos con sus respectivas subdivisiones. (Extraído y modificado de Krot y otros, 2014).

2.3. Condritos: química y clasificación

Los condritos son meteoritos que proporcionan las mejores pistas sobre el origen del sistema solar principalmente porque no sufren fusión luego de originarse. Son las rocas más antiguas conocidas (sus componentes se formaron durante el nacimiento del sistema solar, hace 4567 Ma) y su abundancia de elementos no volátiles es cercana a la de la fotosfera solar (Hutchinson, 2004).

Los condritos presentan cuatro componentes principales: cóndrulos, generalmente de tamaños milimétricos, consisten en masas esféricas de olivino y piroxeno principalmente, o más raramente de metal y/o sulfuros; Fe-Ni metálico; inclusiones refractarias ricas en Ca y Al (CAIs, del inglés *Ca-Al rich inclusions*) y agregados ameboidales de olivino (AOAs, del inglés *amoeboid olivine aggregates*); y material de matriz de grano fino (Figura 2.4). En la Tabla 2.1, se puede observar las proporciones de dichos componentes para cada tipo de condrito.

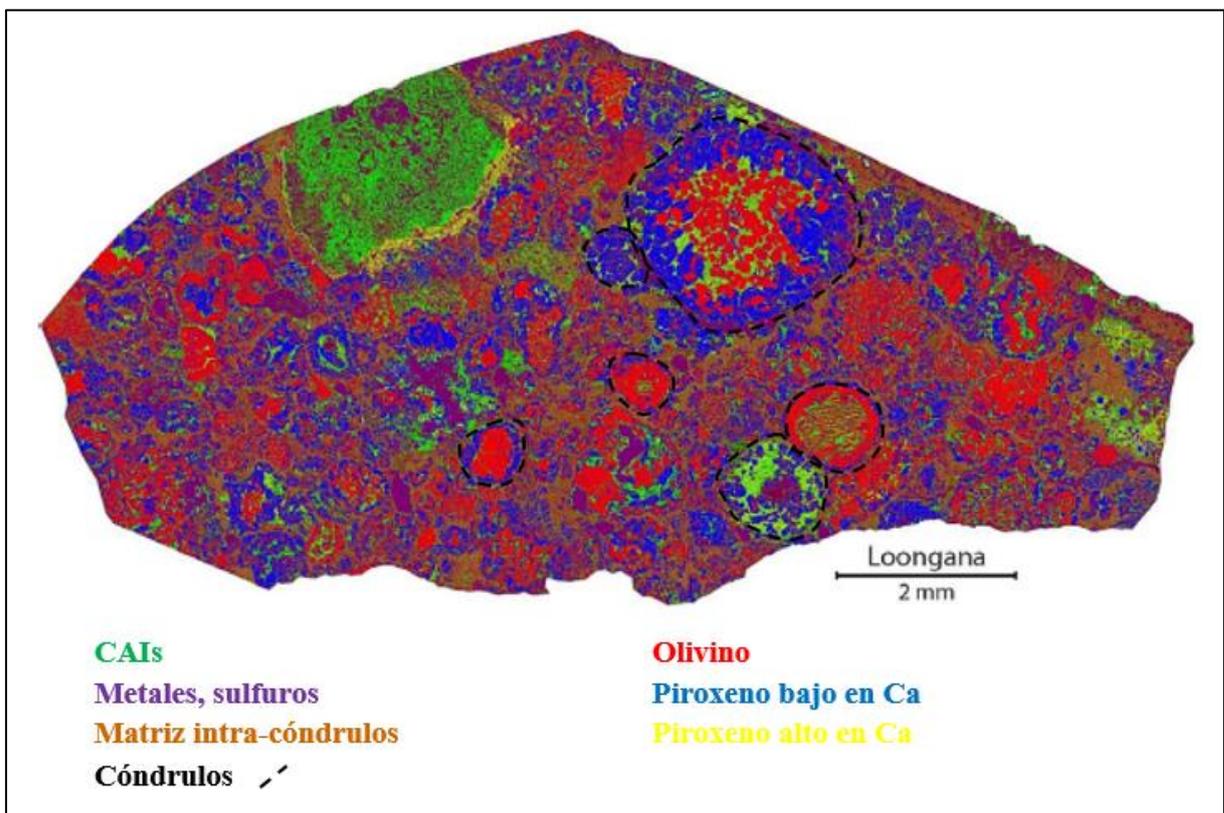


Figura 2.4: Componentes principales de un condrito: cóndrulos, metales, matriz y CAIs (inclusiones ricas en Ca y Al). (Extraído y modificado de Metzler y otros, 2021).

En general, se acepta que las inclusiones refractarias, los cóndrulos y el FeNi-metal se forman en la nebulosa solar mediante procesos de alta temperatura que incluyen condensación y evaporación. Muchos CAIs y la mayoría de los cóndrulos y FeNi-metal se fundieron

posteriormente durante múltiples episodios de calentamiento breves. Mientras que la matriz, algunos CAIs y el metal en algunos condritos (por ejemplo, CH y CB) parecen no haberse fundido. Aunque la mayoría de los condritos experimentaron procesamiento térmico en sus asteroides progenitores, como alteración acuosa o hidrotermal, metamorfismo termal y de choque, no experimentaron fusión ni diferenciación ígnea y, por lo tanto, conservan en gran medida registros de procesos físicos y químicos en la nebulosa solar (Krot y otros, 2014).

Tabla 2.1: Sumario de las propiedades petrográficas de meteoritos condriticos. (Extraído y modificado de Krot y otros, 2014).

Clase Grupo	Carbonáceos								Ordinarios			Enstatita	
	CI	CM	CO	CR	CH	CB	CV	CK	H	L	LL	EH	EL
CAI + AOA (vol%)	<1	5	13	0,5	0,1	<0,1	10	4	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Cón- drulos (vol%)	<1	20	48	50- 60	~70	30-40	45	15	60-80	60-80	60-80	60-80	60-80
Matriz (vol%)	>99	70	34	30- 50	5	<5	40	75	10-15	10-15	10-15	<0,1	<0,1
Metal (vol%)	0	0,1	1-5	5-8	20	60-70	0-5	<0,01	8,4	4,1	2,0	10,1	10,2
Cón- drulos (mm)	-	0,3	0,1- 5	0,7	0,02	0,1-20	1	0,7	0,3	0,7	0,9	0,2	0,6

Las principales clases químicas de los condritos (carbonáceos, ordinarios y enstatita), se diferencian por variaciones sistemáticas del tipo texturales y químicas de sus elementos mayores no volátiles (Si, Mg, Fe y Al), como se observa en la Tabla 2.2.

Los condritos de enstatita se forman bajo condiciones reductoras. En este ambiente, el hierro no se combina con el oxígeno y solo se encuentra como Fe metálico o formando sulfuros y fosfuros. Por lo tanto, los silicatos de los condritos de enstatita no presentan Fe en su estructura, formándose casi exclusivamente enstatita (MgSiO_3), lo cual se evidencia en las bajas razones de Mg/Si (< 0.75) asociadas a este tipo de condritos, como se observa en la Figura 2.5. Además, todo el hierro presente en este tipo de condritos se encuentra solo como metal. La presencia de estos minerales indica que este grupo de meteoritos se formó bajo condiciones reductoras extremas, es decir, en regiones de la nebulosa solar ricas en hidrógeno. En el extremo opuesto, bajo condiciones oxidantes, el hierro se combina con el oxígeno y entra a formar parte de la estructura de los silicatos (olivinos, piroxenos, etc) (Varela, 2015). Los condritos carbonáceos se forman bajo estas condiciones, presentando altas razones de Mg/Si (> 0.86), como se observa en la Figura 2.5, además, muchos ocurren hidratados conteniendo significativamente Fe^{3+} en

forma de magnetita (Fe_3O_4). Los condritos ordinarios por su parte, se encuentran entre los extremos, teniendo razones de Mg/Si intermedias (0.75-0.86) y conteniendo de hierro tanto metálico como oxidado (Hutchinson, 2004).

Tabla 2.2: Composiciones químicas de roca total media para los grupos de condritos (%wt). (Extraído de Hutchinson, 2004).

Clase	Carbonáceos							Ordinarios			Enstatita	
Grupo	CI	CM	CO	CV	CK	CR	CH	H	L	LL	EL	EH
Si	10,5	12,9	15,9	15,6	15,1	15,3	13,3	16,9	18,5	18,9	16,7	18,6
Ti	0,042	0,058	0,078	0,098	0,130	0,110	0,047	0,060	0,063	0,062	0,045	0,058
Al	0,86	1,18	1,43	1,75	1,61	1,27	1,06	1,13	1,22	1,19	0,81	1,05
Cr	0,265	0,305	0,355	0,360	0,366	0,375	0,343	0,366	0,388	0,374	0,315	0,305
Fe	18,2	21,0	24,8	23,5	23,6	24,0	40,4	27,5	21,5	18,5	29,0	22,0
Mn	0,190	0,170	0,165	0,145	0,146	0,170	0,106	0,232	0,257	0,262	0,220	0,163
Mg	9,7	11,7	14,5	14,5	14,8	13,9	12,3	14,0	14,9	15,3	10,6	14,1
Ca	0,92	1,27	1,58	1,90	1,72	1,38	1,14	1,25	1,31	1,30	0,85	1,01
Na	0,49	0,41	0,41	0,33	0,32	0,32	0,18	0,64	0,70	0,70	0,68	0,58
K	0,056	0,040	0,035	0,031	0,029	0,030	0,021	0,078	0,083	0,079	0,080	0,074
P	0,102	0,090	0,104	0,099	0,043	0,122	~0,1	0,108	0,095	0,085	0,200	0,117
Ni	1,07	1,20	1,40	1,34	1,27	1,36	2,45	1,60	1,20	1,02	1,75	1,30
Co	0,051	0,058	0,069	0,066	0,064	0,067	0,115	0,081	0,059	0,049	0,084	0,067
S	5,90	3,30	2,00	2,20	1,58	1,31	0,25	2,00	2,20	2,30	5,80	3,30
H ₂ O	18,0	12,6	0,6	2,5	0,8	5,7	0,1	-	-	-	-	-
C	3,20	2,20	0,45	0,56	~0,1	1,44	~0,8	0,11	0,09	0,12	0,40	0,36
O	30,0	32,0	36,5	34,8	35,5	31,2	25,6	35,7	37,7	40,0	28,0	31,0
Fe ⁰ /Fe ^{tot}	0,00	0,00	0,10	0,10	0,00	0,43	0,85	0,60	0,30	0,15	0,65	0,74

Valenzuela (2003, con los datos de Von Michaelis y otros, 1969) presenta un diagrama de clasificación con las razones Mg/Si vs Al/Si y Fe/Si, todas en porcentajes de peso (Figura 2.5), donde la razón Al/Si decrece desde los condritos carbonáceos a los condritos ordinarios y finalmente hasta los condritos de enstatita. La razón Fe/Si por su parte, no muestra un patrón claro de acuerdo a la discriminación de clases, puesto que hay traslapes en este contenido para las distintas clases de condritos. De este diagrama, a modo general, se pueden diferenciar las tres clases de condritos y la mayoría de los grupos, sin embargo, la resolución de los grupos L y LL de los condritos ordinarios es más compleja, dado que estos meteoritos difieren imperceptiblemente con respecto a las razones Mg/Si y Al/Si y se traslapan con la razón Fe/Si. Estos dos grupos son más fácilmente reconocibles en base a las relaciones entre Fe total, Fe metálico y Níquel, como se muestra en la Figura 2.6, donde en condritos tipo L, el metal tiene razones Ni/Fe entre 0.1 y 0.3 (% wt) y razones de Fe metálico a Fe total entre 0.2 y 0.5 (% wt) (Valenzuela, 2003)

Una clasificación, ampliamente utilizada, es la establecida por Van Schmus y Wood (1967) que integra las características químicas, mineralógicas y texturales de los meteoritos, a diferencia de otros autores anteriores a la época, que solamente consideraban factores químicos. A través de estos parámetros, es posible diferenciar entre grupos de condritos, teniendo en cuenta además el grado de alteración acuosa y termal experimentado, dado por el tipo petrológico.

En esta clasificación, Van Schmus y Wood (1967) definen los siguientes parámetros para describir las diferencias entre grupos de condritos:

- i) La razón (en % peso) de Fe total y SiO₂ (Fe/SiO₂) en el análisis de roca total, correspondiendo a una forma fidedigna de presentar las diferencias en el contenido de Fe total (Figura 2.7).
- ii) La razón SiO₂/MgO (en % peso) en el análisis de roca total. Esta es una forma fidedigna de distinguir las 3 clases químicas: carbonáceos (C), ordinarios (O) y enstatita (E).
- iii) La razón (molar) entre FeO/(FeO+MgO) en los olivinos (contenido de fayalita) y piroxenos (contenido de ferrosilita).
- iv) La razón entre el contenido total de Fe metálico (Fe⁰) y el contenido de Fe total. Esto nos entrega el grado de oxidación del Fe en los condritos ordinarios, permitiendo diferenciar entre los tipos H, L o LL (Figura 2.7).

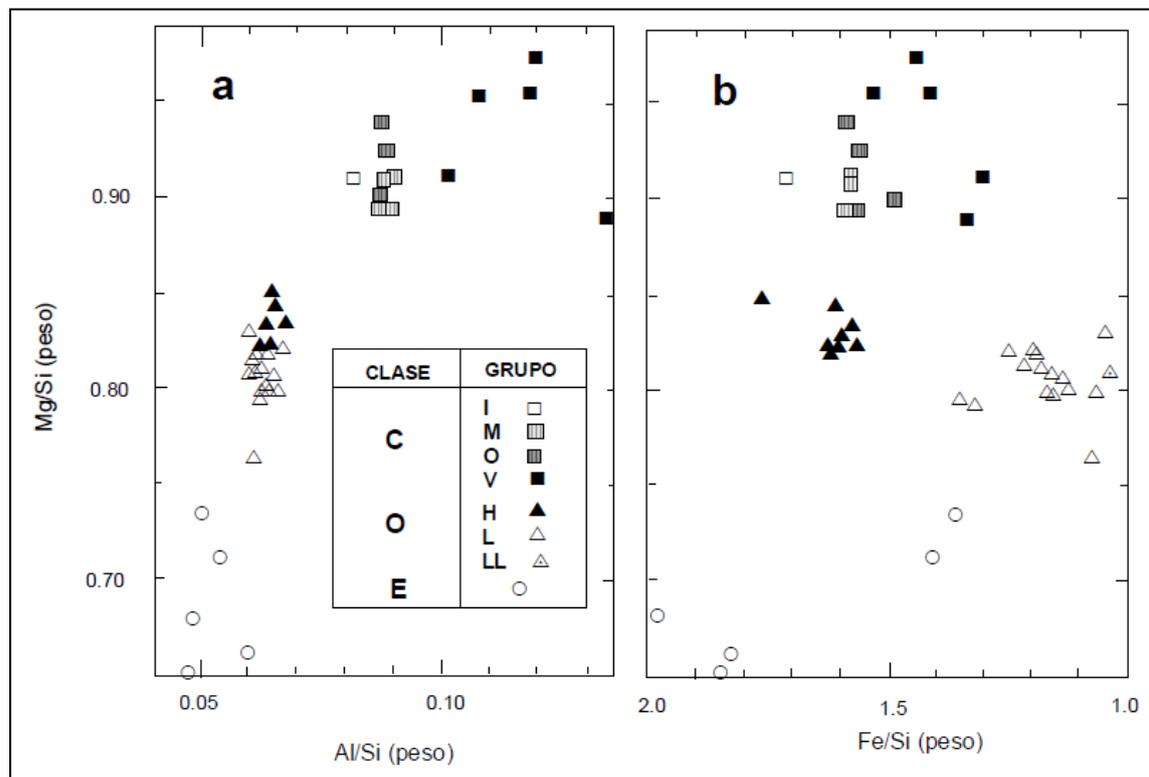


Figura 2.5: Composición de las razones Mg/Si, Fe/Si y Al/Si para meteoritos condriticos. (Extraído de Valenzuela, 2003).

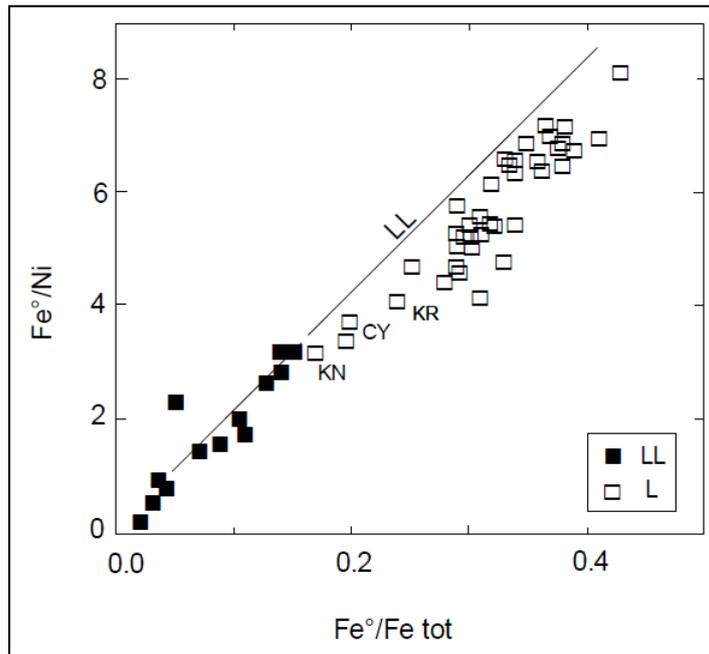


Figura 2.6: Distribución de Ni y Fe total y metálico en condritos ordinarios de los grupos L y LL. La línea ajustada a los datos del grupo LL muestra la diferencia en la razón Ni/Fe tot entre ambos grupos. Los meteoritos Knyahinya (KN), Segowlie (SE), Cynthiana (CY) y Krymka (KR) permanece incierta su afinidad de grupo en base a los datos presentados por (Dodd, 1981). (Extraído y modificado de Krot y otros, 2014).

En la clasificación de Van Schmus y Wood (1967), además se establece una mayor subdivisión de los principales grupos químicos de acuerdo con sus características petrológicas, definiendo así seis tipos petrológicos. Las variaciones que describen estas características son tales que la mayoría de ellas se explican por procesos metamórficos que actúan sobre materiales primitivos, o por variaciones primarias en el grado de equilibrio que sufrieron durante su formación.

El tipo petrológico subdivide a los principales grupos de condritos de acuerdo con el grado de metamorfismo que manifiestan, producido a partir de procesos de calentamiento que involucran temperaturas menores a las de su fusión. El tipo 3 representa a los materiales menos afectados por alteración secundaria, es decir, a materiales prístinos, donde confluyen los procesos de alteración acuosa y termal en sus grados menores. El nivel de alteración acuosa (con participación de agua ocurrido en la nebulosa o dentro de los cuerpos parentales) aumenta desde el tipo 3 al 1, mientras que el metamorfismo termal (sin participación de agua) lo hace desde el tipo 3 al 6. El incremento de la alteración termal produce un equilibrio químico y recristalización textural de los condritos, por ello, los que se asocian al tipo petrológico 3 se conocen como condritos no equilibrados y los de tipo 4 a 6 como condritos equilibrados (Varela, 2015). Posteriormente, se definió el tipo petrológico 7 (Dodd y otros, 1975), para describir aquellos condritos que han sido totalmente recristalizados o incluso fundidos muchas veces por impacto. Los criterios para definir cada tipo petrológico son resumidos en la Tabla 2.3. En la Figura 2.8 se muestra un esquema que ilustra la información anterior.

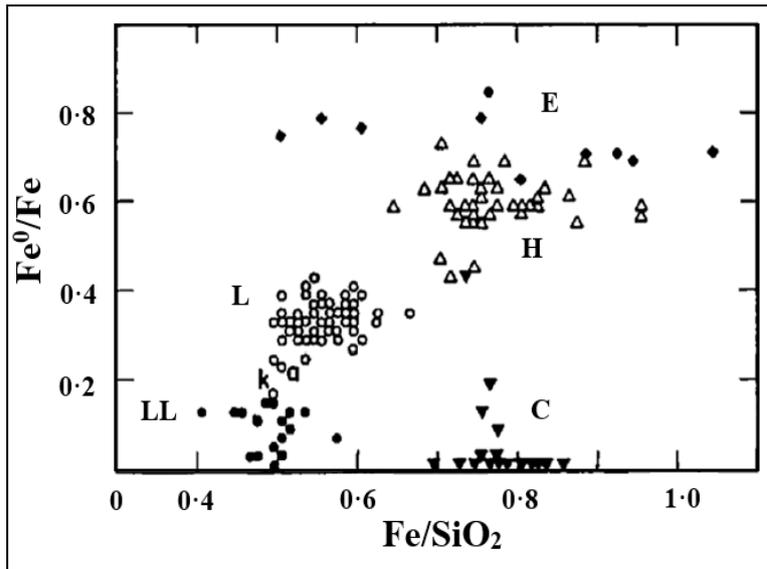
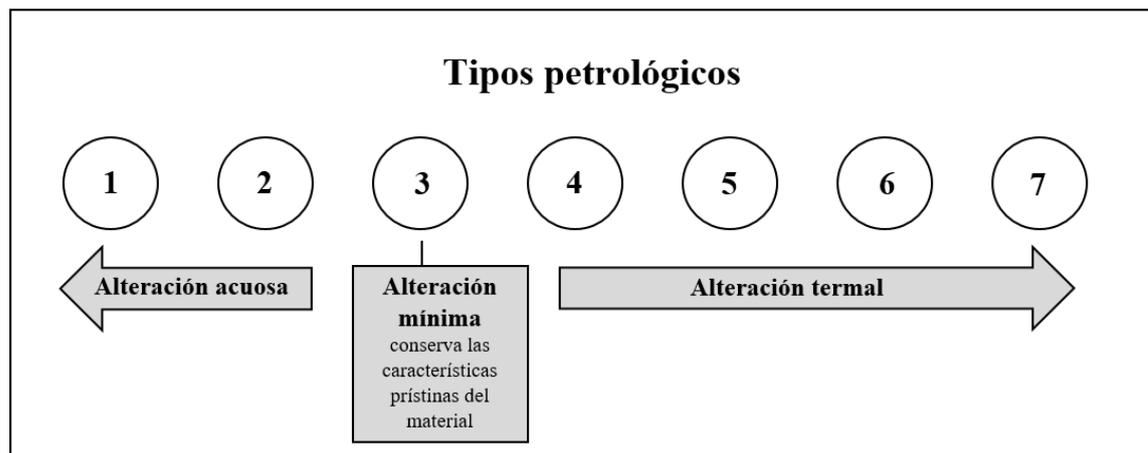


Figura 2.7: Razón Fe^0/Fe vs razón Fe/SiO_2 para los grupos químicos de condritos (Fe^0 = hierro metálico; Fe = hierro total; E, C y O corresponden a los condritos enstatita, carbonáceos y ordinarios respectivamente. H, L y LL corresponden a los condritos ordinarios de alto, bajo y muy bajo contenido de Fe , respectivamente. (Modificado de Van Schmus y Wood, 1967).

Figura 2.8: Tipos petrológicos y alteraciones involucradas. (Modificado de Varela, 2015).



En cuanto a la asociación con los distintos grupos químicos de condritos, se establece que los tipos petrológicos 1 y 2 están restringidos a cuatro grupos de condritos carbonáceos que han experimentado alteración acuosa (el agua provoca la alteración de la mineralogía anhidra original, sin la existencia de calor suficiente para promover el equilibrio químico y recristalización de sus componentes) a bajas temperaturas (de 100° a $200^\circ C$) (Hutchinson, 2004), mientras que los condritos ordinarios se caracterizan por estar asociados únicamente a tipos petrológicos que van desde el 3 al 6, produciéndose metamorfismo termal, con temperaturas que llegan a los $800^\circ C$, sin la presencia de agua. Además, con el fin de analizar aún más los condritos menos equilibrados, debido a que son los únicos que preservan información sobre su acreción, se hizo necesario diferenciar al tipo petrológico 3. Sears y otros (1991) lo lograron a partir de termoluminiscencia, subdividiendo así al tipo 3 en 10 subtipos.

Tabla 2.3: Características de los distintos tipos petrográficos. El tipo petrográfico 7 fue introducido con posterioridad a Van Schmus y Wood (1967), por Dodd y otros (1975). (Según Van Schmus y Wood, 1967 con las modificaciones de Dodd y otros (1975) y Sears y otros (1991)).

Tipo Petroológico							
Criterio	1	2	3	4	5	6	7
Dispersión de la composición de olivino		>5% desviación media de Fe		≤5%	Homogéneo		
Estado estructural del piroxeno bajo Ca		Principalmente monoclinico		>20% monoclinico	<20% monoclinico	Ortorrómbico	
Feldespatos		Granos primarios menores		Granos secundarios >2 μm	Granos secundarios 2-50 μm	Granos secundarios >50 μm	
Vidrios en cóndrulos	Alterado o ausente	Mayoría alterado	Claro, isotrópico	Desvitricado	Ausente		
Contenido de Ni (% wt) en metal		Taenita <20% o ausente		Presenta kamacita y taenita (>20%)			
Contenido de Ni (% wt) en sulfuros		>0,5%		<0,5%			
Matriz	Grano fino, opaca	Principalmente de grano fino, opaca	Opaca a transparente	Transparente, recristalizada, con engrosamiento desde tipo 4 a 7			
Textura (integración matriz-cóndrulos)	Sin cóndrulos	Cóndrulos bien definidos		Se pueden identificar algunos cóndrulos, bordes mal definidos	Delineados, poco definidos	Pobremente definidos	Solo relictos
Carbono (% wt)	3-5%	0,8-2,6%	0,2-1%	<0,2%			
Agua (% wt)	18-22%	18-22%	0,3-3%	<1,5%			

2.3.1. Condritos Ordinarios

Los condritos ordinarios reciben este nombre pues constituyen el material más común dentro de las colecciones de meteoritos, constituyendo el 80% de las caídas observadas (Dunn y otros, 2010). La importancia científica de estos materiales radica en el hecho de que ellos no han sufrido procesos de fusión, ya sea total o parcial, por lo cual conforman meteoritos primitivos o no diferenciados, aunque sí han sufrido procesos de calentamiento en sus cuerpos parentales lo que da lugar a la ocurrencia de recristalizaciones, cambios de texturas y de equilibrio químico entre sus componentes (Varela, 2015).

Estos meteoritos se caracterizan de forma general, por presentar una alta abundancia de cóndrulos con variadas texturas y composiciones minerales (principalmente silicatos y fragmentos de Fe metálico y sulfurado), además de matriz. La matriz generalmente es menos abundante que en los condritos carbonáceos, y los CAIs y AOA son muy raros. Los condritos

ordinarios muestran un amplio rango en el tipo petrológico, yendo desde 3 a 6, con varios miembros menos alterados (3.0 – 3.1) (Weisberg y otros, 2006). Debido a lo anterior, se distinguen dos tipos de condritos. Los condritos ordinarios no equilibrados, asociados con el tipo petrológico 3, donde los minerales conservan su composición química original y los constituyentes preservan sus formas iniciales. En cambio, los condritos ordinarios equilibrados, desarrollan un estado de equilibrio químico entre sus minerales, por lo que sus componentes pierden la forma original debido a los procesos de recristalización (Varela, 2015). Estos cambios se incrementan de acuerdo a la intensidad del evento térmico y, por ende, mayor será el tipo petrológico (desde el tipo 4 al 7).

2.3.1.1. Clasificación

Los condritos ordinarios incluyen tres grupos químicos: H (*high iron*), L (*low iron*) y LL (*very low iron*), en función de las variaciones en la composición aparente, como las razones moleculares de Fe en olivinos y piroxenos de bajo Ca y la proporción de Fe metálico respecto del Fe total (Vernazza y otros, 2015).

Según el trabajo de Vernazza y otros (2015), los condritos H tienen la mayor abundancia total de Fe (y la relación atómica Fe/Si más alta) entre los condritos ordinarios. Además, consisten en los condritos ordinarios más reducidos, ya que su hierro se encuentra principalmente en forma de metal. En el otro extremo, los condritos LL presentan el menor contenido de Fe total, correspondiente a la relación atómica Fe/Si más baja, y son los condritos ordinarios más oxidados, con baja cantidad de fase metálica y con silicatos que presentan los contenidos más altos de FeO cuando están equilibrados. La información anterior se resume en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4: Valores promedios de las propiedades de condritos ordinarios equilibrados. Fa = fayalita; Fs = forsterita; H = high iron; L = low iron; LL = very low iron. (Extraído de Vernezza y otros, 2015).

Propiedades	H	L	LL
Estadística de caídas	34	37	9
Fe (%peso)	28	22	19
Fe/Si (atómico)	0,81	0,57	0,52
Metal (% vol)	8,4	4,1	2
Contenido de Fa (% peso) de olivino	16-20	21-26	27-31
Contenido de Fs (% peso) de piroxeno	15-17	18-22	22-30
Ol/(Ol+Px)	51-60	60-67	70-82

La clasificación de Van Schmus y Wood (1967) también permite diferenciar los grupos H, L y LL mediante el contenido de fayalita (% molar) con la razón entre el contenido de Fe metálico y Fe total (Fe^0/Fe) (Figura 2.9).

Valenzuela (2003, con los datos de Keil y Fredriksson, 1964 y de Fredriksson y otros) describe otra distinción posible entre los grupos H, L y LL de condritos ordinarios, a partir de la distribución del hierro en metales y silicatos. La Tabla 2.5. muestra el peso promedio de las razones de hierro metálico y total de los tres grupos y los pesos de las razones de $FeO / (FeO + MgO)$. Se observa una variación inversa de un parámetro con respecto al otro, lo que hace que el contenido de hierro de olivinos y/u ortopiroxenos sea un excelente criterio de clasificación para los tipos 4 a 7 de condritos ordinarios (Figura 2.10).

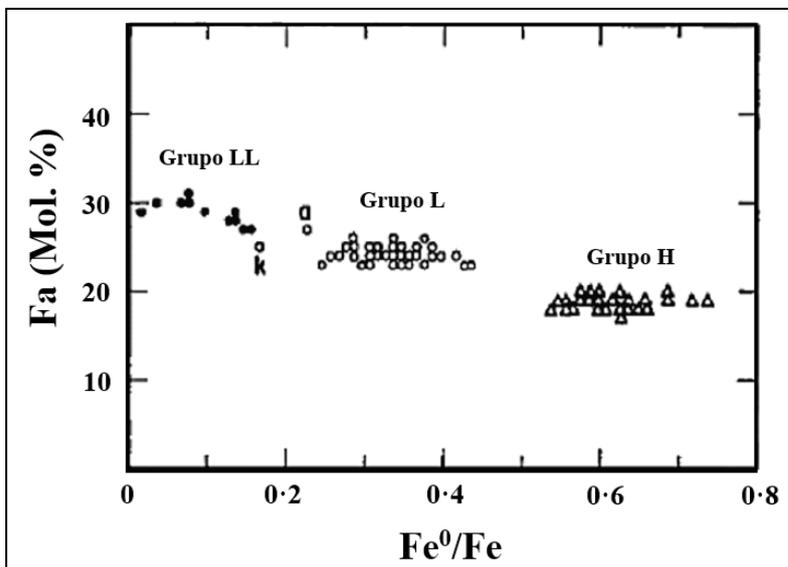


Figura 2.9: Razón fayalita (Fa) (% molar en olivinos) vs rangos de Fe^0/Fe para grupos H, L y LL de condritos ordinarios. (Modificado y extraído de Van Schumus y Wood, 1967).

Tabla 2.5: Valores en % peso promedio de las razones de hierro metálico y total de los tres grupos de condritos ordinarios y los pesos de las razones de $FeO / (FeO + MgO)$. (Extraído de Dodd, 1981 en Valenzuela, 2003).

Grupo Condrito Ordinario	Fe^0/Fe total (% peso)	$FeO / (FeO + MgO)$ (% peso)
H	0,6	0,29
L	0,3	0,37
LL	0,1	0,43

Considerando su composición mineralógica se infiere que los condritos ordinarios fueron formados en un ambiente de condiciones redox intermedias (Varela, 2015), lo que además queda de manifiesto al compararlos con otros grupos de condritos como se ilustra en la Figura 2.11.

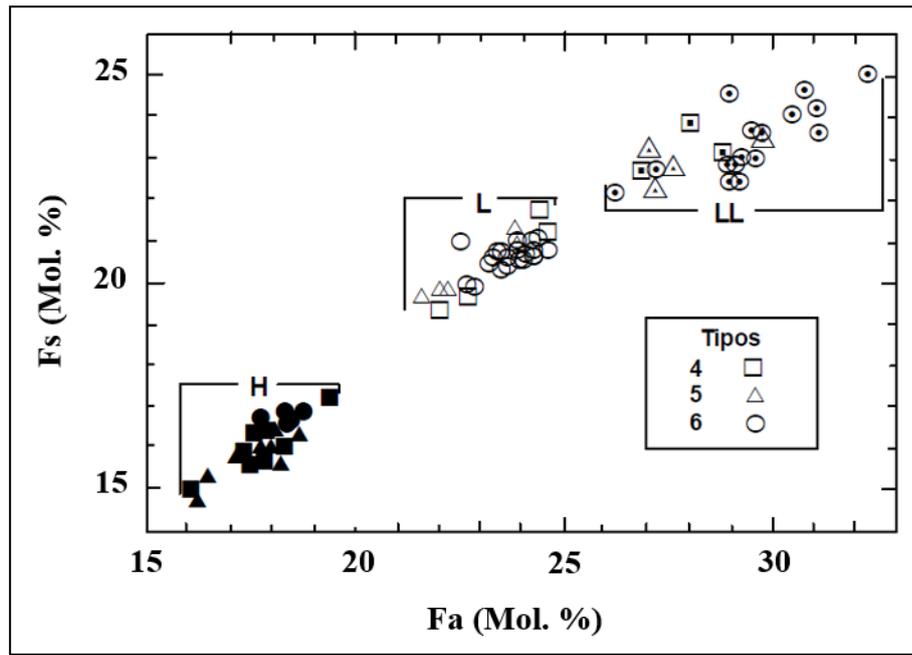


Figura 2.10: Contenidos de hierro, expresados como % molar de Fe_2SiO_4 (Fayalita = Fa) y $FeSiO_3$ (Ferrosilita = Fs) del olivino y piroxeno bajo en Ca respectivamente, en condritos ordinarios equilibrados. (Datos de Keil y Fredriksson, 1964 y de Fredriksson y otros, 1968 en Valenzuela, 2003).

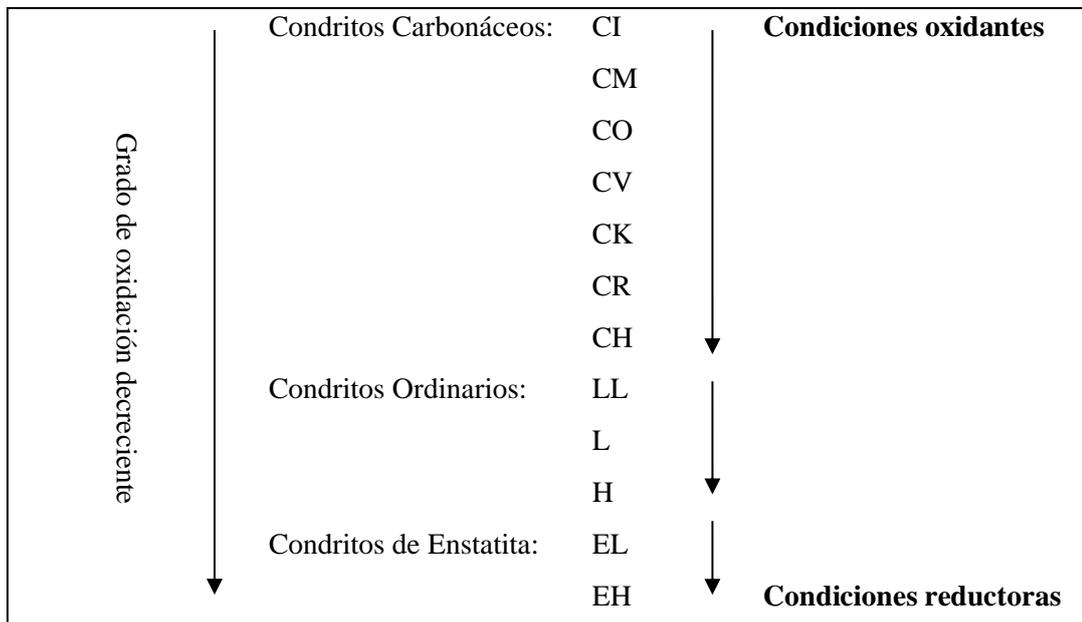


Figura 2.11: Condiciones redox de los meteoritos condriticos. Extraído de Varela (2015).

2.3.1.2. Mineralogía y componentes principales

A grandes rasgos, los meteoritos están compuestos por los mismos minerales que se encuentran en la Tierra, a excepción de algunos como el Fe-Ni metálico que no es estable en las condiciones oxidantes de la superficie terrestre (Varela, 2015).

Van Schmus (1969), entrega información cuantitativa con respecto a la abundancia aproximada de los principales minerales que ocurren en condritos recristalizados, lo cual se resume en la Tabla 2.6. La fase más abundante en los condritos ordinarios, independiente del grupo químico, corresponde al olivino. La abundancia de este mineral aumenta desde los condritos ordinarios H hasta los condritos ordinarios LL. El ortopiroxeno (piroxeno bajo en Ca) corresponde a la segunda fase más común. Sus abundancias promedio disminuyen en este caso, desde los condritos ordinarios H hasta los LL. La plagioclasa, el piroxeno alto en Ca, la troilita (FeS) y el metal (aleación de Fe-Ni) comprenden la mineralogía restante, además de óxidos como cromita y fosfatos como cloroapatito y whitlockita.

Con respecto a la plagioclasa, se debe entender que, en los condritos ordinarios, el feldespato está presente en los cóndrulos como mineralogía primaria, correspondiendo a una fase ígnea, y, además, como una fase secundaria, que resulta de la recristalización de vidrio (conocido como mesostasis) de los cóndrulos, durante el metamorfismo termal (Lewis y otros, 2022).

Con respecto al contenido de forsterita-fayalita en olivinos y enstatita-ferrosilita en ortopiroxenos, Van Schmus (1969) entrega esta información para condritos ordinarios la cual se resume en la Tabla 2.7. Se observa que los olivinos del grupo H son más enriquecidos en Mg que los del grupo L, siendo los del grupo LL lo más empobrecidos en Mg. Lo mismo ocurre con el ortopiroxeno.

Los condritos ordinarios presentan como componentes principales cóndrulos, matriz y metales (aleación Fe-Ni) junto a troilita (Varela, 2015). Los cóndrulos, formados a partir de un veloz calentamiento y posterior rápido enfriamiento en las etapas tempranas de formación del Sistema Solar (Wasson, 1993), son los componentes más abundantes de los condritos, comprendiendo cerca de un 80% de volumen de condritos ordinarios y de enstatita, y >15% volumen de la mayoría del resto de grupos de condritos, excepto para grupo CI, en los cuales los cóndrulos están ausentes (los condritos CI corresponden a brechas de regolito formadas por una intensa brechización ocurrida en su cuerpo parental). La mayoría corresponden a esferas ígneas, de tamaños submilimétricos, compuestas predominantemente por material silicatado ferromagnesiano (olivinos, piroxenos y vidrio feldespático) (Valenzuela, 2003).

Para los cóndrulos de condritos ordinarios, Gooding y Keil (1981) describen diferentes tipos de texturas, las cuales se enseñan brevemente a continuación:

- A. Olivino barrado: La estructura de este tipo de cóndrulos se manifiesta como uno o más conjuntos de cristales de olivino prismáticos fuertemente alargados que se presentan en orientación paralela y la mayoría de los cuales exhiben extinción coincidente bajo luz transmitida con polarización cruzada. El espacio entre las "barras" de olivino está lleno de mesostasis, similar en estructura y composición a la observada en los cóndrulos porfídicos ordinarios. Los cóndrulos de olivino barrado a veces contienen piroxeno. En la Figura 2.12 (a), se observa un ejemplo de este tipo de texturas.
- B. Cóndrulos porfídicos: Consisten en fenocristales de olivino y/o piroxeno con bajo contenido de Ca (ortopiroxeno) con cantidades accesorias de sulfuros y metal Ni-Fe suspendidos en una mesostasis de material vítreo a criptocristalino de composición feldespática. El desarrollo de fenocristales varía de euhedral a anhedral. En la Figura 2.12 (b), se observa un ejemplo de este tipo de texturas.
- C. Piroxeno radial: Consiste en conjuntos en forma de abanico de ortopiroxeno que irradian desde puntos que generalmente se encuentran cerca de las superficies de los cóndrulos (Figura 2.12 (c) y (d)). Secciones mutuamente ortogonales del mismo cóndrulo frecuentemente muestran que los elementos estructurales básicos son láminas o láminas delgadas. Además, casi siempre es identificable la mesostasis intersticial (menos abundante, pero por lo demás similar a la de los cóndrulos porfídicos).

Otros cóndrulos descritos, pero de menor abundancia son los granulares y criptocristalinos.

Tabla 2.6: Abundancias aproximadas (% peso) de los principales minerales en condritos recristalizados. (Extraído y modificado de Van Schmus, 1969).

Mineral	Composición mineral	Abundancia (% peso)		
		H	L	LL
Olivino	(Mg,Fe) ₂ SiO ₄	33-37	45-49	56-60
Ortopiroxeno	(Mg,Fe)SiO ₃	23-27	21-25	14-18
Piroxeno cálcico	Ca(Mg,Fe)Si ₂ O ₆	4-5	4-5	4-5
Feldespatos	Or ₁₋₆ An ₁₀₋₁₅ Ab ₈₁₋₈₈	9-10	9-10	9-10
Troilita	FeS	5-6	5-6	5-6
Cromita	FeCr ₂ O ₄	0.5	0.5	0.5
Whitlockita	Ca ₃ (PO ₄) ₂	0.6	0.6	0.6
Kamacita	(Fe,Ni) bajo Ni	15-17	6-8	1-2
Taenita	(Fe,Ni) alto Ni	2-3	2-3	2-4

Tabla 2.7: Composiciones minerales promedio en condritos recristalizados. Valores entregados en porcentaje molar normalizados al 100%. (Extraído y modificado de Van Schmus, 1969).

Grupo	Olivino		Ortopiroxeno		
	Fo	Fa	En	Fs	Wo
H	80.7	19.3	81.8	16.8	1.6
L	74.8	25.2	77.3	20.9	1.8
LL	68.7	31.3	72.6	25.2	2.2

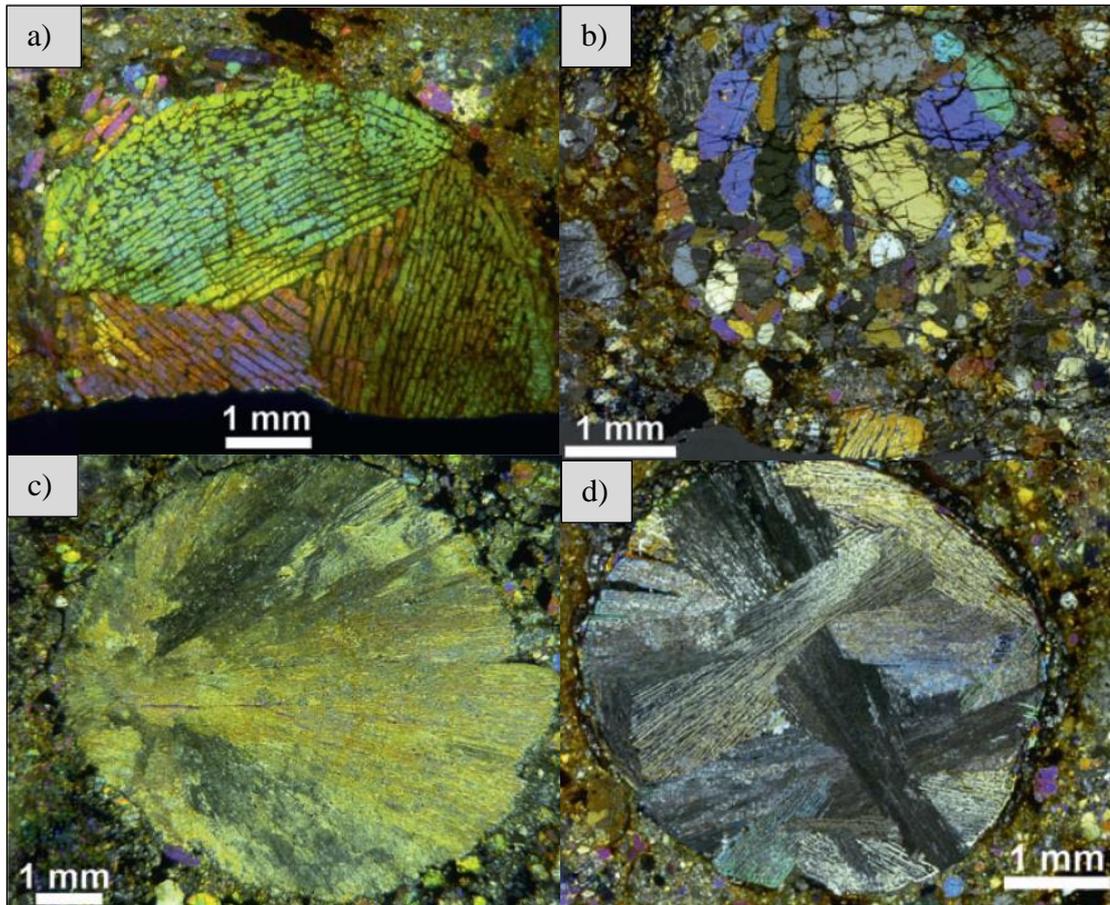


Figura 2.12: Ejemplos de características texturales en cóndrulos. a) Textura de olivino barrado, muestra barras de olivino elongadas y sub-paralelas. b) Textura porfídica en un cóndrulo de olivino y piroxenos. c) Textura de piroxeno radial. d) Cóndrulo multi-radial de piroxeno. Fotomicrografías es luz paralela, con nicóles cruzados. (Extraído de Weyrauch y Bischoff, 2012).

La matriz, según Scott y otros (1988 en Valenzuela 2003), corresponde a todo el material de grano fino, principalmente silicatado, intersticial a macroscópico, entero o fragmentado, como cóndrulos, inclusiones y granos de minerales aislados (silicatos, metales, sulfuros y óxidos). El tamaño de los granos debe ser $< 100 \mu\text{m}$. La matriz se distingue comúnmente de los otros componentes por su tamaño de grano, forma y textura (Scott y Krot, 2007). A medida que aumenta el tipo petrológico de 3 a 7, la matriz sufre recristalización por el aumento de la temperatura y los cóndrulos pierden sus bordes hasta el punto en que desaparecen o solo quedan relictos de ellos. En este caso la división matriz - cóndrulo es difícil de establecer. En cuanto a

su composición, corresponde a una mezcla minerales, entre los que se pueden encontrar los silicatos, óxidos, sulfuros y Fe - Ni metálico. Además, por su pequeño tamaño es muy susceptible a procesos de alteración secundaria (Varela, 2015).

El Fe-Ni metálico en los condritos ordinarios, se compone por aleaciones de Fe-Ni como kamacita y taenita. Este componente generalmente se encuentra como pequeñas gotas en la matriz y alrededor o dentro de los cóndrulos. También es observado en forma de cristales anhedrales, en intercrecimiento con otros minerales o como exsolución de kamacita-taenita, lo que se conoce como textura tipo plesita (Figura 2.13 (a)). Pocos condritos preservan bien la historia de formación de sus componentes metálicos por las subsecuentes reacciones de baja temperatura que comúnmente forman óxidos y sulfuros, y el metamorfismo termal que permite que la kamacita se exsuelva de la taenita (Scott y Krot, 2007).

La troilita (Figura 2.13 (b)) es un sulfuro de Fe común en los condritos ordinarios que se encuentra como pequeñas gotas en los cóndrulos o la matriz, como cristales anhedrales aislados o en intercrecimientos con kamacita y/o taenita. Como producto de la acción del metamorfismo termal, en los tipos petrológicos del 4 al 6, el contorno del Fe-Ni metálico y el sulfuro de Fe es modificado progresivamente a formas ameboidales, lo cual hace que no se pueda determinar su origen como cóndrulo o como clasto (Hutchison, 2004).

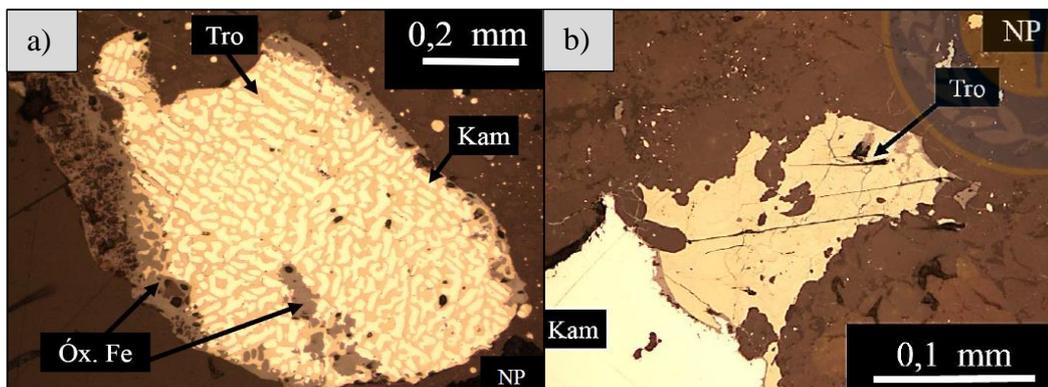


Figura 2.13: Kamacita y troilita. a) Ejemplo de textura tipo plesita (entre kamacita (gris claro) y troilita (amarillento)). b) Cristales de kamacita y troilita. Kam = Kamacita, Tro = Troilita. (Extraído de Ulloa, 2017).

Otro componente que puede estar presente en los condritos ordinarios corresponde a la costa de fusión, la cual se desarrolla durante el paso de los meteoritos a través de la atmósfera. La mayoría de las cortezas de fusión de condritos presentan textura porfídica y su composición está dominada por olivino, vidrio y magnetita accesoria. Pese a que las composiciones de las

costras derretidas son similares a las del meteorito que las contienen, existen diferencias que sugieren la existencia de tres procesos que controlan su evolución química: (1) la pérdida y reacción de líquidos ricos en Fe inmiscibles, (2) la mezcla entre fundidos parciales del sustrato y fundidos de la corteza, y (3) la pérdida de componentes volátiles por evaporación y desgasificación, lo cual se evidencia en las abundantes vesículas presentes en la costra (Genge y Grady, 1999).

2.3.1.3. Metamorfismo y estado de choque

El metamorfismo de choque y la brechización de los meteoritos son el resultado de colisiones a altas velocidades en los cuerpos parentales. Estos impactos afectan propiedades de los meteoritos como la abundancia y distribución de los gases nobles y elementos traza (particularmente los elementos volátiles), las edades radiométricas y otras características físicas. El estudio del metamorfismo de choque es una fuente de información sobre la historia geológica y colisional de los cuerpos parentales de los meteoritos (Stöffler y otros, 1991). Por lo anterior, es necesario entender los cambios físico - químicos asociados a los impactos, cuyas principales señales quedan evidenciadas en los minerales que constituyen el meteorito.

Stöffler y otros (1991) proponen una clasificación de choque para meteoritos que categoriza el grado de metamorfismo de choque en 6 estados progresivos (desde S1 y S6), cuyos criterios de definición se resumen en la Tabla 2.8. Este esquema se basa principalmente en las señales de choque que ocurren principalmente en olivino y plagioclasa (vidrio).

La clasificación anterior establece, además, que los minerales opacos no son indicadores absolutos de choque debido a que sus efectos son observados en un amplio rango de presiones, por lo que no son considerados en el estudio de Stöffler y otros (1991). Bennett y McSween (1996) sin embargo, realizan un análisis más detallado del comportamiento de los minerales opacos al ser sometidos a las ondas de choque. Para ello analizan y establecen los tipos de transformaciones que sufren estos minerales y los asocian a rangos de presión determinados, como es posible observar en la Figura 2.14.

Aparte de las deformaciones sufridas en los componentes de los condritos, existen características inducidas por el choque en la textura final de estos meteoritos. Dentro de estas, se encuentran las venas de fundido (melt veins), venas de choque (shock veins), gotas de

fundido (melt droplets), bolsones de fundido (melt pockets) y la textura tipo plesita entre kamacita y troilita (Tomkins y otros, 2013).

Tabla 2.8: Resumen de los criterios empleados para establecer el estado de choque de un condrito ordinario (Extraído y modificado de Stöffler y otros, 1991).

Estado de choque	Efectos por equilibrio del peak de presión		Efectos resultantes de excursiones locales de P-T	P de choque (GPa)	Incremento de T post choque (°C)	Incremento de T min estimada (°C)
	Olivino	Plagioclasa				
S1 No choqueado	Extinción recta, fracturas irregulares		Ninguno	< 4-5	10-20	10
S2 Choqueado muy débilmente	Extinción ondulosa, fracturas irregulares		Ninguno	5-10	20-50	20
S3 Choqueado débilmente	Fracturas planares, extinción ondulosa, fracturas irregulares	Extinción ondulosa	Venas opacas de choque, formación incipiente de bolsones fundidos, en ocasiones interconectados	15-20	100-150	100
S4 Choqueado moderadamente	Mosaiquismo (débil), fracturas planares	Extinción ondulosa, parcialmente isotrópica, características de deformación planar	Bolsones de fundido, venas de fundido interconectadas, venas opacas de choque	30-35	250-350	300
S5 Choqueado fuertemente	Mosaiquismo (fuerte), fracturas planares + características de deformación planar	Maskelenita (transformación en estado sólido de la plagioclasa en vidrio)	Formación pervasiva de bolsones fundidos, venas y diques de opacos, venas opacas de choque	45-55	600-850	600
S6 Choqueado muy fuertemente	Restringido a regiones locales en o cerca de zonas fundidas		Mismas características de estado S5	75-90	1500-1750	1500
	Recristalización en estado sólido	Fundido por choque (vidrio normal)				
Fundido por choque	Fusión total de la roca (roca de fusión por impacto y brecha fundida)					

Las venas de fundido se forman por la fusión de material del condrito que se inyecta en fracturas, las que pueden ser grietas preexistentes en el meteorito o haberse formado por impacto. El fundido resultante que rellena la vena depende de las fases involucradas en el proceso de fusión, por lo que puede ser un fundido de Fe-Ni metálico, troilita, vidrio silicatado o una mezcla de los 3 anteriores. Cuando se da este último caso es común ver una matriz de vidrio silicatado con gotas de Fe-Ni metálico y/o troilita en su interior debido a que estos componentes son inmiscibles (Tomkins y otros, 2013).

Las venas varían ampliamente en ancho, extensión y composición. Existen venas muy finas, cuyo ancho es de pocos μm y suelen ser de poca longitud, con una forma rectilínea comúnmente conectadas. A estas finas venillas se les conoce como venas de choque (Stöffler y otros, 1991). Otras venas ocurren en formas más anchas, que llegan hasta los 30 μm y que tienen una mayor extensión, presentándose ramificadas y a veces interconectadas con bolsones de fundido. Estas pueden estar compuestas por Fe-Ni metálico, troilita o una mezcla de ambos. Existen tipos de venas más desarrolladas, que alcanzan tamaños $>100 \mu\text{m}$, de formas irregulares y más sinuosas.

Características de choque		S1	S2	S3	S4	S5	S6
	Perfil de Ni normal en taenita	██████████				██████████	
	Perfil de Ni distorsionado en taenita	██████████				██████████	
	Kamacita policristalina				██████████	██████████	
	Troilita con burbujas		██████████			██████████	
	Troilita policristalina			██████████		██████████	
	Troilita fracturada				██████████	██████████	
	Plesita		██████████	475		██████████	525 600
	Gotas de fundido de metal Fe-Ni y sulfuros				██████████	██████████	
	Venas de fundido polimineral				██████████	██████████	

Figura 2.14: Resumen del tipo y abundancia relativa de las características de choque que componen la clasificación en base a los mineralos opacos de Bennett y McSween (1996). Barras blancas = características raras (observadas en $<10\%$ de todos los granos opacos), barras negras = características abundantes (vistas en $>50\%$ de todos los granos opacos). Los números en las barras de la plesita indican el aumento de temperatura mínimo luego de ocurrido el choque, estas temperaturas fueron registradas por los minerales de kamacita y taenita que componen la plesita. S1 a S6 corresponden a los estados de choque definidos por Stöffler y otros (1991). Figura modificada de Bennett y McSween (1996).

En su interior están compuestas por un fundido que resulta de la mezcla de vidrio silicatado, Fe-Ni metálico y troilita. Asimismo, pueden contener fragmentos o granos de material sin fundir. Las gotas de fundido son generalmente micrométricas y están compuestas de Fe-Ni metálico, troilita o una mezcla de ambas fases minerales. Estas gotas pueden encontrarse dentro de cantidades variables de fundido de composición silicatada formando una estructura que en su conjunto se conoce como bolsones de fundido. Estos tienen formas irregulares de bordes redondeados y tamaños variables (Tomkins y otros, 2013).

La plesita, por definición, es una mezcla entre kamacita y taenita que se forma a partir de la descomposición de la taenita cuando los meteoritos se enfrían luego de alcanzar altas temperaturas (Goldstein y Michael, 2006)

2.3.1.4. Procesos de meteorización terrestre

Cuando los meteoritos alcanzan la superficie de la Tierra, son expuestos a un rango de agentes potenciales de meteorización como el agua, aire rico en oxígeno, sales, viento y variaciones de temperatura. Otros factores, incluyendo la composición y porosidad inicial de los meteoritos y de las rocas y/o suelos en los que caen, pueden influenciar también los mecanismos y tasas de meteorización. Estas van a depender además en la historia climática desde el momento de la caída. Este proceso es conocido como meteorización terrestre y afectará principalmente a aquellos minerales con hierro, los que se transformarán principalmente en óxidos e hidróxidos de Fe (Valenzuela, 2011). Valenzuela (2011), determina que algunos productos de alteración para meteoritos del Desierto de Atacama, incluyen goethita (α -FeO(OH)), magnetita (Fe_3O_4), maghemita (Fe_2O_3), ferrihidrita ($\text{Fe}_{10}\text{O}_{14}(\text{OH})_2$), lepidocrocita (γ -FeO(OH)) y principalmente akagaenita ($(\text{Fe}, \text{Ni})_8(\text{OH}, \text{O})_{16}\text{Cl}_{1.25} \cdot n\text{H}_2\text{O}$).

Wlotzka (1993, en Ulloa 2017) estableció una escala para medir el grado de meteorización terrestre en secciones pulidas, cuyos parámetros se muestran en la Tabla 2.9. La escala se divide en 6 estados progresivos, desde W1 a W6, donde se asocia cada estado al porcentaje de minerales con contenido de Fe (Fe-Ni metálico, troilita, olivino y piroxeno) que son afectados por meteorización.

Tabla 2.9: Grado de meteorización terrestre W (Wlotzka, 1993). Tomado de Ulloa (2017).

Grado de meteorización	Características
W0	Mancha de limonitas
W1	Anillos menores de oxidación en los minerales opacos
W2	Oxidación moderada del Fe-Ni metálico (20-60% de reemplazo)
W3	Oxidación severa del Fe-Ni metálico y troilita (60-95% de reemplazo)
W4	Oxidación completa de las fases opacas pero silicatos sin óxidos
W5	Inicio de la alteración de los silicatos máficos
W6	Reemplazo masivo de silicatos por arcillas y óxidos

La meteorización afecta al meteorito desde su superficie hacia adentro, por lo cual los minerales exteriores pueden evidenciar un mayor grado de meteorización que aquellos que se encuentran en el interior. Valenzuela (2011), propone que la meteorización de los condritos ordinarios se desarrolla en diferentes dominios dentro del meteorito. El primer dominio es el de venillas de minerales opacos, que puede estar asociado tanto a las venillas originadas por la acción de metamorfismo de choque como aquellas desarrolladas posteriormente a la caída del meteorito por relleno de fracturas preexistentes con productos de alteración. El segundo dominio se relaciona con la formación de halos alrededor de los granos de Fe-Ni metálico, y el tercero es el dominio intramineral que ocurre principalmente en los granos de troilita.

3. METODOLOGÍA Y ANÁLISIS QEMSCAN

3.1. Fundamentos de la técnica

El primer trabajo realizado en Chile con el fin de clasificar químicamente meteoritos, fue realizado por Valenzuela (2003). En este trabajo, se utilizó la técnica de espectroscopía de emisión atómica de plasma acoplado por inducción (ICP-AES, del inglés *Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy*), el cual es un método utilizado para determinar de manera muy precisa la composición elemental de las muestras, sin embargo, lo desfavorable, es que ocurre la pulverización de ellas.

En el último tiempo, se ha utilizado microsonda electrónica (EPMA) para realizar estos análisis. Se trata de una moderna técnica, de gran precisión y sensibilidad, no destructiva de análisis elemental muy valiosa en mineralogía y petrología, la cual permite el análisis químico cualitativo y cuantitativo de sustancias sólidas a escala micrométrica (Castellanos y Ríos, 2005), por lo que es muy adecuada para cumplir con el objetivo de clasificar meteoritos.

En este trabajo, se utilizó para llevar a cabo la clasificación de meteoritos, la herramienta conocida como QEMSCAN® (del inglés, *Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electron Microscopy*). Esta técnica es capaz de proporcionar análisis químicos elementales y mineralógicos, además de mapas mineralógicos en falso color que son de gran ayuda al momento de analizar texturas, entre otras capacidades.

QEMSCAN, consiste en un microscopio electrónico de barrido que ha sido modificado, tanto en hardware como en software, para realizar la identificación y cuantificación automatizada de rangos de definiciones elementales, que pueden ser asociados a fases sólidas inorgánicas, como minerales, aleaciones, entre otros. Al igual que un microscopio electrónico tradicional, QEMSCAN se compone de: (1) una fuente de emisión de electrones, (2) bombas rotatorias, turbos e iónicas para generar el vacío necesario que da lugar a las condiciones necesarios de emisión de un haz de electrones, (3) una columna de lentes electromagnéticos para canalizar, concentrar y dirigir el haz de electrones hacia el espécimen analizado, (4) una cámara (donde se realizará la interacción de los electrones con el espécimen), (5) detectores para las diferentes emisiones generadas durante la interacción electrón-espécimen (detector de electrones secundarios, detector de electrones retrodispersados y detectores de rayos X), (6) procesadores de pulso (para amplificación y digitalización de las señales recibidas en los detectores) y (7) computadores para el procesamiento de las señales digitales.

La identificación, mapeo de distribución 2D y cuantificación de fases inorgánicas, se realiza mediante la combinación de las emisiones de electrones retro-dispersados (BSE) y rayos X de la siguiente manera: la imagen BSE que primero se genera, está formada por los electrones del haz original que inciden en la muestra y que, debido al tipo de interacción al que son sometidos, cambian su dirección de trayectoria, logran escapar del espécimen y son captados por el detector de electrones retrodispersados (ubicado inmediatamente sobre la platina). Es una imagen en tonos de grises que puede entregar información composicional, topográfica, cristalográfica y del espesor de masa del espécimen (Goldstein y otros, 2018). En esta imagen, los puntos de análisis cuyo número atómico promedio es alto, se verán de un tono gris claro a blanco, mientras que los puntos en donde estén presentes elementos livianos, se verán en tonos gris oscuro a negro.

Los rayos X se producen cuando un electrón del haz colisiona con un electrón de un átomo del espécimen generando una vacancia orbital. Los rayos X corresponden al exceso de energía del que debe deshacerse otro electrón del espécimen para llenar esa vacancia en una orbital de menor energía. La energía de los rayos X generados conforma un espectro de “peaks” característicos, donde la energía dispersa generada por cada elemento es conocida. Estas emisiones son fundamentales para el análisis QEMSCAN, dado que su mecanismo de reconocimiento se basa en la obtención automatizada de espectros EDS (energía dispersada proveniente de rayos X) en cientos de miles o millones de puntos (píxeles) de análisis recolectados cada uno en un tiempo del orden de milisegundos. La clasificación de fases mineralógicas se realiza mediante el reconocimiento de cada espectro EDS con respecto a una lista composicional jerárquica y descendente conocida como “Lista SIP” (del inglés, *Species Identification Protocol*) (Goldstein y otros, 2018), la cual incluye las propiedades físicas, como la densidad, y químicas específicas de cada fase mineral, dentro del software iDiscover (paquete del software QEMSCAN).

Como resultado final, se obtiene una imagen pixelada, en 2D y en falso color, de un espécimen o muestra representativa de partículas, en donde cada pixel conserva su información elemental y de brillo (BSE), lo que permite el posterior procesamiento de datos *offline* reiterativo (Goldstein y otros, 2018).

3.2. Reclasificación estadística de píxeles

El trabajo fue llevado a cabo en el equipo QEMSCAN del Instituto de Geología Económica Aplicada (GEA) de la Universidad de Concepción. Dicho equipo, cuenta con listas de identificación de minerales propias para depósitos de tipo cupríferos o asociados, y, por lo tanto, fue necesario crear una lista mineral o SIP que permitiera identificar fases minerales propias de condritos ordinarios, como metales de Fe-Ni (kamacita-taenita), sulfuros de Fe (troilita) y otras que pese a estar presentes en la Tierra, debieron ser ajustadas.

Para la realización de la Lista SIP, se leyeron las muestras utilizando QEMSCAN a través del modo analítico Field Scan (FS), cuyo mecanismo se resume en la Figura 3.1. El modo Field Scan, captura una imagen petrográfica completa de cada campo de una muestra. Se recopiló, además, un espectro químico en un intervalo establecido dentro del campo de visión. Luego, cada campo de visión se procesa computacionalmente para generar una única imagen integrada y se produce una imagen en falso color de la muestra completa. Los datos que se pueden obtener son:

- Proporción modal de fases
- Comportamiento y aporte de cada uno de los elementos
- Tamaño de grano estimado y parámetros de texturas

El análisis estadístico para la elaboración de la lista SIP se hizo en base a la muestra CAT-M5, lo cual se extrapola al resto de las muestras con buenos resultados (la cantidad de fases minerales no clasificadas fue menor a 2% en ambas muestras trabajadas). El corte pulido de la muestra CAT-M5 analizado por QEMSCAN cuenta con más de dos millones de píxeles, que incluyen información de espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDS), cantidad de electrones retrodispersados (BSE) y composición elemental, tanto en “intensidad de peak” (EDS) como en química. Este primer análisis se hizo con una lista SIP incluida en el equipo utilizado, la cual contiene fases propias de sistemas magmático-hidrotermales. Estos resultados debieron ser reclasificados utilizando técnicas estadísticas llevadas a cabo en el software RStudio. El rendimiento de esta herramienta, sin embargo, está limitado por la memoria RAM del ordenador que se utiliza, y a pesar de que el Instituto GEA cuenta con equipos de alta capacidad, el número de datos es excesivo y puede limitar el trabajo eficiente, por lo que seleccionaron aleatoriamente secciones representativas de la muestra y sus datos fueron exportados en formato CSV, con el fin de ser ingresados a RStudio. En dicho software se realiza el análisis estadístico cuya data base inicial cuenta

con un total de 2071707 píxeles y 134 variables. Esta data base debió ser filtrada para considerar solamente las variables de interés, que corresponden a las señales BSE y a las señales de “intensidad de peak” para cada píxel. Lo anterior resulta en una nueva data base que contiene 28 variables: BSE, y la “intensidad de peak” de los siguientes elementos: C, O, F, Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Ag, Sn, Sb, Ce y Pb, no considerando los datos de composiciones químicas asociadas a estos elementos, debido a que para llegar a estos valores, se hace una transformación desde el dato en intensidad de peak hacia composición química, por lo que sería más preciso trabajar con el dato que directamente entrega QEMSCAN. Se consideraron estos 27 elementos debido a que son los que presentan información asociada a cada píxel.

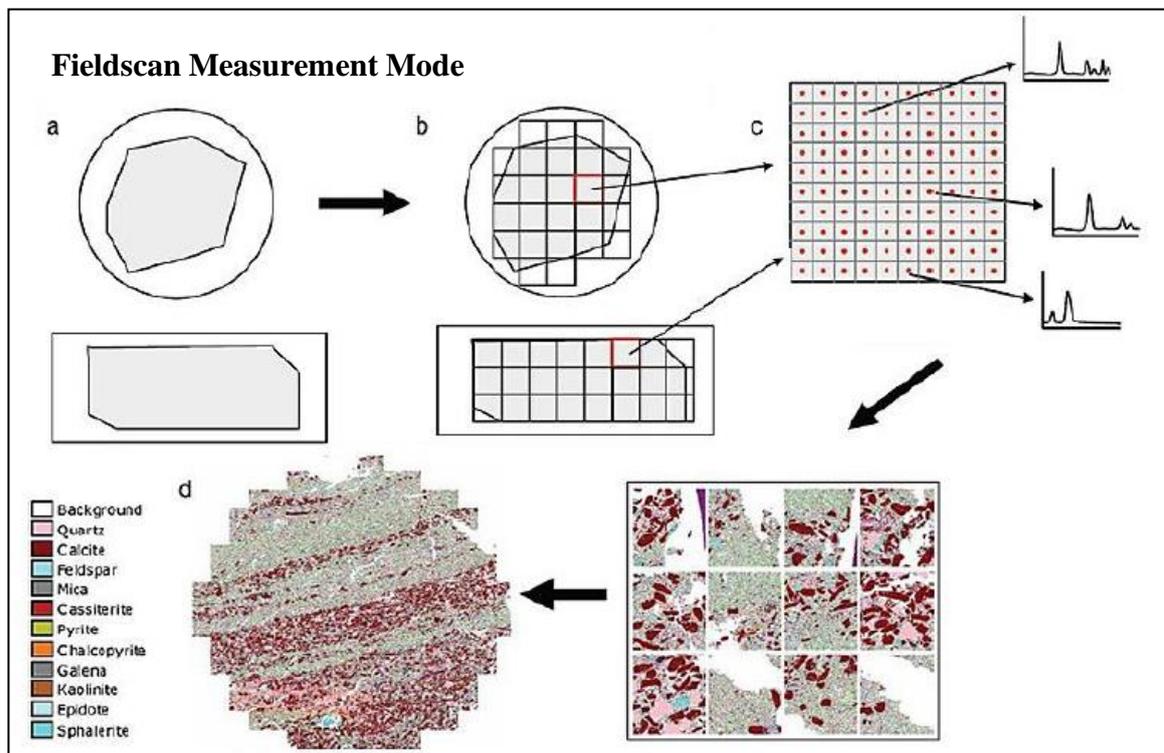


Figura 3.1: Ejemplo del proceso operativo de la generación de imágenes en el modo Field Scan. El proceso se detalla a continuación. a) El área completa de la muestra es examinada. b) El área de la muestra es separada en campos predefinidos. c) Cada campo es dividido en una cuadrícula predefinida de píxeles, cada uno con un análisis puntual de rayos X; los espectros de rayos X adquiridos se comparan con una base de datos (SIP) para permitir la asignación de mineralogía y química. d) Un mapa de falso color es creado para cada campo. Cada color representa un mineral o un grupo de minerales. (Extraído y modificado de Pirrie y Rollinson, 2011).

Lo fundamental del análisis estadístico consiste en encontrar similitudes entre los 2071707 píxeles, con el fin de definir potenciales fases minerales. Lo anterior fue abordado utilizando un algoritmo de agrupamiento o clusterización, que se basa en encontrar similitudes o cercanías entre las variables, en este caso, rangos de “intensidad de peak” de

los 27 elementos químicos y de la señal BSE, definidos como vectores para su procesamiento.

La cantidad de clústeres debió definirse, por lo tanto, se buscaron herramientas estadísticas que lo permitieran. En primer lugar, se realizó una matriz de correlaciones (Figura 3.2) generada con la librería *corrplot*, la cual muestra que los elementos presentan algún grado de relación (positivo o negativo), además de que no existen errores en los datos, por lo que todos los datos fueron considerados para el análisis de componentes principales (PCA: del inglés, *Principal Component Analysis*).

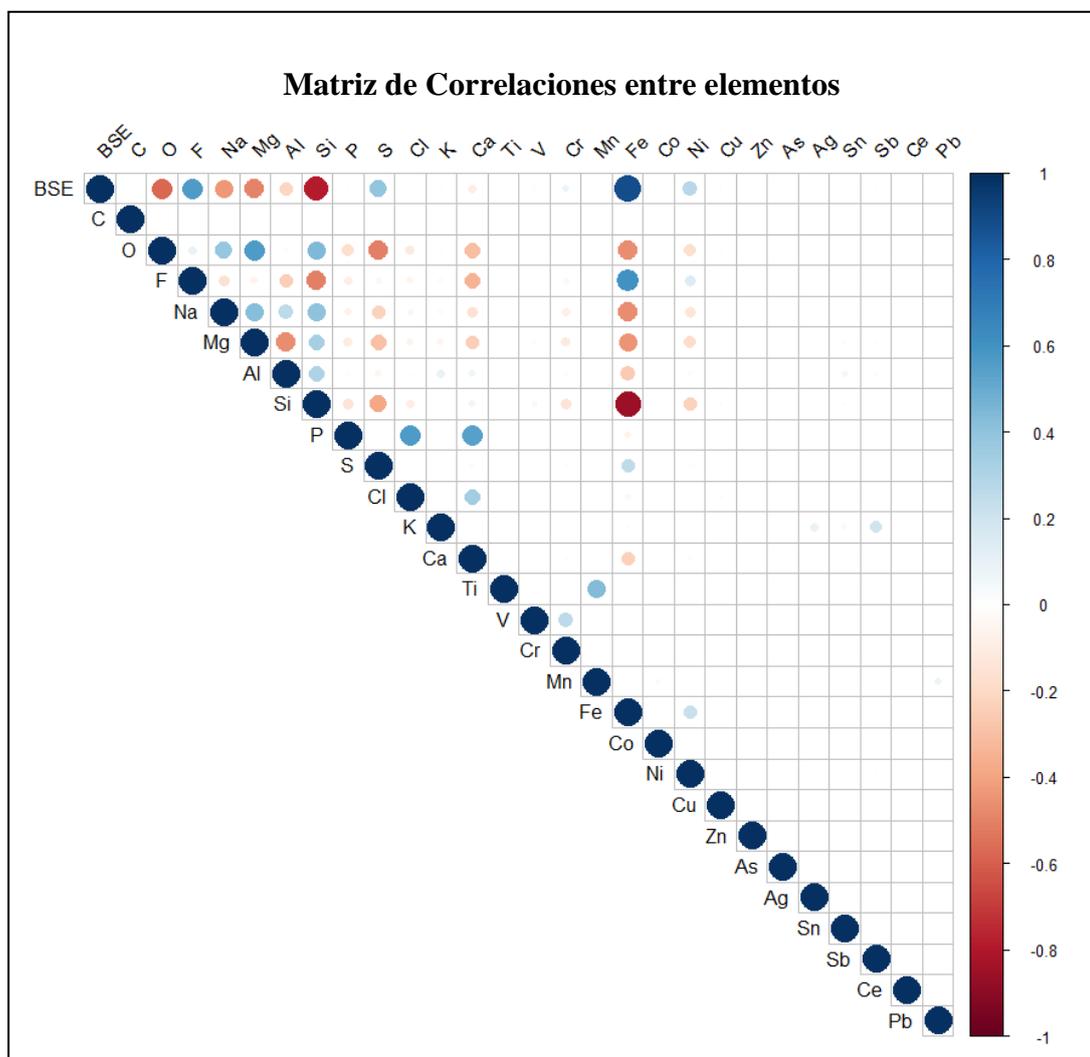


Figura 3.2: Matriz de correlaciones entre variables definidas. Se observan correlaciones fuertes positivas entre BSE y Fe; O y Mg; Si y O, Na, Mg y Al; y P, Ca y Cl principalmente.

El PCA es una técnica estadística de síntesis de la información, que pretende dar una estructura a la información contenida en una matriz de datos. El procedimiento consiste en homologar dicha matriz a un espacio vectorial tratando de encontrar en él unos ejes o

dimensiones que, siendo combinación lineal de las variables introducidas, (1) no pierdan la información inicial al conservar la varianza total, (2) no tengan correlación entre ellos, esto es, sean linealmente independientes, lo que asegura la estructuración de las variables iniciales y (3) tengan una importancia diferencial y conocida en la explicación de la varianza total. Cumplidas estas exigencias, el objetivo básico consiste en reducir el número de variables introducidas. Para ello se toman como nuevas variables los ejes o componentes hallados, eligiendo un número suficiente para que la pérdida de varianza total sea solo la conveniente, cumpliendo así con las finalidades del método, es decir, simplificar, reducir y estructurar la información inicial (Lozares y López, 1991). Por otra parte, el método “*Elbow*” calcula la varianza total intra-clúster en función del número de clústeres y escoge como óptimo aquel valor a partir del cual añadir más clústeres apenas significa mejoría, dado por el codo de la curva, como se observa en la Figura 3.3. El “*elbow point*” corresponde a 8 y explica un 51% de varianza acumulada, mientras que el máximo de número de clústeres permitido para considerar es de 20, explicando un 91% de varianza acumulada, como se observa en la Tabla 3.1. A continuación, la agrupación de datos fue llevada a cabo con la función *k-means*, siendo $k=8$, el número de clústeres a utilizarse, pese a que solamente explica un 51% de varianza acumulada, puesto que facilita al análisis trabajar con un menor número de fases.

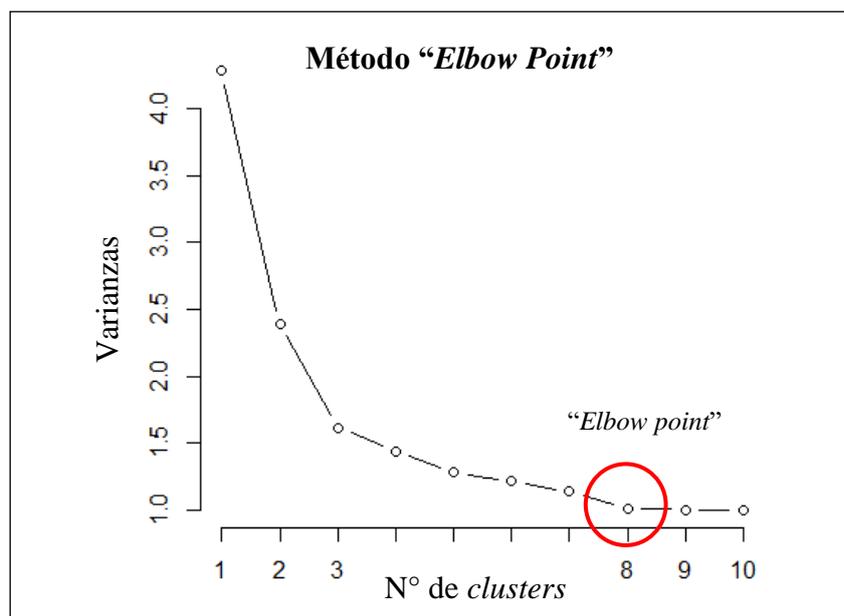


Figura 3.3: Gráfica “*Elbow point*”. En $k=8$ ocurre el quiebre de la línea, es decir que en sólo 8 *clusters* se podría agrupar la mayoría de la información. En $k=10$ o superior la línea de tendencia se torna horizontal, por lo que en este punto estarían ya cubiertos la gran mayoría de los píxeles.

Tabla 3.1: Sumario de estadísticos que permiten discriminar el número de clústeres a definirse. $k=8$ explica un 51% de varianza acumulada. DE= desviación estándar, PV= proporción de varianza, PA= proporción de varianza acumulada.

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8
DE	2.0703	1.54575	1.27025	1.19710	1.12976	1.10256	1.06468	1.00233
PV	0.1531	0.08533	0.05763	0.05118	0.04558	0.04342	0.04048	0.03588
PA	0.1531	0.23842	0.29604	0.34722	0.39281	0.43622	0.47671	0.51259
	PC9	PC10	PC11	PC12	PC13	PC14	PC15	PC16
DE	1.00006	1.00003	1.00002	1.00000	1.00000	0.99999	0.99990	0.99819
PV	0.03572	0.03572	0.03572	0.03571	0.03571	0.03571	0.03571	0.03559
PA	0.54831	0.58402	0.61974	0.65545	0.69117	0.72688	0.76259	0.79817
	PC17	PC18	PC19	PC20	PC21	PC22	PC23	PC24
DE	0.95644	0.90530	0.88078	0.85920	0.75295	0.73989	0.65285	0.5773
PV	0.03267	0.02927	0.02771	0.02637	0.02025	0.01955	0.01522	0.0119
PA	0.83084	0.86011	0.88782	0.91419	0.93443	0.95398	0.96921	0.9811
	PC25	PC26	PC27	PC28				
DE	0.50712	0.3994	0.31152	0.12340				
PV	0.00918	0.0057	0.00347	0.00054				
PA	0.99029	0.9960	0.99946	1.00000				

Antes de incluir directamente estos 8 clústeres en el archivo SIP a modificar, es necesario observar si todos ellos son diferentes, o bien, si existen suficientes similitudes entre algunos, con el fin de fusionarlos y dar mayor precisión a la información de entrada. Por lo tanto, y considerando los electrones retrodispersados (BSE) como el criterio más confiable por su presencia en todos los píxeles, se creó un diagrama de caja que permitiera observar posibles similitudes en la mediana de algunos clústeres (Figura 3.4). El resultado demuestra que la mediana de la señal de BSE es diferente para los 8 clústeres, entendiéndose cada uno como una fase mineral diferente.

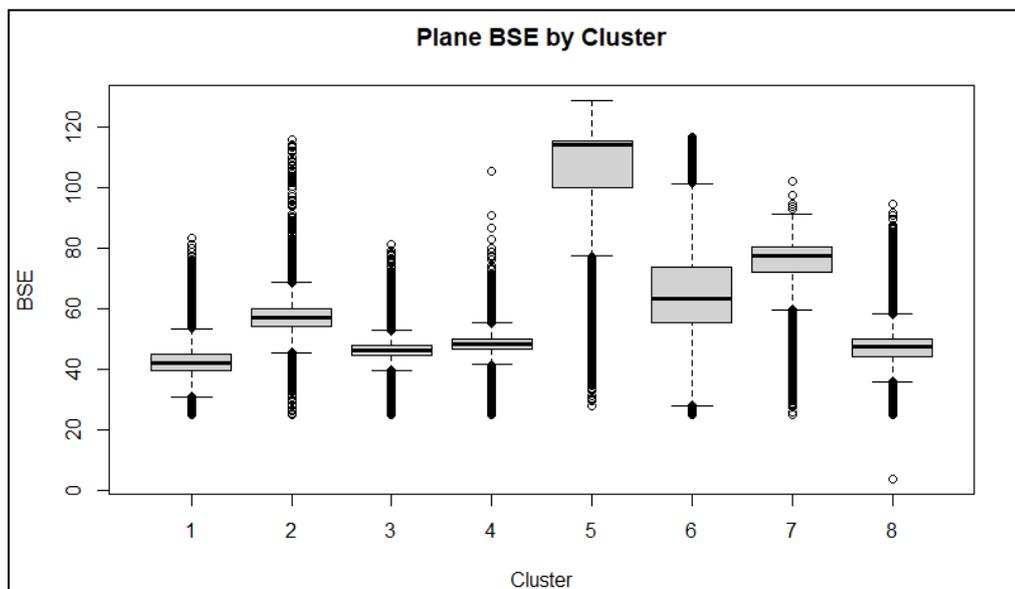


Figura 3.4.: Diagrama de bigotes o box plot de acuerdo con el rango de electrones retrodispersados (BSE) para los 8 clusters definidos mediante análisis estadístico en RStudio. Se observa que no existen similitudes entre medianas.

Además, con RStudio fue posible obtener un resumen de estadísticos que se utilizaron en la reclasificación realizada con iDiscover.

3.3. Reclasificación en iDiscover

Una vez determinado el número de clústeres en el subcapítulo anterior, en primer lugar, se exportaron a un libro de Microsoft Excel los datos respectivos de “intensidades de peaks” y composiciones químicas para los elementos reconocidos, tomando como referencia los valores mínimos y máximos dentro de cada clúster para incluir la mayor cantidad posible de píxeles que se asociaron con dicha fase mineral. En segundo lugar, los datos en “intensidades de peaks” fueron ingresados manualmente a un archivo SIP que ya contenía un conjunto de minerales primarios y secundarios, añadiéndose las 8 fases minerales definidas mediante el análisis estadístico, con el prefijo #C, nombrados como #C01, #C02 y así hasta #C08, como se observa en la Tabla 3.2. Finalmente, cada muestra fue reclasificada con estas nuevas fases minerales. Dado que el software iDiscover clasifica una muestra según el orden jerárquico que se le da a la lista de minerales del archivo SIP, las fases minerales determinadas por estadística fueron ordenadas de acuerdo al número de píxeles que agrupaban, y luego se ajustaron de acuerdo a observaciones realizadas en el microscopio óptico, buscando que la reclasificación fuera lo más cercana a la realidad, quedando en primer lugar el apatito, seguido por la cromita, troilita, piroxenos de alto Ca, olivino, piroxenos de bajo Ca, vidrio feldespático, óxidos e hidróxidos de Fe y kamacita finalmente.

Tabla 3.2: Fases minerales definidas a partir del análisis estadístico y su respectivo código.

Código de fase mineral	Fase mineral
#C01	Apatito
#C02	Cromita
#C03	Clinopiroxeno
#C04	Oxi-hidróxidos de Fe
#C05	Troilita
#C05a	Fe - Ni metalito
#C06	Vidrio
#C07	Ortopiroxeno
#C08	Olivino

3.4. Reclasificación de las fases olivino y piroxeno de alto Ca

Debido a que, en una primera instancia, luego de hacer una primera reclasificación estadística de píxeles, hacer la distinción entre olivinos y ortopiroxenos fue complejo, se reclasificó

solamente los píxeles asociados a dichas fases con el fin de tener dos nuevos clústeres con mayor grado de diferenciación. Para realizar lo anterior, mediante RStudio se seleccionó únicamente la información asociada a los clústeres #C07 y #C08 (ortopiroxenos y olivinos respectivamente) y se re-agrupó mediante el método *k-means*, con un $k=2$. Las variables utilizadas en este caso correspondieron a BSE, O, F, Mg, Si, Ca y Fe, que corresponden a los elementos mayores en estas fases minerales, a excepción del F, y además se incluyó las razones $Fe / Fe+Si$ y $Mg / Mg+Si$ con el fin de aportar a la distinción entre ortopiroxenos y olivinos. Posteriormente, y al igual que en el análisis general de fases, se tomaron los valores extremos de los píxeles re-clasificados y se agregaron dos nuevas fases minerales al archivo SIP: KM#01-OPX y KM#02-OLV, correspondiendo a ortopiroxenos y olivinos. Lo anterior además de disminuir el número de píxeles no clasificados, fue de utilidad para mejorar la distinción entre píxeles de ambas fases, entendiendo que ortopiroxenos y olivinos se componen de los mismos elementos químicos, como se puede observar en la Figura 3.5.

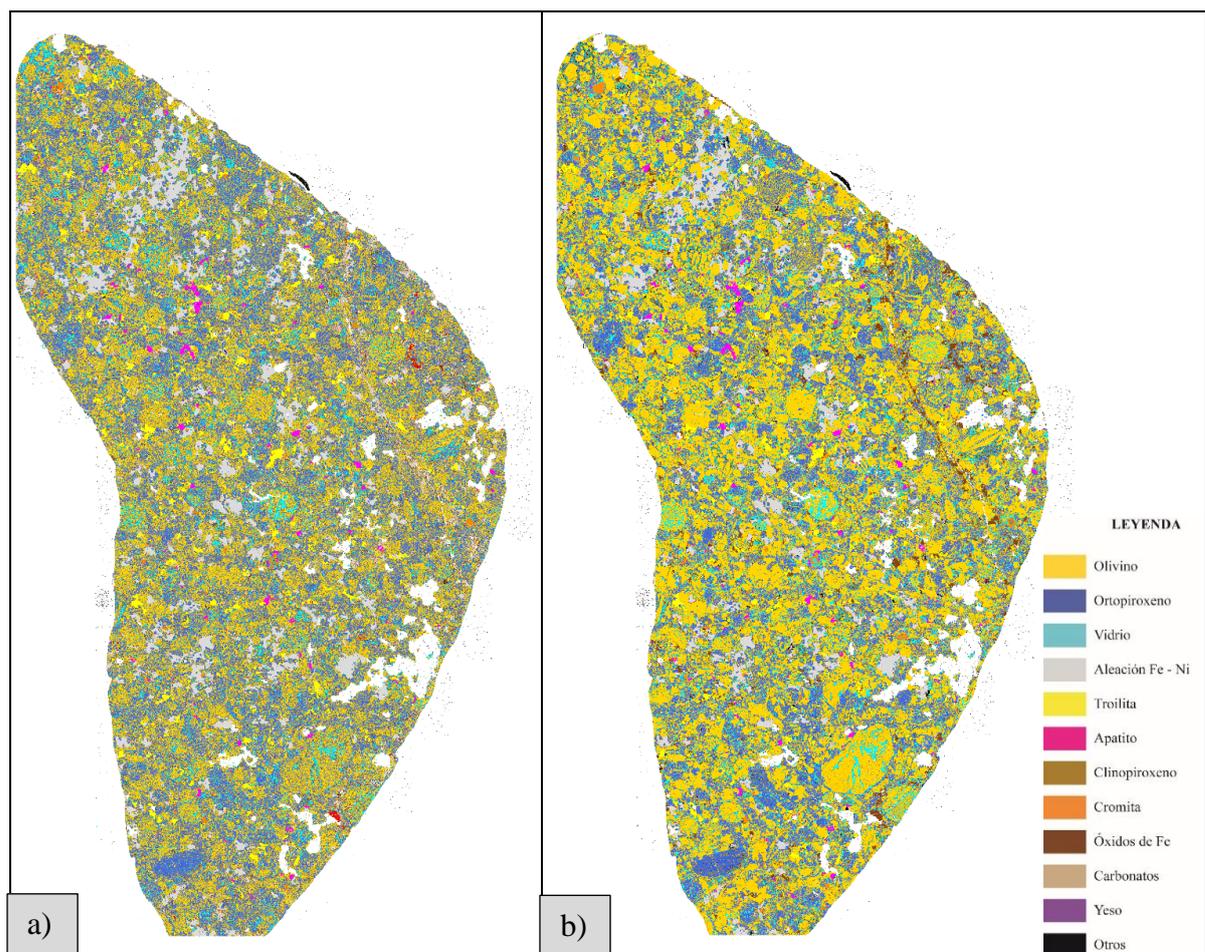


Figura 3.5: Vista general de fases mineralógicas sin reclasificación de olivinos y ortopiroxenos: a) utilizando *k-means* y b) con reclasificación, para la muestra CAT-M5.

3.5. Adición de datos UCN

Con el fin de poder hacer una correcta clasificación de las muestras de meteorito, se solicitó a la Dra. Millarca Valenzuela de la Universidad Católica del Norte (UCN) la data de las soluciones sólidas Enstatita (En) – Ferrosilita (Fs) y Forsterita (Fo) – Fayalita (Fa) de la lista SIP utilizada en dicha casa de estudio, para la clasificación de condritos ordinarios. Lo anterior, debido a que mediante un análisis QEMSCAN, sería sumamente complejo realizar una reclasificación estadística con este nivel de detalle.

Los datos solicitados, fueron enviados en base a composiciones químicas, lo que difería de la base de la clasificación llevada a cabo en este trabajo, realizada en “intensidades de peaks”. Debido a lo anterior, se hizo en iDiscover una lista SIP que solo contuviera datos de la UCN y se re-clasificaron las dos muestras. A continuación, se exportaron los datos del contenido de elementos para cada pixel que entrega iDiscover, tanto en “intensidades de peaks” como en composición química de ciertas secciones de las muestras, escogidas de manera aleatoria, para poder tener las composiciones de las soluciones sólidas En-Fs y Fo-Fa en base a “intensidades de peaks”. Nuevamente los datos extremos de los píxeles catalogados dentro de los clústeres Fo90, Fo80, Fo70, Fo60, Fo40, Fo30, Fa, En90, En87, En80, En75, En60 y En50, fueron ingresados al archivo SIP con el que se estaba trabajando, sumándose a los 10 clústeres definidos con anterioridad. El proceso descrito se explica con mayor detalle en el Anexo 1. En el Anexo 2, se detallan las características con las que se definió a cada fase mineral incluida en la lista SIP.

De esta manera y fusionando todas las técnicas aquí descritas, se obtienen mapas mineralógicos en base a las fases minerales definidas, quedando menos de un 2% de pixeles no clasificados en cada muestra, lo que es aceptable.

4. ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y QUÍMICO

4.1. Caracterización petrográfica meteoritos CAT-M5 y CAT-M9

El análisis microscópico de los condritos ordinarios se realizó en base a cóndrulos, matriz, mineralogía primaria y mineralogía secundaria o de alteración. A modo general, los cóndrulos se identifican por su morfología esférica compuesta por agregados de material cristalino. Siguiendo el trabajo de Ulloa (2017), la matriz comprende aquellos componentes menores a 0.1 mm, mientras que la mineralogía primaria involucra todos aquellos fragmentos cristalinos de tamaño mayor a 0.1 mm. En cuanto a la mineralogía primaria, a modo general, el reconocimiento óptico entre ortopiroxenos y olivinos se basó en que los primeros se encuentran más fracturados y “sucios” que los segundos, y el olivino presenta además mayor relieve que los cristales de ortopiroxeno. La mineralogía secundaria se caracteriza por presentar oxihidróxidos de hierro, principalmente.

4.1.1. CAT-M5

4.1.1.1. Cóndrulos

La muestra CAT-M5 presenta textura condritica debido a la presencia de diversos cóndrulos distribuidos dentro de una matriz. Existe un 77% de cóndrulos, cuyo rango de tamaño oscila entre los 0.01 mm y 2 mm, con una media de 0.6 mm. Se componen principalmente de olivino y ortopiroxeno, con texturas barradas (Figura 4.1 (a)) para el olivino y texturas radiadas (Figura 4.1 (b)) para el ortopiroxeno en algunos casos. También se identifican cóndrulos con textura porfídica (Figura 4.1 (c)) compuestos por olivino y ortopiroxeno. En cuanto a la forma de los cóndrulos, algunos se observan redondeados y esféricos pero otra parte importante se observan deformados, perdiendo algunos sectores del cóndrulo original, quedando relictos de ellos. Algunas partes de los cóndrulos son rellenados por vidrio microcristalino (Figura 4.1 (d)), conocido como mesostasis. Además, ciertos cóndrulos, cercano a un ~2% presentan extinción ondulosa, lo que es indicativo de metamorfismo de choque.

4.1.1.2. Matriz

La matriz, representa un 19% del área total de la muestra. Se encuentra levemente recristalizada presentando un grano de tamaño medio a fino. Se compone principalmente de silicatos como olivino y ortopiroxeno, con tamaños inferiores a los 0.1 mm. Además, dentro de la matriz se encuentran cristales de apatito, cromita, además de metales como kamacita y troilita. Rellenando ciertos espacios en esta matriz, se encuentran óxidos de Fe además de vidrio microcristalino.

4.1.1.3. Mineralogía Primaria

La mineralogía primaria (4% de abundancia) se compone en gran medida por olivino, con cristales subhedrales presentes tanto en cóndrulos y relictos como en la matriz, reconocible por su alto relieve y altos colores de interferencia; ortopiroxeno formando parte de los cóndrulos, relictos y como parte de la matriz, reconocible por bajos colores de interferencia además de presentarse más fracturado y de menor relieve en comparación con el olivino; clinopiroxeno cuya ocurrencia va junto con el ortopiroxeno; kamacita en granos anhedrales (Figura 4.1 (e)), tanto en la matriz como en cristales primarios, donde alcanzan grandes tamaños (~1.5 mm); troilita en granos subhedrales (Figura 4.1 (e)) y diseminada con tamaños pequeños con una moda de ~0.15 mm, y formando parte además de la matriz; cromita de formas subhedrales a anhedrales y cristales de apatito anhedrales cuyo grano de mayor tamaño alcanza los 0.3 mm.

4.1.1.4. Mineralogía Secundaria

Dentro de la mineralogía primaria, teóricamente se debería tener plagioclasa, pero no se ha podido identificar al microscopio óptico. Lo que si se logra apreciar es vidrio microcristalino (mesostasis), el cual se caracteriza por rellenar ciertos espacios tanto dentro de la matriz como dentro de los cóndrulos y sus relictos. Además, se identifican óxidos de Fe que también rellenan espacios y fracturas, caracterizados por presentar coloraciones rojizas en nícoles paralelos. Por último, se exhiben fases terrestres como yeso y carbonatos, asociados a meteorización terrestre.

4.1.2. CAT-M9

4.1.2.1. Cóndrulos

El meteorito presenta textura condritica, sin embargo, son pocos cóndrulos los que se pueden reconocer, debido a que se encuentran bastante deteriorados y más bien, se observan relictos de dichos cóndrulos. La recristalización es abundante. Existe un ~ 64% de cóndrulos, cuyo rango de tamaño oscila entre los 0.01 mm y 1.45 mm, con una media de 0.9 mm. Se componen principalmente de olivino y ortopiroxeno, con texturas radiadas (Figura 4.2 (a)) para el ortopiroxeno. Los cóndrulos de ortopiroxeno en general son de mayor tamaño que los de olivino. También se identifican cóndrulos con textura porfídica (Figura 4.2 (b)) compuestos por olivino y ortopiroxeno. Todos ellos se encuentran bastante fracturados. Además, la mayoría de los cóndrulos y de cristales primarios de olivino y ortopiroxeno presentan extinción ondulosa, lo que es indicativo de metamorfismo de choque.

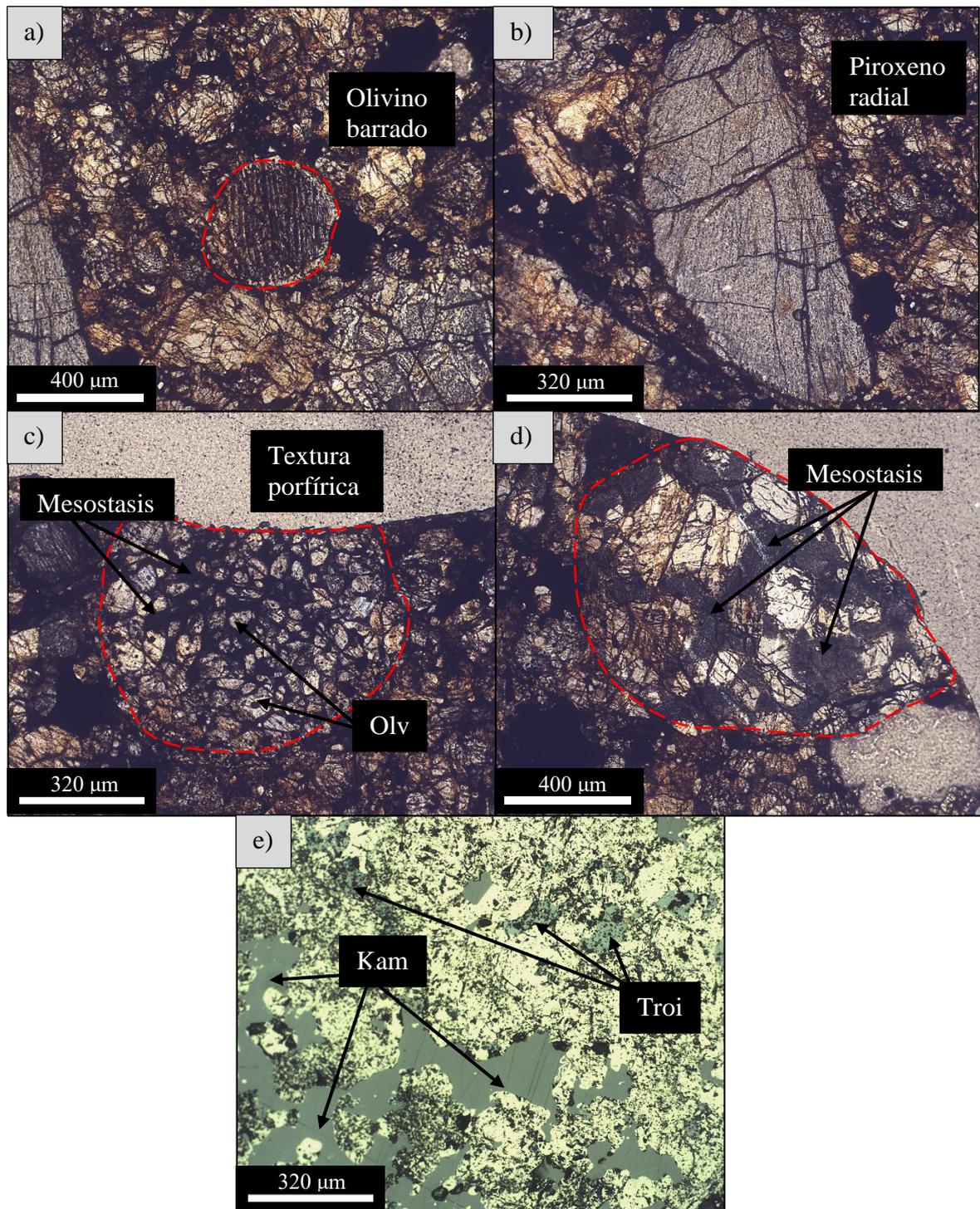


Figura 4.1: Fotomicrografías de microscopio óptico (SIAMS) de la muestra CAT-M5. a) Cóndrulo de olivino barrado en nicoles paralelos. b) Relicto de cóndrulo de piroxeno radial en nicoles paralelos. c) Relicto de cóndrulo con textura porfírica, relleno por cristales de olivino y mesostasis en los intersticios, en nicoles paralelos. d) Relicto de cóndrulo relleno por cristales de olivino y vidrio en nicoles paralelos. e) Cristales de kamacita y troilita bajo luz reflejada en nicoles paralelos. Los colores de estos minerales no son los reales debido a que el corte presenta una pátina de grafito que se utilizó para el análisis de QEMSCAN. Olv = olivino, Masq = masquelinita, Kam = kamacita, Troi = troilita.

4.1.2.2. Matriz

La matriz, representa un 28% del área total de la muestra. Se caracteriza por encontrarse medianamente recrystalizada y por presentar un grano de tamaño medio a fino. Se compone principalmente de olivino y ortopiroxeno. En menor medida se observa vidrio en los intersticios de los cóndrulos y cristales. Además, dentro de la matriz podemos encontrar cristales de apatito, cromita, clinopiroxeno, además de metales como kamacita y troilita en menor proporción.

4.1.2.3. Mineralogía Primaria

La mineralogía primaria (8%) se compone de olivino, con cristales subhedrales presentes tanto en cóndrulos y relictos como en la matriz; ortopiroxeno formando parte de los cóndrulos, relictos y como parte de la matriz, caracterizados por presentar gran tamaño; clinopiroxeno de formas anhedrales y asociados en general a los cristales de ortopiroxeno; cristales pequeños de kamacita en granos anhedrales y troilita en baja proporción con formas subhedrales y diseminadas formando parte de la matriz principalmente; cromita de formas subhedrales a anhedrales y pequeños cristales de apatito anhedrales, también formando ambas partes de la matriz.

4.1.2.4. Mineralogía Secundaria

Se identifica como mineralogía secundaria vidrio microcristalino (mesostasis) el cual se caracteriza por rellenar ciertos espacios dentro de la matriz y dentro de los cóndrulos y sus relictos. Además, se identifican óxidos de Fe (vidrio de Fe) que también rellenan espacios y fracturas principalmente, como se ve en la Figura 4.2 (c).

Se observa, a modo de comparación, que la muestra CAT-M9 se encuentra mucho más recrystalizada y sometida a agentes externos que la muestra CAT-M5, debido a la mayor cantidad de fracturas y a una recrystalización más pervasiva para el primer caso.

4.2. Geoquímica de meteoritos CAT-M5 y CAT-M9

4.2.1. Química elemental de CAT-M5 y CAT-M9

QEMSCAN entrega los datos del análisis elemental para Al, Ca, Cr, Fe, H, Mg, Mo, Na, Ni, O, P, S, Si y Ti, presentados como concentraciones en porcentaje en peso (wt%). Para obtener estos datos, iDiscover requiere la fórmula química de las fases minerales que se reconocen, con

el fin de calcular su abundancia en base a su proporción química. Las fórmulas utilizadas para lo anterior, se determinaron empíricamente, en base a la mediana de los datos químicos que entrega QEMSCAN ® según la clusterización. Además, estos datos debieron ser recalculados debido al mal reconocimiento de los átomos de oxígeno por parte de QEMSCAN ®. El procedimiento seguido se enseña a continuación utilizando como ejemplo la fase mineral apatito.

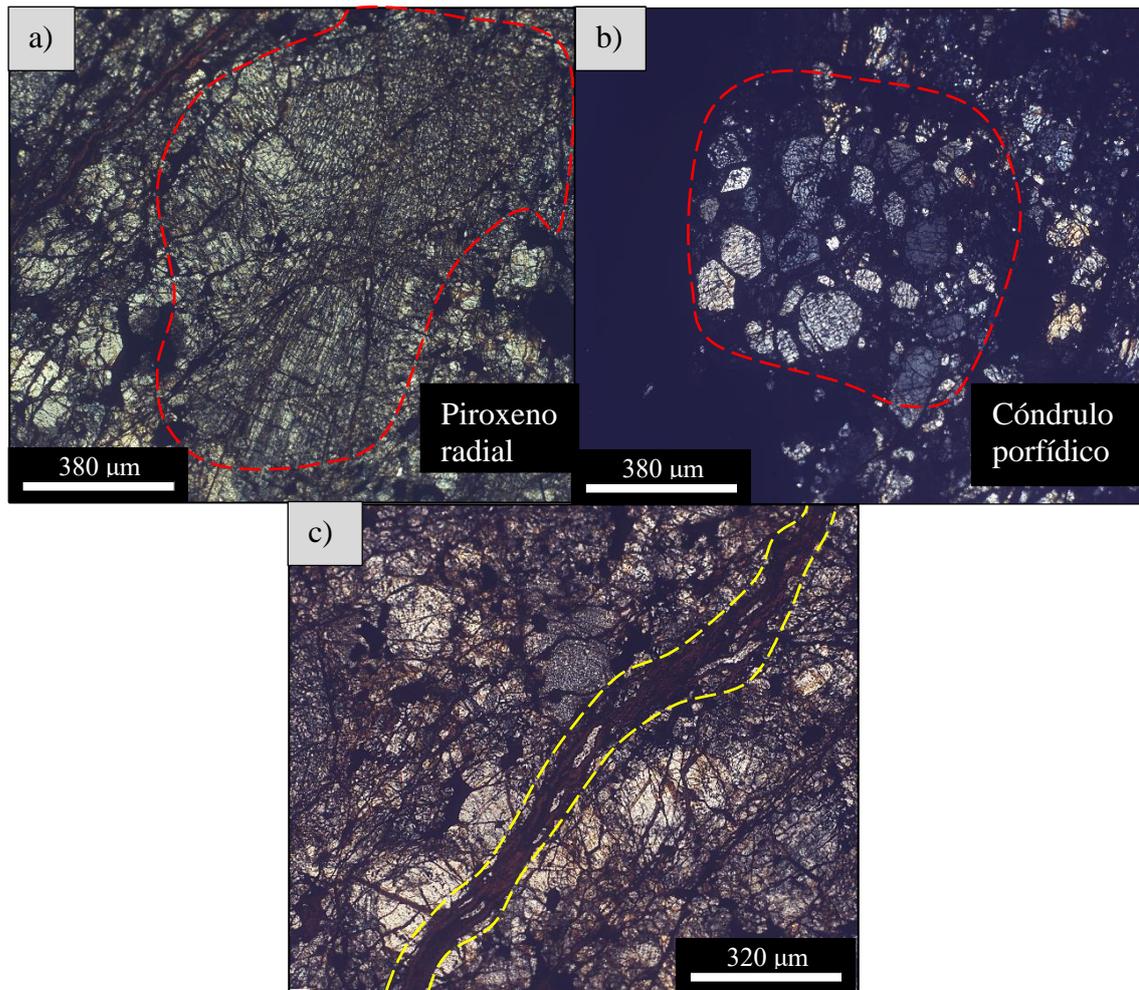


Figura 4.2: Fotomicrografías de microscopio óptico (SIAMS) de la muestra CAT-M9. a) Relicto de cóndrulo de piroxeno radial en NP. b) Relicto de cóndrulo con textura porfírica, relleno por cristales de olivino y vidrio microcristalino (mesostasis) en los intersticios en NP. c) Fractura siendo rellena por óxidos de hierro en NP. Oliv = olivino, Masq = masquelinita, Kam = kamacita, Troi = troilita, NP = nicoles paralelos, NC = nicoles cruzados.

A partir de los datos entregados por QEMSCAN, y trabajados estadísticamente con el software RStudio, correspondiente a la mediana de cada elemento que conforma la fase mineral apatito, se calculan los moles de las concentraciones entregadas en %peso, conociendo la masa molar de cada elemento. A continuación, dichos moles deben ser recalculados en base a una

proporción de elemento conocida. En este caso, se sabe por fórmula estequiométrica que el apatito presenta 5 moles de Ca. A partir de este dato, se calcula una proporción según la Ecuación 1 (E.1), teniendo en cuenta los moles calculados de Ca y los moles teóricos de Ca y se recalculan los moles para todos los elementos según la Ecuación 2 (E.2). Además, se agrega un mol de hidrógeno puesto que QEMSCAN no reconoce a este elemento, pero se sabe por fórmula química que debe estar presente en esta fase mineral. A continuación, utilizando los moles recalculados, excepto los de oxígeno, se busca el equilibrio en la fórmula química a partir del estado de oxidación de cada elemento, teniendo como incógnita los moles finales de O, como se observa en la Ecuación 3 (E.3). Así se obtienen los moles reales que deben haber de oxígeno. Finalmente se vuelve a la concentración en peso, la cual debe ser normalizada al 100%. Estos últimos valores son ingresados en iDiscover para permitirle a dicho software extraer la información química para la roca total, conociendo las proporciones de elementos para cada una de sus fases minerales. En la Tabla 4.1 se muestra un resumen de los datos que se obtuvieron para llegar a la fórmula empírica del apatito a modo de ejemplo. En el Anexo 3, se presentan el resto de las Tablas con las cuales se obtuvieron estas fórmulas empíricas.

En la Tabla 4.2 se presentan las concentraciones en % peso entregadas por QEMSCAN y las concentraciones normalizadas al 100% también en % peso, donde además se presentan razones entre elementos que son útiles para realizar clasificaciones, según clase y grupo.

Tabla 4.1: Tabla resumen datos para conocer fórmula empírica de la fase mineral apatito definida en esta memoria.

Elementos Apatito	Q2 de la concentración (% wt)	Masa molar (g/mol)	Moles	Proporción	Moles recalculados	Concentración recalculada (wt%)	Concentración normalizada (wt%)
O	4.74	16.00	2.96	1.03	13.95	22.32	40.66
P	29.36	31.00	9.47	3.30	3.50	10.85	19.77
Ca	58.79	41.00	14.34	5.0	5.00	20.50	37.35
H		1.01			1.00	0.10	0.18
Fe	2.65	55.85	0.47	0.17	0.20	1.12	2.04
Total					0 Equilibrio	54.89	100.00

La fórmula que se ingresó para la fase reconocida en esta memoria como “vidrio” se basó en la información teórica entregada en el trabajo de Lewis y otros (2022), debido a que la fase empírica no se ajustaba en términos del aluminio al momento de hacer la clasificación de Valenzuela (2003, con los datos de Von Michaelis y otros, 1969). Dichos valores se presentan en el Anexo 2.

$$\text{Proporción} = \frac{\text{Moles calculados Ca}}{\text{Moles teóricos Ca}} \quad (\text{E.1})$$

$$\text{Proporción O} = \frac{\text{Moles calculados O}}{\text{Proporción}} \quad (\text{E.2})$$

$$M.R.Fe * 2 + M.R.H * 1 + M.R.Ca * 2 + M.R.P * 3 + M.R.O * -2 = 0 \quad (\text{E.3})$$

Tabla 4.2: Concentraciones (wt%) de elementos químicos en las muestras CAT-M5 y CAT-M9 y concentraciones normalizadas al 100%, además de algunas razones elementales.

Elemento	Concentraciones CAT-M5 (% wt)	Concentraciones CAT-M5 normalizado (% wt)	Concentraciones CAT-M9 (% wt)	Concentraciones CAT-M9 normalizado (% wt)
Al	1.25	1.27	1.24	1.26
Ca	1.45	1.47	1.50	1.52
Cr	0.59	0.61	0.34	0.34
Fe	24.41	24.85	25.80	26.11
H	0.06	0.06	0.13	0.13
K	0.01	0.01	0.01	0.01
Mg	14.49	14.75	14.11	14.28
Mn	0.06	0.06	0.08	0.08
Mo	0.08	0.08	0.00	0.00
Na	0.14	0.14	0.14	0.14
Ni	0.31	0.31	0.22	0.22
O	37.02	37.69	38.08	38.53
P	0.16	0.16	0.19	0.19
S	0.62	0.64	0.30	0.30
Si	17.57	17.89	16.70	16.89
Ti	0.01	0.01	0.00	0.00
Total	98.23	100.00	98.83	100.00

Razones	CAT-M5 (% wt)	CAT-M5 con valores normalizados (% wt)	CAT-M9 (% wt)	CAT-M9 con valores normalizados (% wt)
Al/Si	0.071	0.071	0.074	0.075
Fe/Si	1.389	1.389	1.545	1.546
Mg/Si	0.825	0.824	0.845	0.845

4.2.2. Mineralogía modal de CAT-M5 y CAT-M9

La Tabla 4.3 muestra la mineralogía cuantitativa (wt%) de los meteoritos analizados, obtenidos mediante los análisis de QEMSCAN. El mineral más abundante, en ambas muestras, según los datos mineralógicos modales, corresponde al olivino seguido por el ortopiroxeno. Además, se reportan los porcentajes de fases metálicas de Fe-Ni, vidrio feldespático, clinopiroxeno, troilita,

cromita, apatito, yeso, carbonatos y óxidos de Fe. Para cada medición QEMSCAN que se realiza, por lo general hay una parte del escaneo que no está clasificada en la lista SIP y se reporta como “otros”. En esta denominación caben todas las ocurrencias minerales que no se clasificaron dentro de los minerales reportados anteriormente, y en este caso, están en una baja proporción en ambas muestras (menor a un 1.5%).

Tabla 4.3: Concentraciones (wt%) de minerales en las muestras CAT-M5 y CAT-M9.

Mineral	Concentraciones para CAT-M5 (%wt)	Concentraciones para CAT-M9 (%wt)
Olivino	46.07	49.94
Ortopiroxeno	24.84	19.63
Fe-Ni	7.89	5.68
Vidrio feldespático	6.32	6.39
Óxidos de Fe	4.73	10.82
Clinopiroxeno	3.48	3.59
Troilita	3.23	1.73
Cromita	1.34	0.76
Apatito	0.79	0.97
Yeso	0.01	0.00
Carbonatos	0.01	0.00
Otros	1.30	0.49
Total	100.00	100.00

Además de la mineralogía modal, con los datos entregados por iDiscover, es posible calcular el aporte elemental para cada uno de los minerales en base al contenido (% wt) de cada fase mineral y a su fórmula química. Este cálculo evidencia qué porcentaje de un elemento en particular de la muestra, aporta cada uno de los minerales modales medidos. Para este estudio, se calcularon los aportes de Fe normalizado, debido a que estos valores son utilizados en la clasificación de meteoritos. Los resultados del aporte elemental para cada uno de los minerales se detallan en la Tabla 4.4. Para la muestra CAT-M5, el principal mineral aportador de Fe es el olivino, ya que aloja el 8.78% del Fe total, y lo mismo ocurre con la Muestra CAT-M9, donde el olivino aporta con un 9.88% de Fe.

4.2.3. Composiciones de olivinos y ortopiroxenos

La composición de las soluciones sólidas olivino y piroxenos bajos en Ca es requerida para poder realizar la clasificación de meteoritos. En la Tabla 4.5 se presentan los contenidos de forsterita (Fo: Mg_2SiO_4) y fayalita (Fa: Fe_2SiO_4) en la serie del olivino para las muestras CAT-M5 y CAT-M9, y la proporción de enstatita (En: $MgSiO_3$) y ferrosilita (Fe: $FeSiO_3$) para la serie de piroxenos bajos en Ca en la Tabla 4.6, también para ambas muestras. Estos datos son

entregados por iDiscover y se incluyen aquellas concentraciones de mineral que no fueron asignadas con alguna proporción específica de solución sólida, representados como “olivino” y “ortopiroxeno” respectivamente.

Tabla 4.4: Aporte elemental de Fe para cada una de las fases minerales de mayor relevancia. Aportes de Fe en los minerales de las muestras CAT-M5 y CAT-M9. Todas las mediciones están expresadas en porcentaje en peso (wt%). El aporte de Fe para las fases olivino y ortopiroxeno mostrado en esta tabla comprende la sumatoria de todos los aportes de Fe por parte de las soluciones sólidas olivino y ortopiroxeno, en base a Forsterita (Fo) y Enstatita (En).

Mineral	Fe en fórmula química (% wt)	Concentración mineral (% wt) CAT-M5	Aporte de Fe (% wt) CAT-M5	Concentración mineral (% wt) CAT-M9	Aporte de Fe (% wt) CAT-M9
Olivino	Fo 90: 7.6 Fo 80: 14.57 Fo 70: 21.21 Fo 60: 26.93 Fo 50: 32.42 Fo 40: 37.53 Fo 30: 42.30 Fa: 54.81 Olv: 17.15	Fo 90: 0.07 Fo 80: 21.11 Fo 70: 14.91 Fo 60: 0.99 Fo 50: 0.61 Fo 40: 0.61 Fo 30: 0.17 Fa: 0.28 Olv: 9.38	8.78	Fo 90: 0.01 Fo 80: 17.86 Fo 70: 19.45 Fo 60: 1.52 Fo 50: 1.14 Fo 40: 1.08 Fo 30: 0.41 Fa: 0.91 Olv: 7.57	9.88
Ortopiroxeno	En 75: 12.89 En 50: 24.02 Opx: 12.23	En 75: 2.32 En 50: 0.24 Opx: 0.72	3.28	En 75: 13.91 En 50: 0.60 Opx: 5.12	2.56
Fe-Ni	83.43	7.89	6.58	5.68	4.74
Vidrio	0.21	6.32	0.01	6.39	0.01
Óxidos de Fe	62.85	4.73	2.97	10.82	6.8
Clinopiroxeno	6.3	3.48	0.22	3.59	0.23
Troilita	83.43	3.23	2.70	1.73	1.44
Cromita	23.86	1.34	0.32	0.76	0.18
Apatito	2	0.79	0.02	0.97	0.02
Total			~24.4		~25.8

En la muestra CAT-M5, lo más abundante es el contenido de Forsterita 80, con un 21.11%, mientras que en la muestra CAT-M9, Forsterita 70 corresponde a la fase de mayor abundancia con un 19.45%, seguido por Forsterita 80 con un 17.86%. En ambas muestras, Enstatita 75 es lo más abundante. Estos contenidos, sin embargo, son dependientes del orden jerárquico que se les asigne en la Lista SIP creada en este trabajo, la cual se presenta en el Capítulo 3 de Metodología.

4.3. Mapas mineralógicos en falso color para las muestras CAT-M5 y CAT-M9

A partir del análisis QEMSCAN, adicionalmente a los datos cuantitativos obtenidos, se generaron mapas en falso color que permiten observar ocurrencias minerales, texturas, distribución, tamaños de grano, formas y relaciones entre las fases minerales presentes.

Se presentan mapas de la mineralogía modal de todos los minerales clasificados en los cortes transparentes de las muestras CAT-M5 y CAT-M9 en la Figura 4.3 y Figura 4.4, respectivamente.

Tabla 4.5: Concentraciones (wt%) de la serie del olivino en las muestras CAT-M5 y CAT-M9. En “Olivino” se reportan las especies de olivino que no están contenidas en la serie Fo-Fa dado el análisis estadístico. Fo = Forsterita, Fa = Fayalita.

Mineral	Concentraciones para CAT-M5	Concentraciones para CAT-M9
Fo 100	0	0
Fo 90	0.06	0.01
Fo 80	20.01	17.86
Fo 70	14.55	19.45
Fo 60	0.99	1.52
Fo 50	0.63	1.14
Fo 40	0.65	1.08
Fo 30	0.19	0.41
Fo 20	0.00	0.00
Fo 10	0.00	0.00
Fa	0.32	0.91
Olivino	8.68	7.57
Otros	53.92	50.06
Total	100.00	100.00

Tabla 4.6: Concentraciones (wt%) de la serie del ortopiroxeno en las muestras CAT-M5 y CAT-M9. En “Ortopiroxeno” se reportan las especies de ortopiroxeno que no están contenidas en la serie En-Fs dado el análisis estadístico. En = Enstatita, Fs = Ferrosilita.

Mineral	Concentraciones para CAT-M5	Concentraciones para CAT-M9
En 90	0.00	0.00
En 87	0.00	0.00
En 80	0.00	0.00
En 75	17.99	13.91
En 70	0.00	0.00
En 60	0.00	0.00
En 50	0.99	0.60
Ortopiroxeno	5.86	5.12
Otros	75.15	80.37
Total	100.00	100.00

Mapa mineralógico en falso color de la muestra CAT-M5

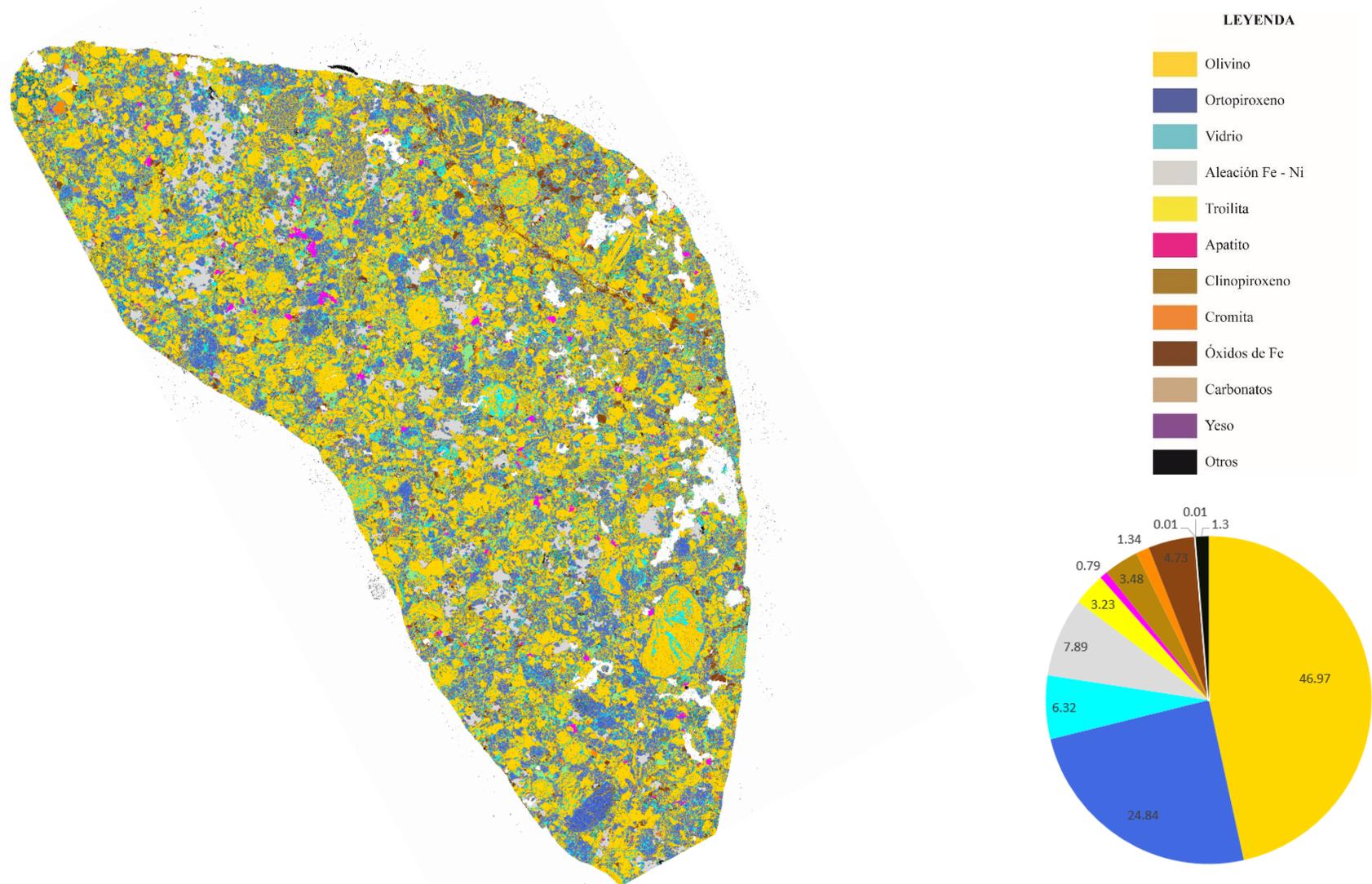
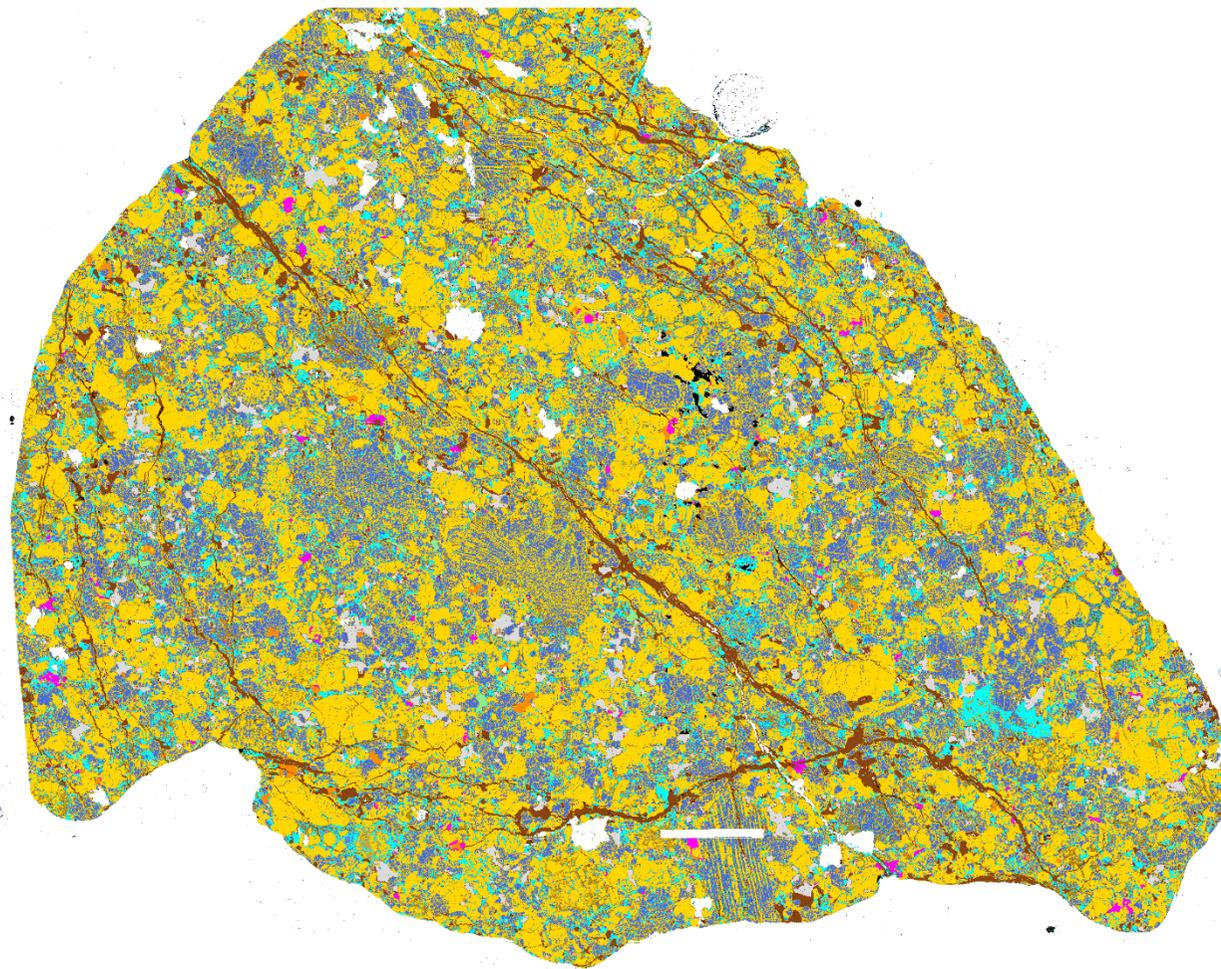


Figura 4.3: Vista general del mapa mineralógico QEMSCAN obtenido para la muestra CAT-M5 en falso color. A la derecha, se muestra la leyenda y la abundancia mineral de cada especie identificada.

Mapa mineralógico en falso color de la muestra CAT-M9



LEYENDA

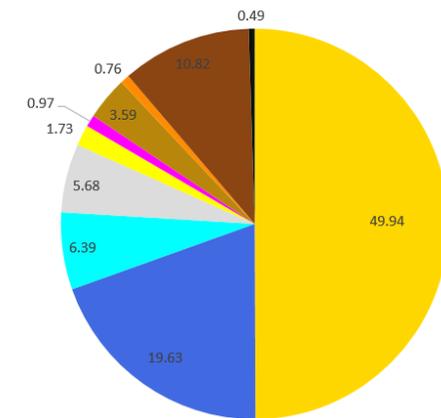


Figura 4.4: Vista general del mapa mineralógico QEMSCAN obtenido para la muestra CAT-M9 en falso color. A la derecha, se muestra la leyenda y la abundancia mineral de cada especie identificada.

5. RESULTADOS

El presente capítulo entrega resultados del análisis de datos obtenidos a partir de presentado en el Capítulo IV, teniendo como principal objetivo clasificar química y petrológicamente los meteoritos estudiados, además de calificar su grado de choque y de meteorización.

5.1. Clasificación química de los meteoritos CAT-M5 y CAT-M9

A modo general y en base a las observaciones microscópicas (Figura 5.1) junto con el mapa mineralógico en falso color entregado por QEMSCAN (Figura 4.3 y Figura 4.4), se puede interpretar que las muestras CAT-M5 y CAT-M9 corresponden a meteoritos del tipo condriticos. Esto se debe a la presencia de cóndrulos y relictos de ellos principalmente, además de la presencia de minerales no hidratados como olivinos y ortopiroxenos además de troilita y metales de Fe-Ni.

A su vez, los condritos se dividen en las siguientes clases: carbonáceos (C), ordinarios (O), enstatita (E), rumurutti (R) y kakagari (K) (Krot y otros, 2014). Para realizar esta discriminación, existen diferentes diagramas, donde en base a razones de algunos elementos y/o moléculas, se permite hacer la clasificación

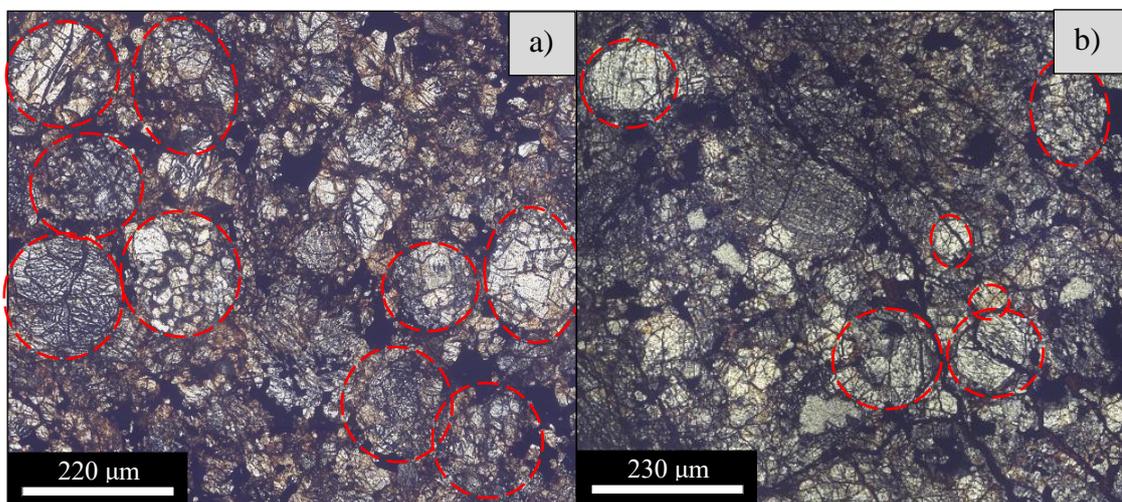


Figura 5.1: Imágenes SEM que muestran la ocurrencia de cóndrulos en las muestras CAT-M5 y CAT-M9. Los cóndrulos son encerrados en círculos rojos. a) Cóndrulos en la muestra CAT-M5. b) Cóndrulos en la muestra CAT-M9.

Para diferenciar las 3 clases principales de condritos, entendiéndose que las clases R y K son extremadamente poco comunes, se pueden utilizar las razones Mg/Si, Al/Si y Fe/Si, según Valenzuela (2003, con los datos de Van Michaelis y otros, 1969). En el gráfico Mg/Si vs Al/Si de la Figura 5.2 (a) se puede observar que ambas muestras, CAT-5 y CAT-M9, son proyectadas

en el campo de los condritos ordinarios. La muestra CAT-M9 se encuentra más enriquecida en la razón Mg/Si en comparación con la muestra CAT-M5, indicándose una posible asociación con los condritos del grupo H, mientras que la muestra CAT-M5, menos enriquecida en esta razón, se asocia con los condritos del tipo L o LL. Sin embargo, dichas asociaciones a grupos de condritos, no es clara en este esquema. En el gráfico Mg/Si vs Fe/Si de la Figura 5.2 (b), las muestras también son proyectadas sobre el campo de los condritos ordinarios. En este caso la muestra CAT-M5 presenta una tendencia hacia los condritos del grupo L o LL y la muestra CAT-M9 hacia los condritos del grupo H, al igual que lo establecido en la Figura 5.2 (a). Se concluye a partir de la Figura 5.2, que las muestras CAT-M5 y CAT-M9, corresponden a condritos ordinarios del grupo L/LL y H, respectivamente.

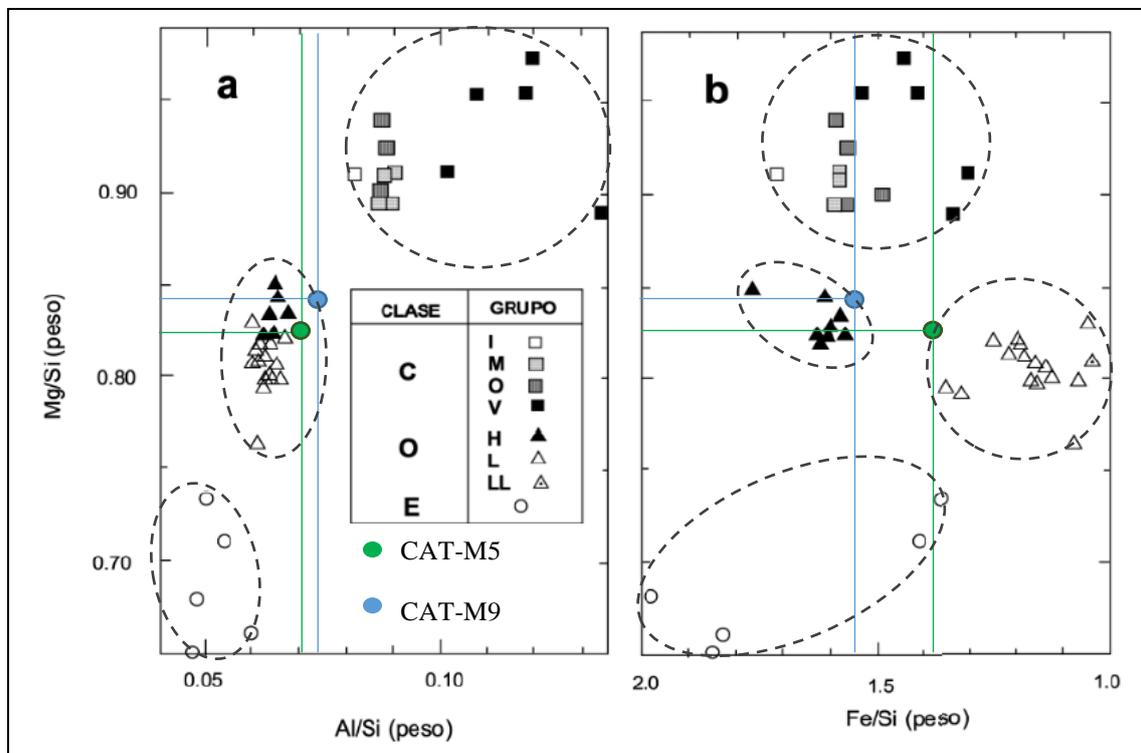


Figura 5.2: Gráfico de las razones Mg/Si vs. Al/Si (a) y (b) Mg/Si vs. Fe/Si para la clasificación según clase de condrito y las proyecciones de las muestras CAT-M5 y CAT-M9. Extraído de Valenzuela (2003) con los datos de Von Michaelis y otros (1969). La muestra CAT-M5 se proyecta dentro del campo de los condritos ordinarios, al igual que la muestra CAT-M9.

Para realizar la clasificación según clase y grupo dada por Van Schmus y Wood (1967), se considera la razón de Fe total y SiO₂, expresados en porcentaje en peso (% wt), y la de hierro metálico (Fe⁰) con respecto a Fe total. Como se presentó en la Tabla 4.1 de resultados del análisis QEMSCAN, el contenido de cada elemento se expresa en valores de porcentaje en peso (wt%), por lo que es necesario realizar la transformación de estos a porcentaje en peso (wt%) de óxidos mayores para obtener el contenido de SiO₂, utilizando la Ecuación 4 (E.4) y Ecuación

5 (E.5). Esta conversión es frecuentemente necesaria en el análisis de rocas y el procedimiento para realizarla se encuentra detallado en Ragland (1989). Estos datos se presentan en la Tabla 5.1 para la muestra CAT-M5 y Tabla 5.2 para la muestra CAT-M9, y la conversión para realizar la clasificación se hizo en base a los siguientes cálculos:

$$wt\% \text{ óxido} = wt\% \text{ elemento} * \text{factor de conversión} \quad (\text{E.4})$$

$$\text{Factor de conversión} = \frac{\text{Peso molecular óxido}}{\frac{\text{Peso atómico catión}}{N^\circ \text{ átomos del catión}}} \quad (\text{E.5})$$

Tabla 5.1: Porcentaje en peso (wt%) de óxidos mayores para la muestra CAT-M5.

Elemento (QEMSCAN)	(wt%) elemento normalizado	Factor de conversión	Óxido	wt% óxido
Al	1.27	1.890	Al ₂ O ₃	2.400
Ca	1.47	1.399	CaO	2.057
Cr	0.61	1.462	Cr ₂ O ₃	0.892
Fe	24.85	1.286	FeO	31.969
Mg	14.75	1.658	MgO	24.459
Na	0.14	1.348	Na ₂ O	0.188
Ni	0.31	1.273	NiO	0.395
P	0.16	2.292	P ₂ O ₅	0.357
Si	17.89	2.139	SiO ₂	38.264
Ti	0.01	1.668	TiO ₂	0.019

La razón entre el contenido de Fe metálico (Fe⁰) y el contenido de Fe total nos entrega el grado de oxidación del Fe en los condritos. Los grupos de condritos registran una amplia gama de estados de oxidación que probablemente se establecieron mediante una combinación de procesos nebulares y asteroidales (Krot y otros, 2000). El estado de oxidación se refleja en la distribución del hierro entre sus tres estados de oxidación comunes: 0 (metal Fe-Ni), +2 (sulfuros de Fe y silicatos) y +3 (óxidos) (Krot y otros, 2014). Si bien no es posible de medir directamente con QEMSCAN el contenido de Fe metálico, o separarlo del contenido de Fe total, este se puede calcular y cuantificar a partir del análisis mineral (Tabla 4.3) junto con el aporte de Fe normalizado por especie mineral (Tabla 4.4). Asumiendo que todo el Fe metálico está contenido en el Fe-Ni metálico, se puede realizar una proporción y recalcular qué cantidad de Fe está contenida en estas fases minerales. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 5.3.

Tabla 5.2: Porcentaje en peso (wt%) de óxidos mayores para la muestra CAT-M9.

Elemento (QEMSCAN)	(wt%) elemento normalizado	Factor de conversión	Óxido	wt% óxido
Al	1.26	1.890	Al ₂ O ₃	2.381
Ca	1.52	1.399	CaO	2.127
Cr	0.34	1.462	Cr ₂ O ₃	0.493
Fe	26.11	1.286	FeO	33.590
Mg	14.28	1.658	MgO	23.680
Na	0.14	1.348	Na ₂ O	0.190
Ni	0.22	1.273	NiO	0.274
P	0.19	2.292	P ₂ O ₅	0.439
Si	16.89	2.139	SiO ₂	36.125
Ti	0.00	1.668	TiO ₂	0.000

Tabla 5.3: Producto de la razón Fe⁰/Fe total. Valores de hierro metálico (Fe⁰) calculados en Fe-Ni y Fe total para los meteoritos CAT-M5 y CAT-M9.

	CAT-M5	CAT-M9
Fe ⁰ total (wt%)	6.58	4.74
Fe total (wt%)	24.85	26.11
Fe ⁰ /Fe total (wt%)	0.26	0.18

La Figura 5.3 muestra el diagrama de clasificación de condritos con los rangos propuestos en Van Schmus y Wood (1967). El condrito CAT-M5 es proyectado sobre el área de los condritos ordinarios, y específicamente se acerca a los condritos del grupo L, lo que indica un contenido medio de Fe metálico (Fe⁰), no tan enriquecido como los condritos H ni tan empobrecido como los condritos LL. El condrito CAT-M9 por su parte es proyectado entre los condritos ordinarios del grupo L y sobre los condritos carbonáceos. Por la clasificación de Valenzuela (2003), mostrada en la Figura 5.1, y por la textura de CAT-M9, se sabe que esta muestra corresponde a un condrito de la clase ordinaria y por lo tanto esta cercanía con el campo de los condritos carbonáceos se debe a una sobreestimación de la razón Fe/SiO₂, lo cual se explica por la abundante alteración terrestre que sufrió este espécimen. El condrito CAT-M9 presenta cerca de un 11% (%wt) de óxidos de Fe, lo que aumenta el contenido de hierro que originalmente contenía esta roca. En cuanto a sus valores de Fe⁰/Fe, sitúan a la muestra CAT-M9 entre los campos de condritos ordinarios del grupo L o LL.

Para clarificar más la diferenciación entre los grupos H, L y LL en los condritos ordinarios, la clasificación de Van Schmus y Wood (1967) propone una gráfica que relaciona el contenido de

fayalita (% molar) en olivinos, con la razón entre el contenido de Fe metálico y Fe total (Fe^0/Fe).

Para poder utilizar dicha clasificación y otras que se mostrarán más adelante, se deben conocer las concentraciones de fayalita y ferrosilita representativas de una muestra. Para lo anterior, se debe realizar una ponderación con respecto al porcentaje de solución sólida, es decir, el dato entregado por QEMSCAN, correspondiente a la concentración (wt%) de mineral, debe ser multiplicado según el contenido de Fe de ese mineral, como se muestra a continuación a modo de ejemplo, para fayalita 20 (Fo 80) en las Ecuaciones 6 y 7 (E.6 y E.7). Cabe mencionar que para efectos de las clasificaciones las soluciones sólidas se expresarán en términos de fayalita (Fa) y ferrosilita (Fs).

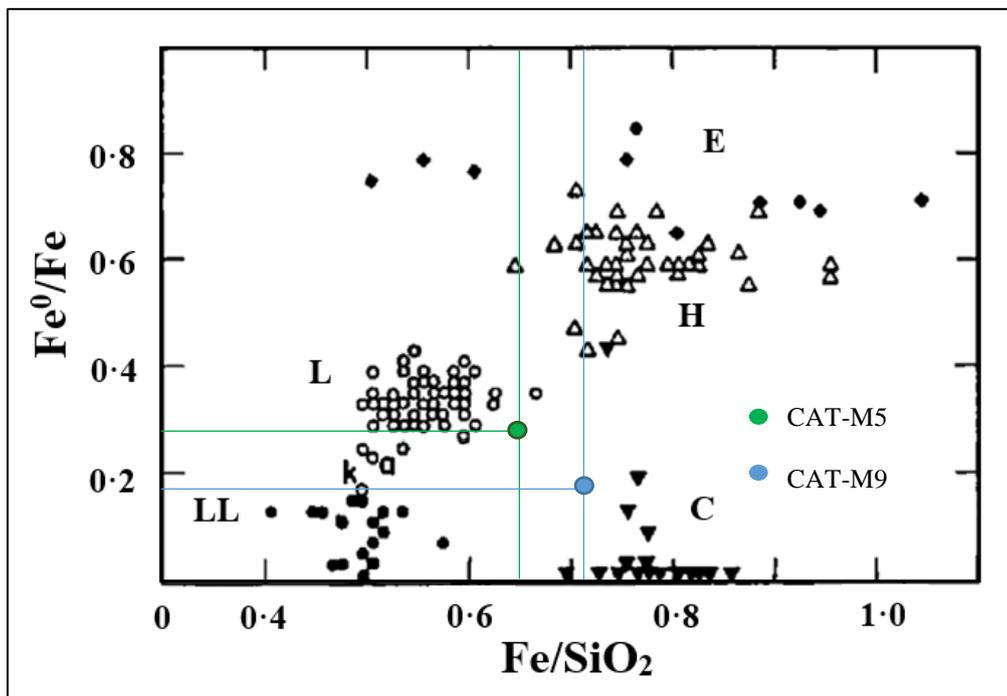


Figura 5.3: Gráfico de clasificación de condritos Fe^0/Fe vs. Fe/SiO_2 según lo propuesto por Van Schmus y Wood (1967). E: Condritos Enstatita; H: Condritos Ordinarios del grupo H, L: Condritos Ordinarios del grupo L; LL: Condritos Ordinarios del grupo LL; C: Condritos Carbonáceos.

$$Ponderación Fa(20) = 20.01 * 20 \quad (E.6)$$

A continuación, se hace una normalización según el total de masa de fayalita en la muestra.

$$Normalización = \frac{328.50}{39.45} \quad (E.7)$$

Finalmente, la suma de los valores normalizados representa la composición de fayalita de la muestra.

Los datos de este procedimiento se muestran en la Tabla 5.4 para la muestra CAT-M5 y en la Tabla 5.5 para la muestra CAT-M9, asociados a fayalita. En la Tabla 5.6 se muestran los valores asociados con la muestra CAT-M5 para ferrosilita y en la Tabla 5.7 para la muestra CAT-M9.

Tabla 5.4: Porcentaje de fayalita representativo para la muestra CAT-M5 y los valores asociados al procedimiento. Fa = Fayalita.

Fayalita	Concentraciones para CAT-M5 (%wt)	Ponderación Fa	Normalización
0	0.00	0.000	0.000
10	0.06	0.603	0.016
20	20.01	400.190	10.702
30	14.55	436.575	11.675
40	0.99	39.707	1.062
50	0.63	31.256	0.836
60	0.65	38.798	1.037
70	0.19	13.010	0.348
80	0.00	0.00	0.00
90	0.00	0.00	0.00
100	0.32	32.273	0.863
Total	37.40		26.538

Tabla 5.5: Porcentaje de fayalita representativo para la muestra CAT-M9 y los valores asociados al procedimiento. Fa = Fayalita.

Fayalita	Concentraciones para CAT-M9 (%wt)	Ponderación Fa	Normalización
0	0.00	0.000	0.000
10	0.01	0.086	0.002
20	17.86	357.275	8.432
30	19.45	583.427	13.770
40	1.52	60.772	1.434
50	1.14	56.800	1.341
60	1.08	64.690	1.527
70	0.41	28.647	0.676
80	0.00	0.000	0.000
90	0.00	0.000	0.000
100	0.91	90.827	2.144
Total	42.37		29.325

Tabla 5.6: Porcentaje de ferrosilita representativo para la muestra CAT-M5 y los valores asociados al procedimiento. Fs = Ferrosilita.

Ferrosilita	Concentraciones para CAT-M5 (%wt)	Ponderación Fs	Normalización
0	0.00	0.000	0.000
10	0.00	0.000	0.000
13	0.00	0.000	0.000
20	0.00	0.000	0.000
25	17.99	449.850	23.694
30	0.00	0.000	0.000
40	0.00	0.003	0.000
50	0.99	49.574	2.611
100	0.00	0.000	0.000
Total	18.99		26.31

Tabla 5.7: Porcentaje de ferrosilita representativo para la muestra CAT-M9 y los valores asociados al procedimiento. Fs = Ferrosilita.

Ferrosilita	Concentraciones para CAT-M9 (%wt)	Ponderación Fs	Normalización
0	0.00	0.000	0.000
10	0.00	0.000	0.000
13	0.00	0.000	0.000
20	0.00	0.000	0.000
25	13.91	347.873	23.973
30	0.00	0.000	0.000
40	0.00	0.001	0.000
50	0.60	29.801	2.054
100	0.00	0.000	0.000
Total	14.51		26.03

En la Figura 5.4 se muestra el diagrama de clasificación de condritos ordinarios fayalita (%molar) versus Fe^0/Fe , según los rangos propuestos en Van Schmus y Wood (1967). La muestra CAT-M5 es proyectada sobre el campo de los condritos ordinarios del grupo L, lo cual es consistente con los resultados obtenidos en el diagrama de Fe^0/Fe versus Fe/SiO_2 (Figura 5.2). La muestra CAT-M9 se proyecta sobre el campo de los condritos ordinarios del grupo LL, siendo similar a lo establecido en la Figura 5.2 para esta muestra, considerando la sobreestimación en Fe.

En la Figura 5.5 se grafican los contenidos de forsterita (%molar) vs. fayalita (%molar). En este caso, ambas muestras son graficadas dentro del campo de los condritos ordinarios del grupo LL, lo que es coincidente para la muestra CAT-M9 y se acerca a lo descrito para la muestra CAT-M5, cuya clasificación estaría entre los condritos L y LL.

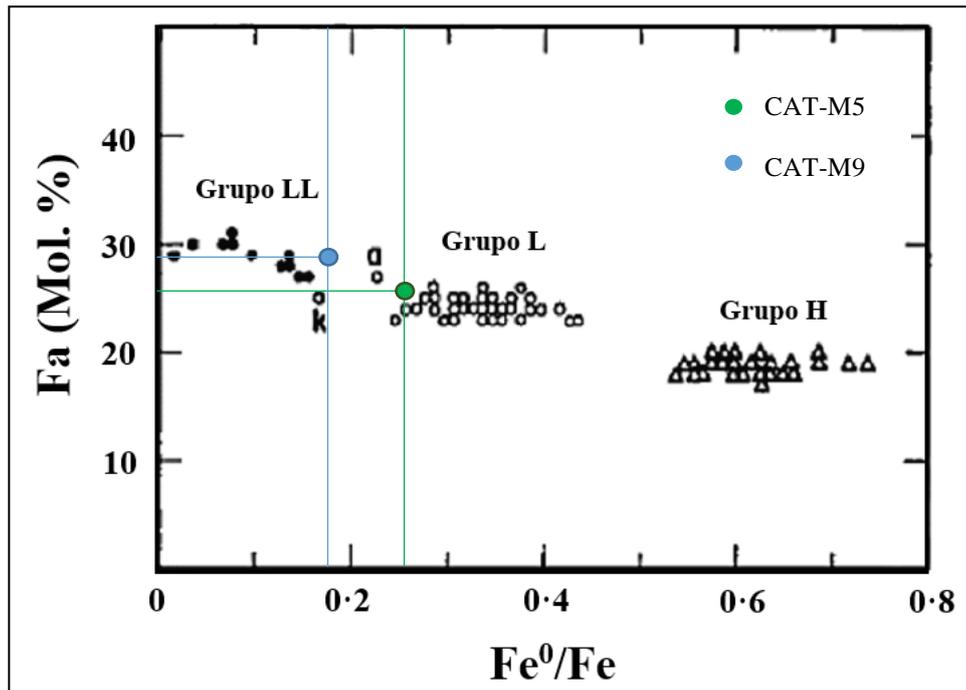


Figura 5.4: Gráfico de clasificación de condritos ordinarios Fayalita (% molar) vs. Fe^0/Fe según Van Schmus & Wood (1967).

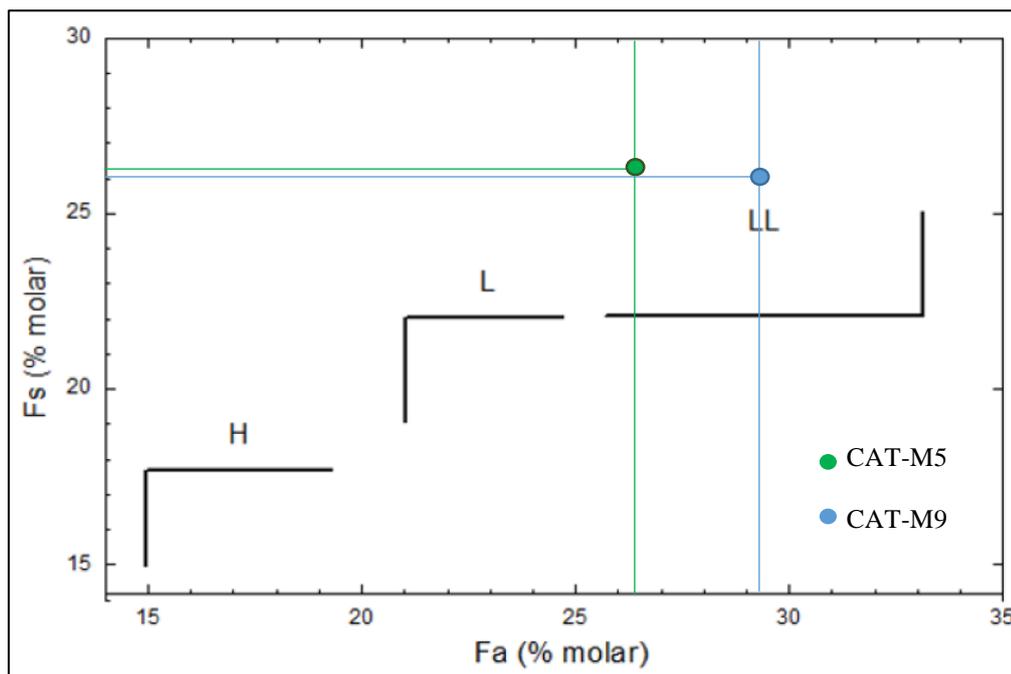


Figura 5.5: Gráfico de clasificación en base a contenidos de hierro, expresados en % molar de Fe_2SiO_4 (Fayalita = Fa) y $FeSiO_3$ (Ferrosilita = Fs) del olivino y piroxeno bajo en Ca respectivamente, en condritos ordinarios equilibrados. (Datos de Keil y Fredriksson, 1964 y de Fredriksson y otros, 1968 en Valenzuela, 2003).

5.2 Clasificación según Tipo Petrológico

El Tipo Petrológico se relaciona con la acción del metamorfismo termal luego de que ocurre la

acreción del cuerpo parental del condrito, lo que deja señales químicas y petrográficas en la muestra, las cuales son más evidentes a medida que aumenta el tipo petrológico desde el tipo 3 hacia el tipo 7, y, por ende, más intensa es la acción de este tipo de metamorfismo (Krot y otros, 2014). Los tipos petrológicos 1 y 2 quedan descartados de este análisis puesto que ellos son exclusivos para la alteración acuosa que sufren los condritos carbonáceos (Hutchinson, 2004). Para establecer el tipo petrológico de las muestras CAT-M5 y CAT-M9, se utilizaron los mapas mineralógicos obtenidos a través de QEMSCAN (Figura 4.3 y Figura 4.4), con el fin de observar los parámetros petrográficos que requiere la clasificación, además del microscopio óptico. Para los parámetros geoquímicos se utilizaron los análisis elementales y los aportes elementales por especie mineral además de análisis químicos originados a partir de microscopía electrónica de barrido (SEM). Los parámetros que deben analizarse se encuentran en la clasificación de Van Schumus y Wood (1967), resumida en la Tabla 2.3, correspondiendo a la dispersión de las composiciones del olivino, estado estructural del piroxeno, presencia y tamaños de feldespatos, vidrio primario, contenido de Ni en minerales metálicos y en minerales sulfurados, aspecto de la matriz, textura y contenido de C y H₂O. Dicho análisis se dividió para las muestras CAT-M5 y CAT-M9 en distintos subcapítulos.

5.2.1. Muestra CAT-M5

5.2.1.1. Dispersión en la composición de olivinos

Cristales heterogéneos de olivino y piroxeno indican un alto grado de desequilibrio, mientras que, hacia composiciones más equilibradas, los cristales se vuelven más homogéneos. El grado de homogeneidad se puede conocer midiendo el contenido de FeO en un gran número de granos de olivino seleccionados aleatoriamente, obteniendo una “desviación media porcentual” de la composición del mineral. Lo anterior no se puede conocer mediante QEMSCAN® ya que esta herramienta no realiza análisis puntuales, sin embargo, en este trabajo, a modo de complementar, se realizaron cuatro mediciones puntuales en granos de olivinos a través de SEM, cuyos resultados se presentan en la Tabla 5.5. En esta Tabla también se presentan los valores de FeO y la desviación estándar asociada a dichos valores. Pese a que solamente se tienen cinco composiciones minerales de granos de olivino de la muestra CAT-M5, se utilizará su desviación estándar para tener un mayor acercamiento a esta clasificación. El valor de la desviación estándar es igual a 3.34, lo que sugiere un tipo petrológico igual a 4 según la clasificación de Van Schmus y Wood (1967). Tipos petrológicos mayores o iguales a 5 indican cristales homogéneos.

Tabla 5.8: Resultados análisis puntuales para granos de olivino de la muestra CAT-M5 a través de SEM. Se presentan además los valores de FeO y la desviación estándar de dichos valores.

	CAT M5-3 (%wt)	CAT M5-4 (%wt)	CAT M5-19 (%wt)	CAT M5-27 (%wt)
O	33.23	33.85	27.91	33.84
Mg	30.16	27.86	30.18	30.47
Si	18.49	17.80	19.50	18.59
Fe	17.11	19.59	21.70	15.80
Mn	0.66	0.34	0.54	0.31
Ni	0.11	0.39	0.18	0.05
Ti	0.09	0.09	0.00	0.00
Na	0.05	0.03	0.00	0.82
Ca	0.04	0.00	0.00	0.00
K	0.02	0.05	0.00	0.00
P	0.02	0.00	0.00	0.00
Cr	0.02	0.00	0.00	0.12
Total	100.00	100.00	100.00	100.00

FeO	22.00	25.19	27.91	20.32
Desviación estándar (σ)	3.34			

5.2.1.2. Estado estructural de piroxenos bajos en Ca

La proporción de piroxeno monoclinico bajo en Ca y piroxeno ortorrómbico en los condritos se correlaciona con la progresiva recristalización de este. El sistema cristalino monoclinico del piroxeno es el producto natural del enfriamiento necesario para producir cóndrulos, y el piroxeno ortorrómbico puede representar la inversión del estado monoclinico metaestable en condiciones de alta temperatura sostenida (metamorfismo) (Reid y Fredriksson, 1967 en Van Schmus y Wood, 1967). En el caso de la muestra CAT-M5, la proporción de ortopiroxeno (24.84 %) es predominante, con clinopiroxeno menor a 20% de abundancia (3.48 %), lo que sugiere para el condrito CAT-M5 según los criterios de la Tabla 2.3 un tipo petrológico 5, 6 o 7.

5.2.1.3. Presencia y tamaño de feldespatos

En condritos ordinarios, el feldespato está presente en cóndrulos tanto como una fase primaria ígnea como una fase secundaria que resulta de la cristalización de vidrio de mesostasis durante el metamorfismo termal (Lewis y otros, 2022). Sólo los condritos bien recristalizados contienen granos de feldespato, principalmente plagioclasa, siendo el principal producto de la transformación metamórfica del vidrio primario o material microcristalino (Van Schmus y Wood, 1967). La clasificación de Van Schmus y Wood, 1967 estipula que, si los granos de feldespato son pequeños, menores a 50 μm se considera un tipo petrológico 4 o 5, mientras que

si su tamaño es mayor a 50 μm se habla de un tipo petrológico 6 o 7, según los criterios de la Tabla 2.3.

En este trabajo de memoria, no se pudo reconocer plagioclasa al microscopio óptico y el mapa mineralógica de falso color de QEMSCAN no clasificó cristales de feldspatos puesto que la Lista SIP ingresada incluye una sola fase mineral que involucra componentes de Ca-Al-Na y por ende no distingue entre plagioclasa primaria o secundaria.

5.2.1.4. Vidrio primario

El vidrio en los cóndrulos es indicador de condritos poco o no afectados por el metamorfismo termal, el cual se va perdiendo con la recristalización de la matriz, especialmente con la formación de plagioclasa (Van Schmus y Wood, 1967). Este vidrio se encuentra ausente en condritos recristalizados. La Lista SIP ingresada en este trabajo reconoce vidrio primario y secundario en conjunto, por lo tanto, no es posible analizar este criterio.

5.2.1.5. Contenido de Ni en minerales metálicos

El metal en la mayoría de los condritos se divide en kamacita (4-7% de Ni) y taenita (30-55% de Ni), la cual se asocia a grados metamórficos más altos. Estos contenidos de Ni son estables a 400-550 °C según el diagrama de fases Fe-Ni y probablemente se establecieron durante el enfriamiento después del metamorfismo (Van Schmus y Wood, 1967). En este trabajo, ambas especies minerales se reportan juntas en “Fe-Ni” al tener la misma composición química en distintas proporciones, por lo que no es posible diferenciarlas petrográfica ni químicamente mediante QEMSCAN. De todas formas, este criterio no es absoluto, ya que se ha reportado taenita en condritos que se creían no metamorfizados (Boström y Fredriksson (1966)), por lo que debe ser analizado rigurosamente (Van Schmus y Wood, 1967). Para esto, se debiesen tener análisis puntuales para poder diferenciar entre las dos fases minerales y sus proporciones de Ni.

5.2.1.6 Contenido de Ni en minerales sulfurados

Los condritos que no han sufrido metamorfismo contienen sulfuros ricos en Ni (troilita, 1-3% de Ni; pentlandita, hasta un 45% de Ni) (Van Schmus y Wood, 1967). Para el condrito CAT-M5, el único sulfuro detectado es la troilita (FeS) y este no posee Ni en su composición, lo que indica una afinidad con los tipos petrológicos 4,5, 6 o 7. El único mineral que aporta con Ni en esta muestra corresponde a la aleación Fe-Ni.

5.2.1.7. Texturas (integración cóndrulos - matriz)

Los condritos que no han sufrido metamorfismo contienen cóndrulos claramente delineados que están dentro de una matriz negra opaca. La ocurrencia de metamorfismo puede causar engrosamiento y homogenización de las texturas y por ende la matriz se observa fusionada con los cóndrulos, siendo estos apenas reconocibles. Los condritos altamente metamorfoseados, presentan una matriz que se ha aclarado y fusionado con los cóndrulos, la mayoría de los cuales son apenas reconocibles (Van Schumus y Wood, 1967).

Para el caso de la muestra CAT-M5, se logra identificar algunos cóndrulos con bordes definidos y otros tantos con bordes mal definidos, como se muestra en la Figura 5.6, lo que permite asociar a esta muestra con un tipo petrológico igual a 4.

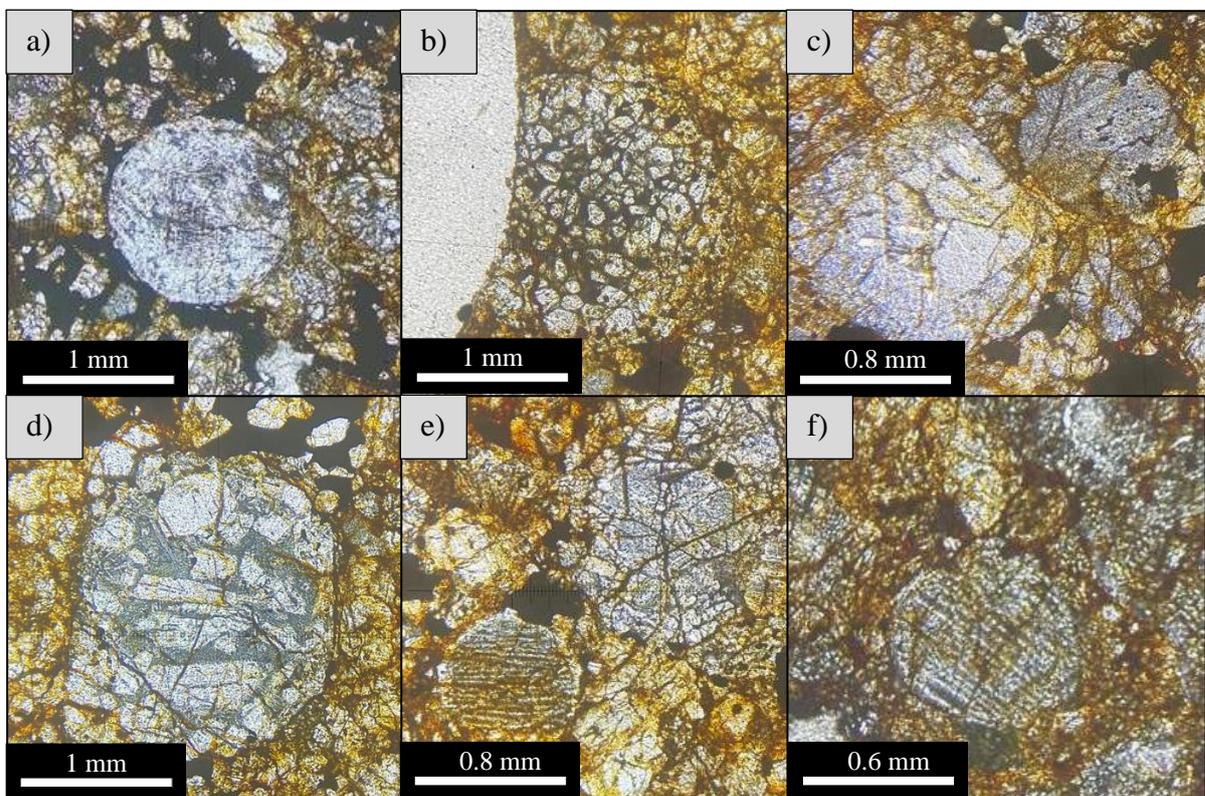


Figura 5.6: Definición de bordes de cóndrulos en la integración matriz-cóndrulo. a) Cóndrulo con bordes bien definidos. b) Cóndrulo con bordes bien definidos. c) Cóndrulos con bordes no muy bien definidos. Hay una mayor integración con la matriz. d) Cóndrulo con bordes bien definidos. e) Cóndrulo del borde inferior izquierdo con bordes bien definidos. Cóndrulo del borde superior derecho con bordes mal definidos. Integración con la matriz. f) Cóndrulo con bordes levemente definidos. Fotomicrograffas en NP. NP: Nícoles paralelos.

5.2.1.8 Contenidos de C y H₂O

Tanto el contenido de H₂O como el contenido de C no son reportados en el análisis a través de QEMSCAN, por lo que este ítem no será considerado al considerar el tipo petrológico.

5.2.2. Muestra CAT-M9

5.2.2.1. Dispersión en la composición del olivino

Para el caso de la muestra CAT-M9, no se realizaron análisis puntuales que permitan tener nociones sobre la dispersión en la composición de los granos de olivino, sin embargo, se puede tener una idea general de esta dispersión con los mapas mineralógicos en falso color de QEMSCAN®, observado en la Figura 5.7. Esta información muestra que la mayor parte de los olivinos se forman por un 80% de forsterita y en menor medida por Fo 70, Fo 60, Fo 50 y contenidos menores de forsterita. Se estima a partir de los mapas en falso color, que la dispersión del olivino puede indicar un tipo petrológico 4 o mayor, según la clasificación de Van Schumus y Wood (1967), de manera general.

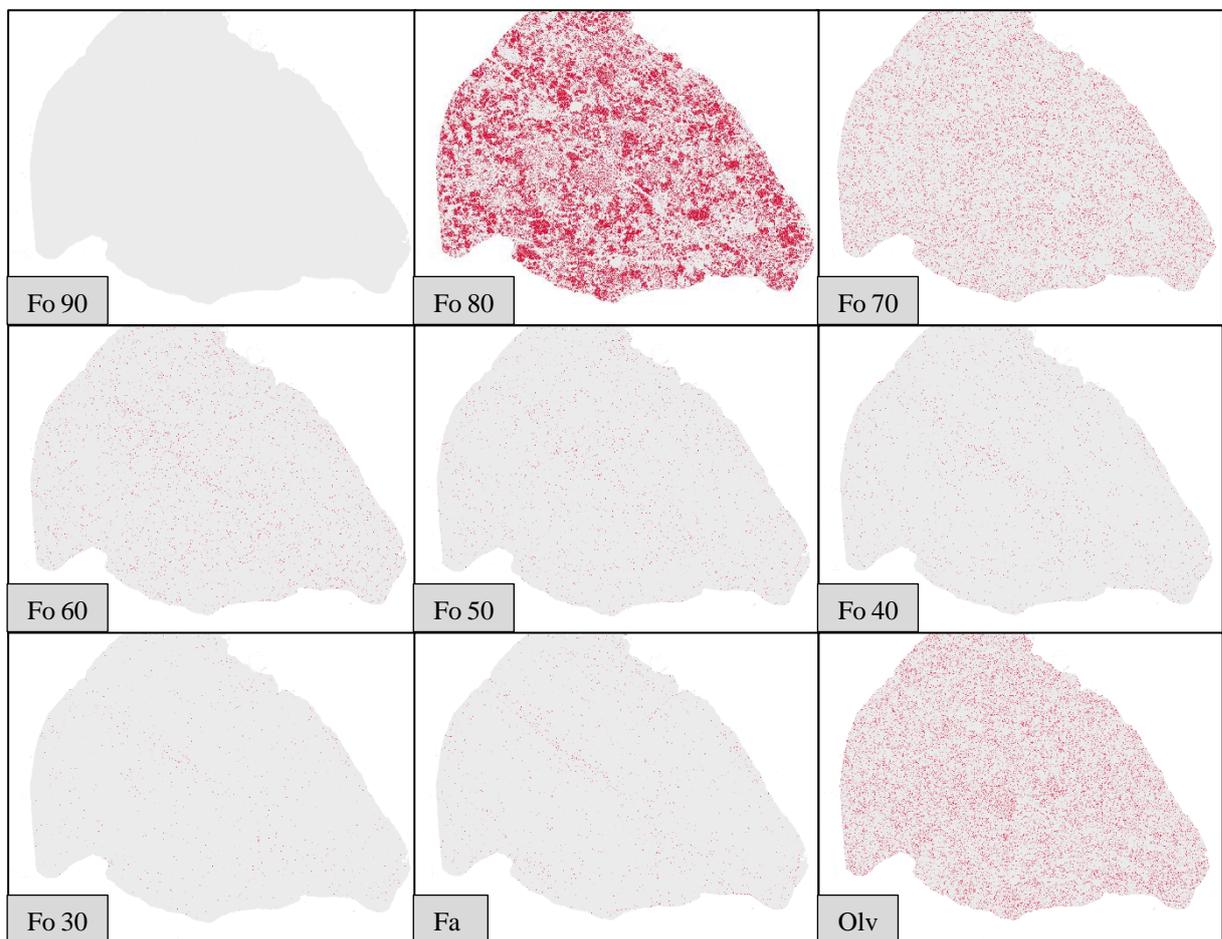


Figura 5.7: Mapas de composición de olivino para la muestra CAT-M9 obtenidos a partir de QEMSCAN. Expresado en términos de Fo: Forsterita y Fa: Fayalita. Olv corresponde a aquellos píxeles que no fueron asociados a ningún contenido de Fo.

5.2.2.2. Estado estructural de piroxenos bajos en Ca

La proporción de piroxeno monoclinico bajo en Ca y piroxeno ortorrómbico en los condritos se correlaciona con la progresiva recrystalización de este. El sistema cristalino monoclinico del piroxeno es el producto natural del enfriamiento necesario para producir cóndrulos, y el

piroxeno ortorrómbico puede representar la inversión del estado monoclinico metaestable en condiciones de alta temperatura sostenida (metamorfismo) (Reid y Fredriksson, 1967 en Van Schmus y Wood, 1967). En el caso de la muestra CAT-M9, la proporción de ortopiroxeno (19.63%) es predominante, con clinopiroxeno menor a 20% de abundancia (3.59%), lo que sugiere para el condrito CAT-M9, según los criterios de la Tabla 2.3, un tipo petrológico 5, 6 o 7.

5.2.2.3. Presencia y tamaño de feldespatos

Para el caso de la muestra CAT-M9, tampoco se pudo reconocer plagioclasa al microscopio óptico y el mapa mineralógica de falso color de QEMSCAN ® no clasificó cristales de feldespatos puesto que la Lista SIP ingresada incluye una sola fase mineral que involucra componentes de Ca-Al-Na y por ende no distingue entre plagioclasa primaria o secundaria. Este ítem no se puede analizar, por lo tanto.

5.2.2.4. Vidrio primario

La Lista SIP ingresada en este trabajo reconoce vidrio primario y secundario en conjunto, por lo tanto, no es posible analizar este criterio.

5.2.2.5. Contenido de Ni en minerales metálicos

Al no tenerse análisis puntuales que informen sobre la composición de los minerales ricos en Ni, no es posible analizar este criterio.

5.2.2.6 Contenido de Ni en minerales sulfurados

Los condritos que no han sufrido metamorfismo contienen sulfuros ricos en Ni (troilita, 1-3% de Ni; pentlandita, hasta un 45% de Ni) (Van Schmus y Wood, 1967). Para el condrito CAT-M9, el único sulfuro detectado es la troilita (FeS) y este no posee Ni en su composición, lo que indica una afinidad con los tipos petrológicos 4,5, 6 o 7. El único mineral que aporta con Ni en esta muestra corresponde a la aleación Fe-Ni.

5.2.2.7 Textura (integración cóndrulos-matriz)

Los condritos que no han sufrido metamorfismo contienen cóndrulos claramente delineados que están dentro de una matriz negra opaca. La ocurrencia de metamorfismo puede causar engrosamiento y homogenización de las texturas y por ende la matriz se observa fusionada con los cóndrulos, siendo estos apenas reconocibles.

Para el caso de la muestra CAT-M9, se logra identificar algunos cóndrulos pobremente definidos, donde solamente unos pocos están delineados, como se observa en la Figura 5.8, lo que se asocia a un tipo petrológico 5-6.

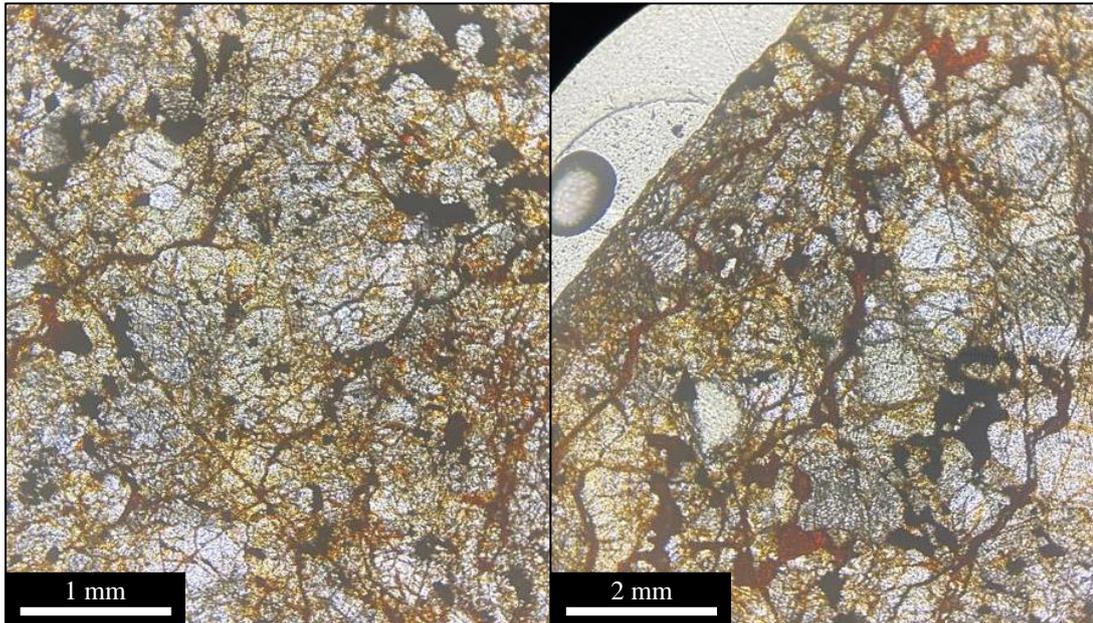


Figura 5.8: Integración matriz-cóndrulos de la muestra CAT-M9 en luz reflejada, con nicóles paralelos. Los cóndrulos no se encuentran definidos, es difícil distinguirlos.

5.2.2.8 Contenidos de C y H₂O

Tanto el contenido de H₂O como el contenido de C no son reportados en el análisis a través de QEMSCAN, por lo que este ítem no será considerado al considerar el tipo petrológico.

5.3. Evidencias de metamorfismo y caracterización del estado de choque

El estado de choque sufrido por un condrito ordinario fue definido por Stöffler y otros (1991) y se basa en los siguientes criterios: (1) efectos por equilibrio del peak de presión en olivinos y en plagioclasas, lo cual es un reflejo de la presencia de extinciones ondulosas, fracturas y mosaiquismo; (2) efectos resultantes de excursiones locales de P-T, lo cual se puede traducir en la presencia de venas opacas y bolsones de fundido principalmente; y en otros parámetros cuantitativos que corresponden a (3) presión de choque, (4) incremento de temperatura post choque y (5) incremento de temperatura mínima estimada. Los primeros dos criterios debieron ser evaluados con microscopía óptica y los mapas mineralógicos realizados a través de QEMSCAN® son complementarios.

5.3.1. Muestra CAT-M5

Se observó extinción ondulosa en algunos granos primarios de olivino (~2%), como se observa en la Figura 5.9 (a) y 5.9 (b). Además, una cantidad importante de cristales, principalmente de olivinos y piroxenos, se encuentran fracturados, tanto con fracturas irregulares (Figura 5.9 (c)) como con fracturas planares (Figura 5.9 (d)). La muestra CAT-M5 probablemente presente venas de choques, pero no se logran identificar debido a la pátina de grafito que presenta el corte transparente. En esta muestra además se observaron gotas de kamacita (Figura 5.9 (e)).

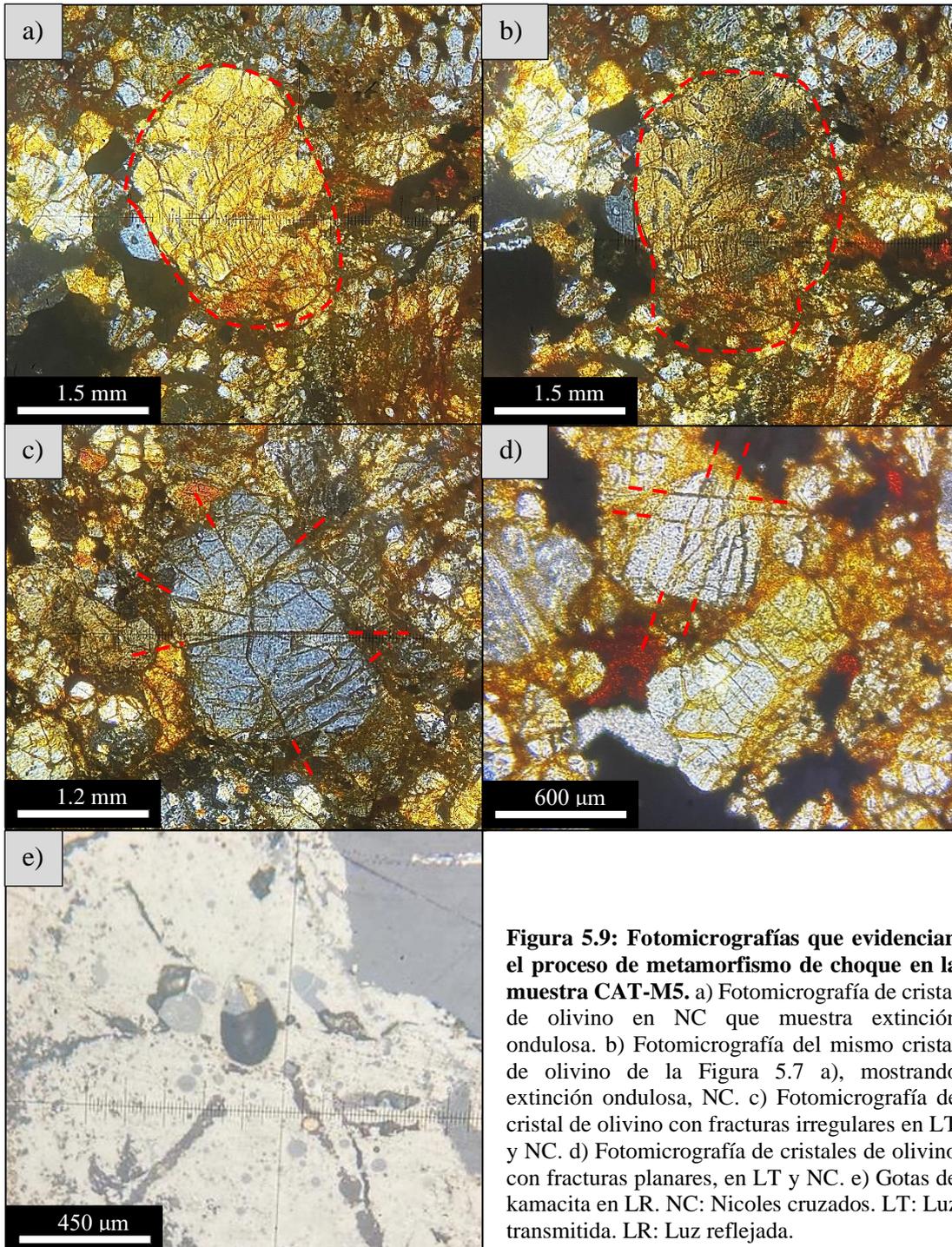


Figura 5.9: Fotomicrografías que evidencian el proceso de metamorfismo de choque en la muestra CAT-M5. a) Fotomicrografía de cristal de olivino en NC que muestra extinción ondulosa. b) Fotomicrografía del mismo cristal de olivino de la Figura 5.7 a), mostrando extinción ondulosa, NC. c) Fotomicrografía de cristal de olivino con fracturas irregulares en LT y NC. d) Fotomicrografía de cristales de olivino con fracturas planares, en LT y NC. e) Gotas de kamacita en LR. NC: Nícoles cruzados. LT: Luz transmitida. LR: Luz reflejada.

La muestra CAT-M5, según la clasificación de Stöffler y otros (1991), resumida en la Tabla 2.8, presenta un estado de choque S3, es decir, choqueado débilmente, en base a las características observadas, descritas en el párrafo anterior.

5.3.2. Muestra CAT-M9

Existe extinción ondulosa de manera pervasiva en los cristales de silicatos de esta muestra, como se puede observar en las Figuras 5.10 (a) y 5.10 (b). Además, se observaron abundantes fracturas planares (Figuras 5.10 (c) y 5.10 (d)). Fracturas irregulares no se identificaron.

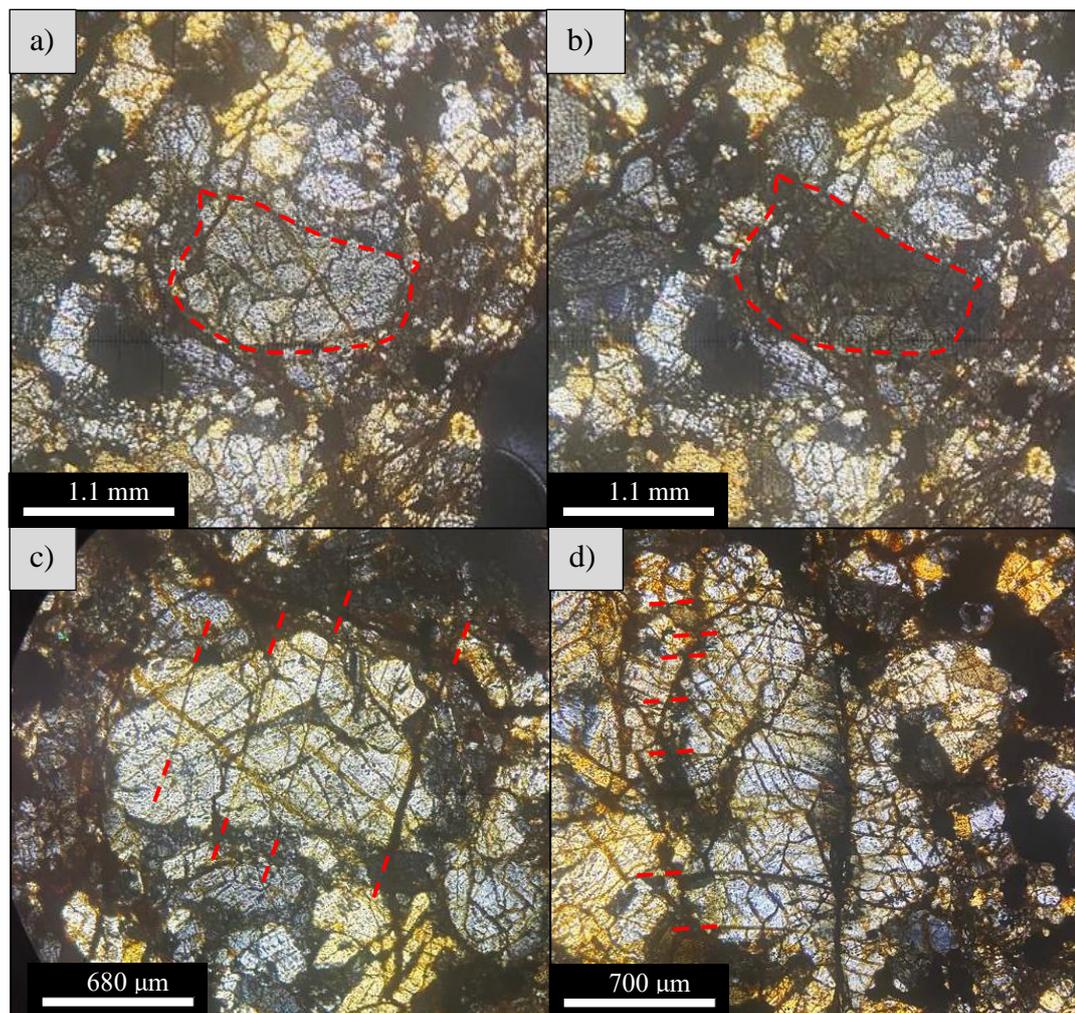


Figura 5.10: Fotomicrografías que evidencian el proceso de metamorfismo de choque en la muestra CAT-M9. a) Fotomicrografía de cristal de olivino en LR y NC. b) Fotomicrografía del mismo cristal de olivino de la Figura 5.7 a), mostrando extinción ondulosa, en LR y NC. c) Fotomicrografía de cristal de olivino con fracturas planares en LR y NC. d) Fotomicrografía de cristales de olivino con fracturas planares, en LR y NC. NC: Nícoles cruzados. LR: Luz reflejada.

La muestra CAT-M9, según la clasificación de Stöffler y otros (1991), resumida en la Tabla 2.8, presenta un estado de choque S4 (choqueado moderadamente) o mayor, en base a las únicas dos características observadas: extinción ondulosa pervasiva y fracturas planares abundantes.

El mosaiquismo y las venas de choque no se pudieron observar debido a la pátina de grafito que presenta el corte transparente.

5.4. Procesos de meteorización terrestre

La escala establecida por Wlotzka (1993, en Ulloa 2017) para cuantificar el grado de meteorización terrestre, resumida en la Tabla 2.9, se asocia al porcentaje de minerales con contenido de Fe (Fe-Ni metálico, troilita, olivino y piroxeno) que son afectados por la meteorización.

La lista SIP elaborada y utilizada en este trabajo no permite diferenciar la clase de mineral secundario que altera al mineral primario, sin embargo, se creó un clúster que agrupara a todos aquellos minerales de alteración, reconocidos *a priori* como óxidos e hidróxidos de Fe según los elementos que lo componen.

Valenzuela (2011) describe distintos dominios de meteorización que sufren los condritos ordinarios del desierto de Atacama, correspondiendo a (1) venillas de meteorización; (2) reemplazo en halos alrededor de los minerales opacos y (3) reemplazo intramineral dentro de los minerales opacos.

5.4.1. Muestra CAT-M5

De acuerdo a los dominios de meteorización descritos por Valenzuela (2011), en el mapa mineralógico elaborado por QEMSCAN, se distingue el desarrollo de una familia principal de venas de meteorización en la muestra CAT-M5 (Figura 4.3), las cuales están siendo parcialmente rellenadas por óxidos e hidróxidos de Fe (Figura 5.11 (a) y (b)). Además, se observan reemplazos parciales en ciertos cristales de kamacita, que comienzan desde los bordes (Figura 5.11 (c) y (d)). Lo anterior es consistente con lo descrito por Valenzuela (2011), donde se menciona que en general, el Fe-Ni se corroe más rápidamente que la troilita, que puede sobrevivir sin corrosión cuando el Fe-Ni ha sido reemplazado hasta ~50%. En este caso, la troilita se ve afectada por halos de alteración, pero en menor proporción al ser comparado con la kamacita (Figura 5.11 (e) y (f)). Las fases silicatadas en esta muestra no se ven afectadas por meteorización terrestre.

Se estima que el reemplazo mineral ya sea por halos de alteración o por el relleno de vetillas, afectó a entre el 20% y 30% de los minerales opacos, de forma baja a moderada, siendo más

afectadas las fases metálicas Fe-Ni por sobre la troilita. Según el criterio de Wlotzka (1993), esto correspondería a un grado de meteorización W2, es decir, ocurre una oxidación moderada.

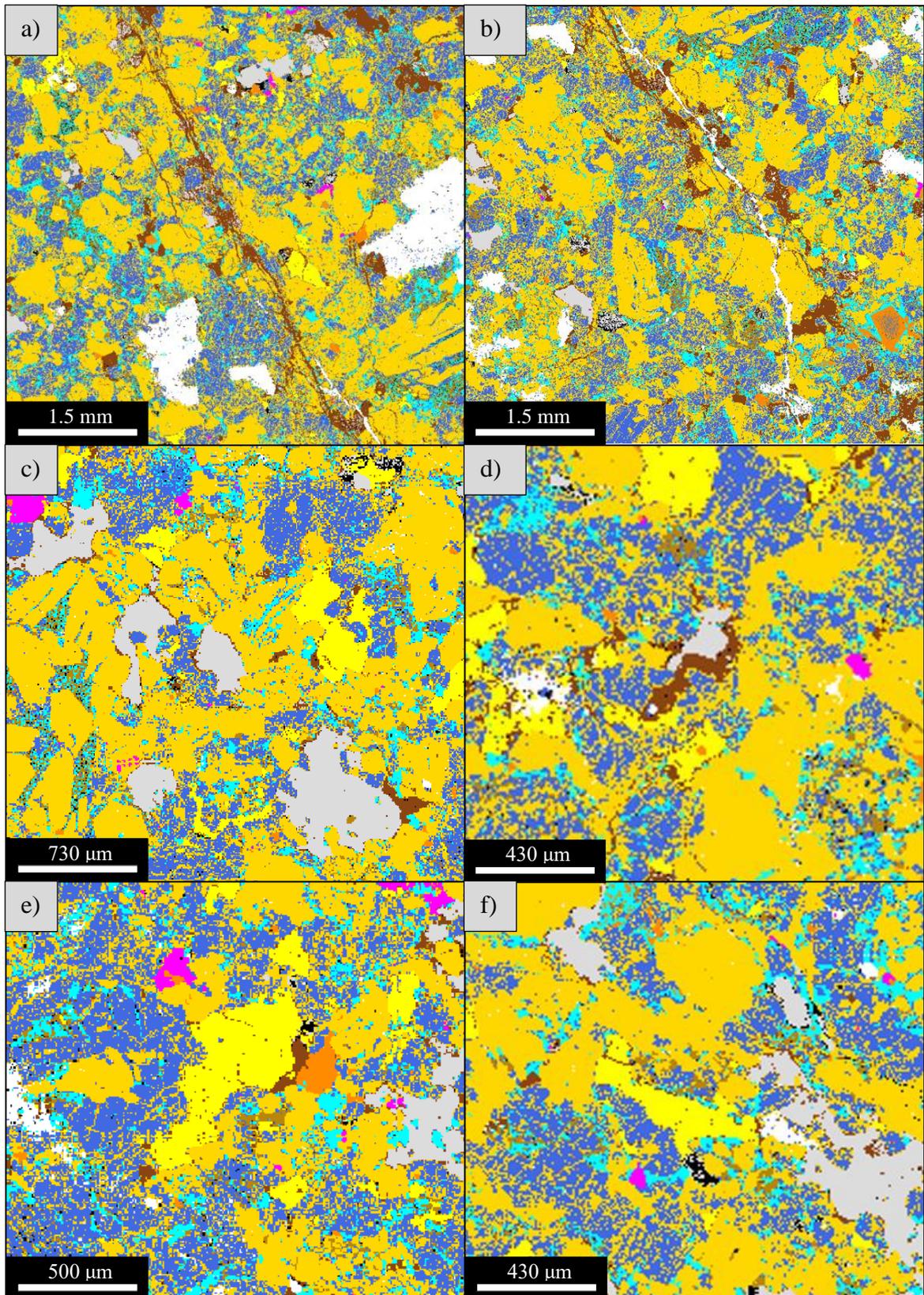


Figura 5.11: Secciones del mapa en falso color elaborado por QEMSCAN caracterizando el grado de meteorización en la muestra CAT-M5. a) Sección que muestra una parte de la familia principal de venillas de meteorización. Se caracteriza por presentar formas onduladas e irregulares. La mayor parte de la venilla

está siendo rellenada por óxidos de Fe, probablemente provenientes del reemplazo de alguna fase metálica. b) Sección de venilla de forma irregular. En este caso, la venilla no está siendo rellenada por alguna fase de óxidos. c) Sección del mapa mineralógico de QEMSCAN que muestra la meteorización de la kamacita desde los bordes. d) Cristal de kamacita siendo reemplazado por óxidos de Fe. e) Cristal de troilita siendo débilmente reemplazado por óxidos de Fe. f) Cristal de troilita casi sin sufrir reemplazo de óxidos de Fe. A su derecha, un cristal de kamacita que sí sufre mayor reemplazo. La leyenda de colores se presenta en la Figura 4.3.

5.4.2. Muestra CAT-M9

La muestra CAT-M9 contiene una importante presencia de venas que están siendo rellenadas casi totalmente por óxidos e hidróxidos de Fe (Figura 5.12 (a) y 5.12 (b)). Se observan 4 familias principales (Figura 4.4). Los cristales de kamacita están siendo levemente y totalmente reemplazados por óxidos de Fe desde sus bordes (Figura 5.12 (c) y 5.12 (d)). En las fases silicatadas se observa evidencia de productos de alteración, representados por ocurrencia de óxidos de Fe asociado al relleno de las fracturas internas de los estos minerales (Figura 5.12 (e) y 5.12 (f)). El olivino resulta ser el silicato que más susceptible es a esta meteorización.

Para este caso, la meteorización por venillas es dominante, en contraste con la meteorización por halos de reemplazo. Además, en la muestra CAT-M9, los minerales silicatados resultan afectados, lo cual no ocurre en la muestra CAT-M5. Por estos motivos, según los criterios descritos por Wlotzka (1993), la muestra CAT-M9 presenta un grado de meteorización W5, caracterizado por el inicio de la alteración de silicatos máficos.

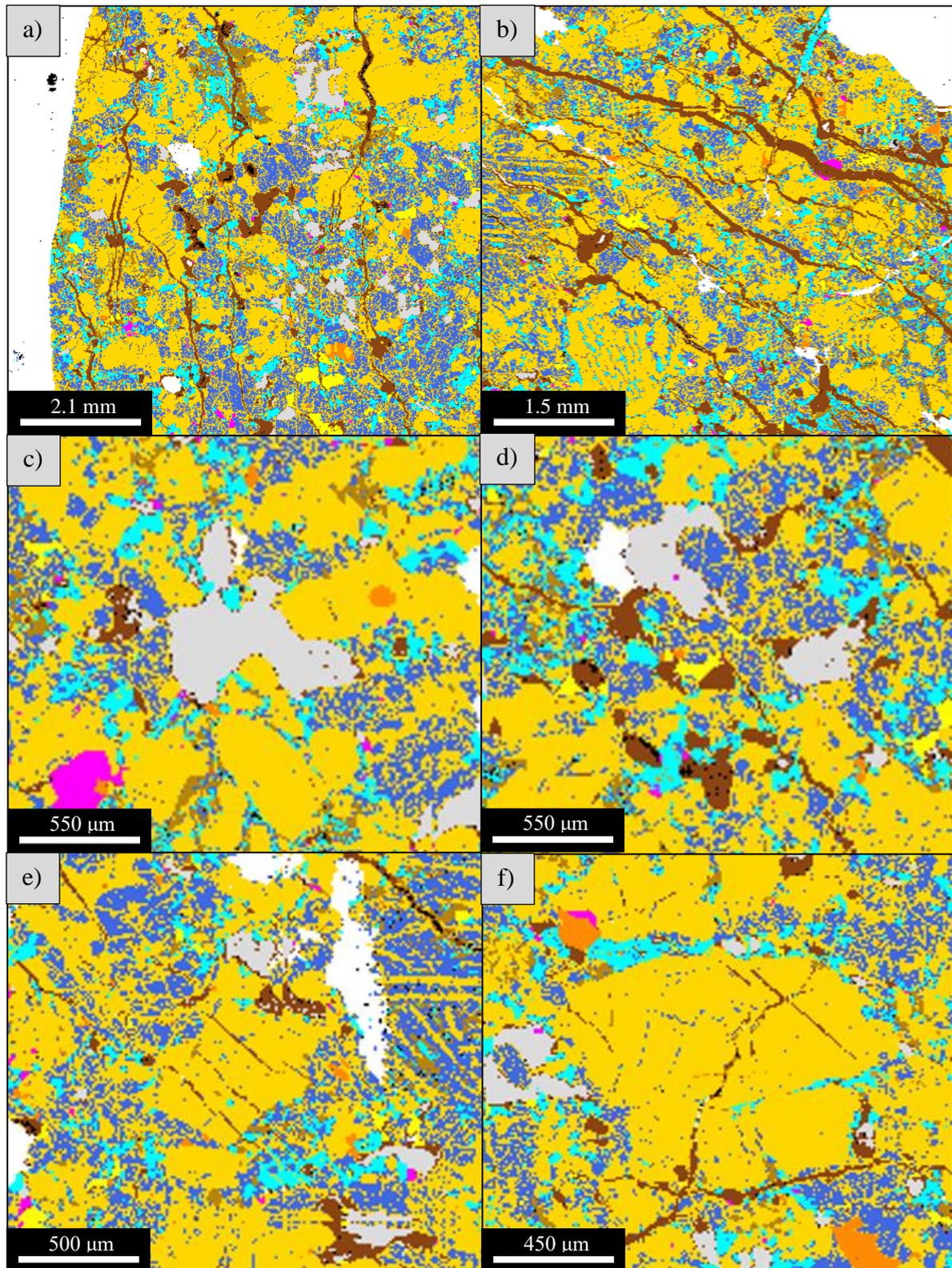


Figura 5.12: Secciones del mapa en falso color elaborado por QEMSCAN caracterizando el grado de meteorización en la muestra CAT-M9. a) Sección que muestra una familia principal de venillas de meteorización. Se caracteriza por presentar formas onduladas e irregulares. La mayor parte de la venilla está siendo rellenada por óxidos de Fe. b) Sección de una segunda familia de venas de meteorización rellenas por óxidos de Fe. c) Cristal de kamacita siendo parcialmente reemplazado por óxidos de Fe (en halo). d) Cristales totalmente reemplazados por óxidos de Fe. Probablemente inicialmente eran kamacita. e) Cristal de olivino que contiene fracturas rellenas por óxidos de Fe. f) Segundo cristal de olivino que contiene fracturas rellenas por óxidos de Fe. La leyenda de colores se presenta en la Figura 4.3.

6. DISCUSIÓN

6.1. Evaluación de reclasificación a través de nueva lista SIP: comparaciones con microscopía óptica

Una vez obtenidos los mapas mineralógicos QEMSCAN a partir de la lista SIP creada en este trabajo, se comparó el resultado con mineralogía óptica, con el fin de evaluar la efectividad de las clasificaciones. En la Figura 6.1. se muestran algunos ejemplos de estas comparaciones para la muestra CAT-M5 y en la Figura 6.2. las de la muestra CAT-M9.

A modo general, las clasificaciones son correctas. La distinción entre olivinos y ortopiroxenos pese a ser minerales químicamente muy similares, es satisfactoria, como se observa en las Figuras 6.1 y 6.2. Sin embargo, la correcta clasificación del vidrio que está presente en cóndrulos no siempre se cumple, y QEMSCAN reconoce algunas veces a este material como algún silicato magnésico, como se observa en las Figuras 6.1 y 6.2. La clasificación de las fases minerales apatito, cromita, Fe-Ni y troilita son muy satisfactorias al aparecer en el mapa QEMSCAN como cristales sólidos y homogéneos, lo cual se debe a que la química de estas fases minerales es distintiva y por ende no trae confusiones al momento de clasificar.

Como primer acercamiento, la clasificación en base a la lista SIP realizada en este trabajo, es bastante consistente con lo observado al microscopio óptico, como se evidencia en las Figuras 6.1 y 6.2.

6.2. Evaluación de reclasificación a través de nueva lista SIP: comparaciones con microscopía electrónica de barrido (SEM: *Scanning Electron Microscopy*)

A modo de dar una mayor confiabilidad a la clasificación de fases minerales llevada a cabo por QEMSCAN, se hizo una comparación de la mineralogía reconocida por esta herramienta con la química que entrega la microscopía electrónica de barrido (SEM) de manera puntual. A continuación, se muestran comparaciones realizadas para la muestra CAT-M5 (Figura 6.3) y los resultados químicos del análisis puntual por punto en la Tabla 6.1, junto con material complementario en el Anexo 4.

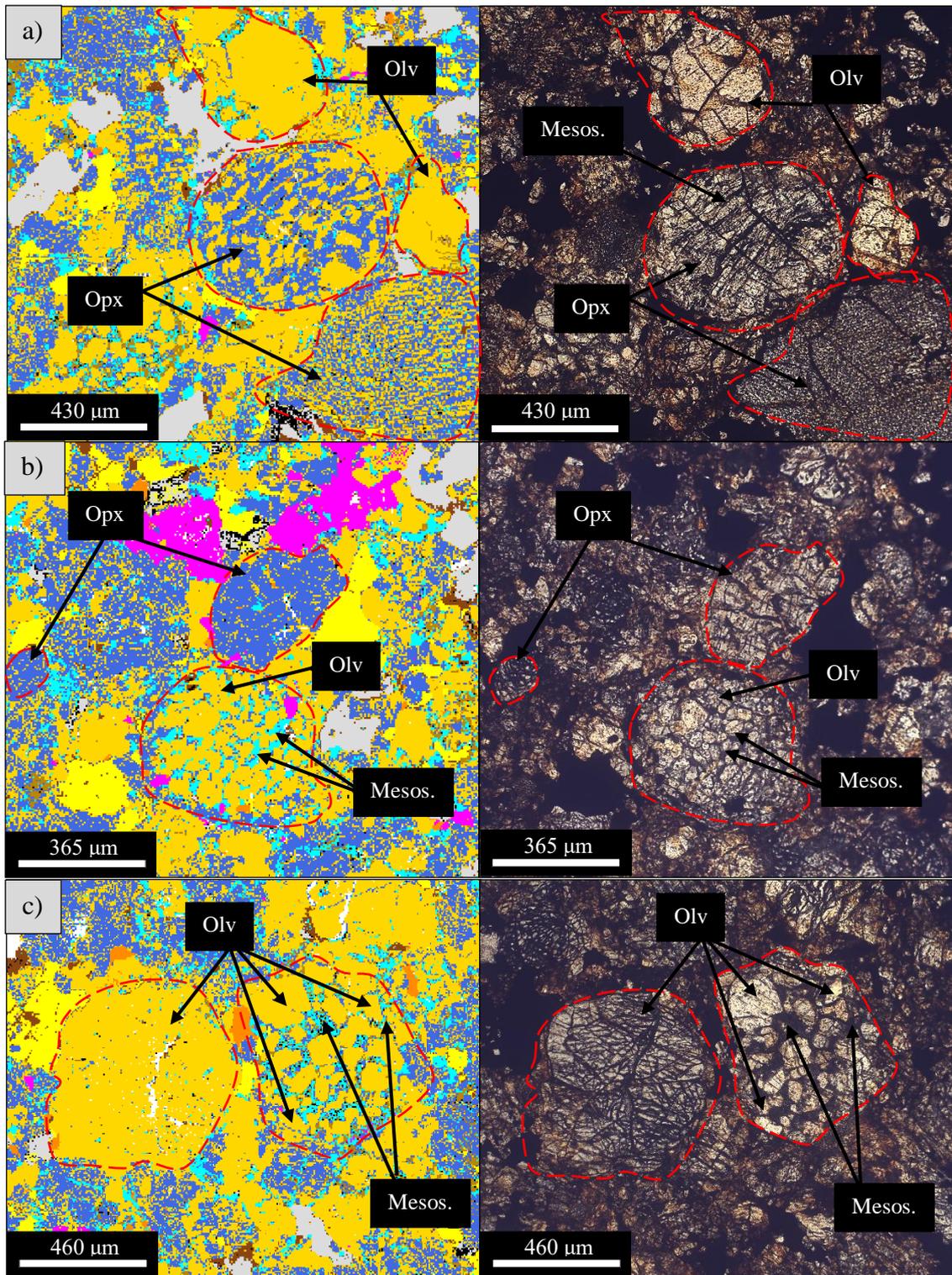


Figura 6.1: Comparaciones entre clasificación de QEMSCAN® con fotomicrografías ópticas con luz transmitida, bajo LPP para la muestra CAT-M5. a) Se reconocen de buena manera cóndrulos de olivino y de ortopiroxeno, sin embargo, el vidrio (mesostasis) que ocurre entre las fibras de ortopiroxeno no es bien reconocido por QEMSCAN®, definiéndose como olivino. b) Buen reconocimiento de cóndrulos de ortopiroxeno y de cóndrulo porfírico de olivino. El vidrio que rellena los espacios de este último cóndrulo, si es bien reconocido por QEMSCAN®. c) Buen reconocimiento de cóndrulos de olivino. El cóndrulo observado a la derecha presenta textura porfírica y el vidrio que rellena dichos espacios es bien reconocido por QEMSCAN®. El cóndrulo de la izquierda observado en la fotomicrografía se caracteriza por presentar alto relieve, lo que permite diferenciar microscópicamente a los silicatos magnésicos. La leyenda de colores se observa en la Figura 4.3.

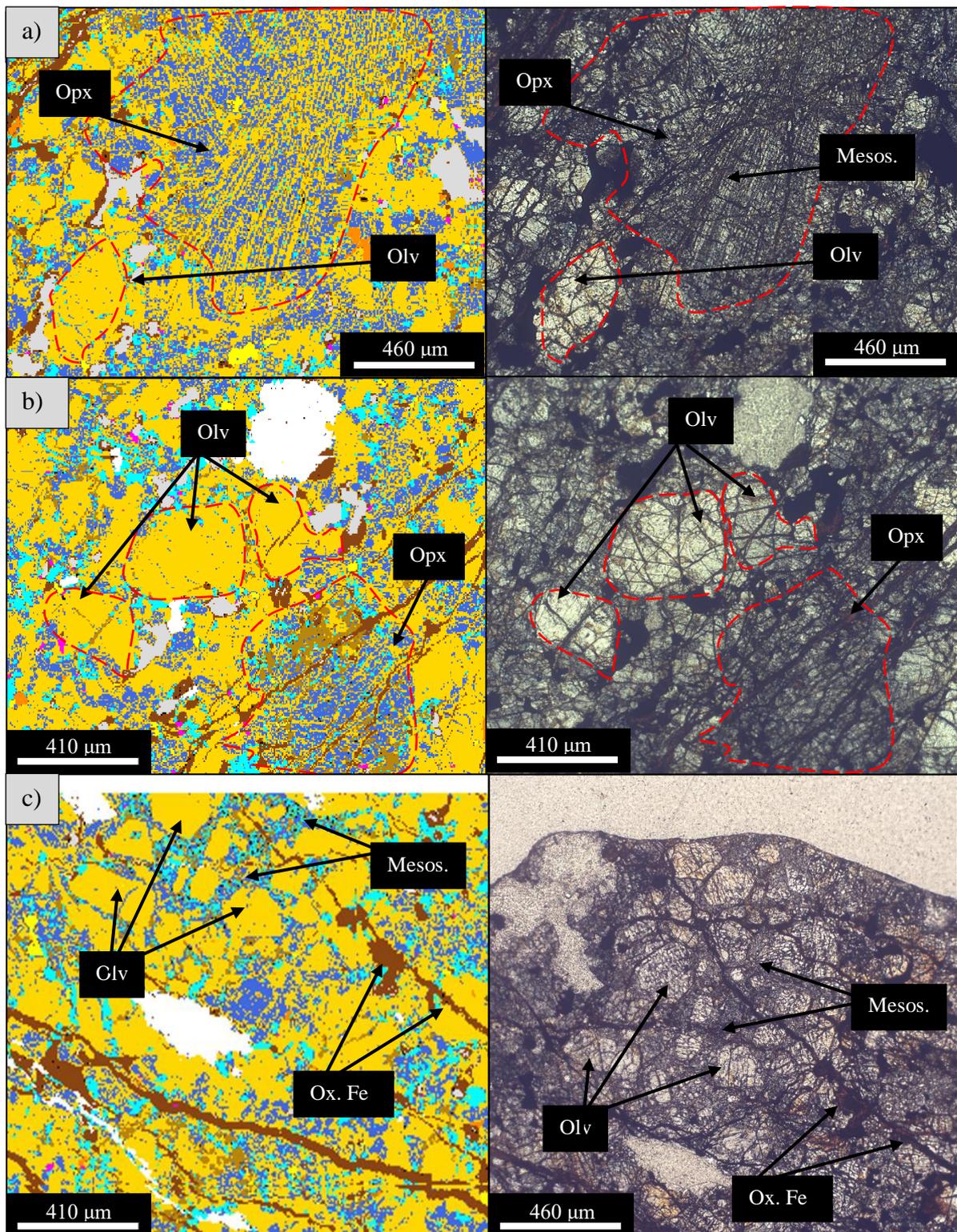


Figura 6.2: Comparaciones entre clasificación de QEMSCAN® con fotomicrografías ópticas con luz transmitida, bajo LPP para la muestra CAT-M9. a) Buen reconocimiento de cóndrulo de olivino y ortopiroxeno. El vidrio que ocurre entre las fibras de piroxeno sin embargo, no es reconocido por QEMSCAN®, siendo reconocido como olivino. b) Se reconocen de manera realista cóndrulos de olivino y de ortopiroxeno. En el mapa mineralógico de QEMSCAN® además, sobre el cristal de ortopiroxeno, se observa clinopiroxeno, lo cual no se distingue bien de manera óptica ni por lo tanto en la fotomicrografía. c) Buen reconocimiento de cóndrulo porfirico, con sus olivinos y mesostasis. Se reconocen de buena manera los óxidos de Fe que rellenan las vetillas. La leyenda de colores se muestra en la Figura 4.4.

Este análisis permite comprobar que la clasificación realizada por QEMSCAN, a modo general, es consistente con la mineralogía de las muestras. Los silicatos olivino y ortopiroxeno pese a tener composiciones químicas muy similares (se componen por los mismos elementos químicos), presentan diferencias cuantitativas en sus composiciones. En todos estos análisis puntuales, se muestra que el olivino presenta un contenido de Si menor que el ortopiroxeno y un mayor contenido de Mg (Tabla 6.1). Por lo que fue consecuente considerar las razones de $Fe/Fe+Si$ y $Mg/Mg + Si$ en la elaboración de la lista SIP. Además, el ortopiroxeno presenta un importante contenido de Ca, no así el olivino.

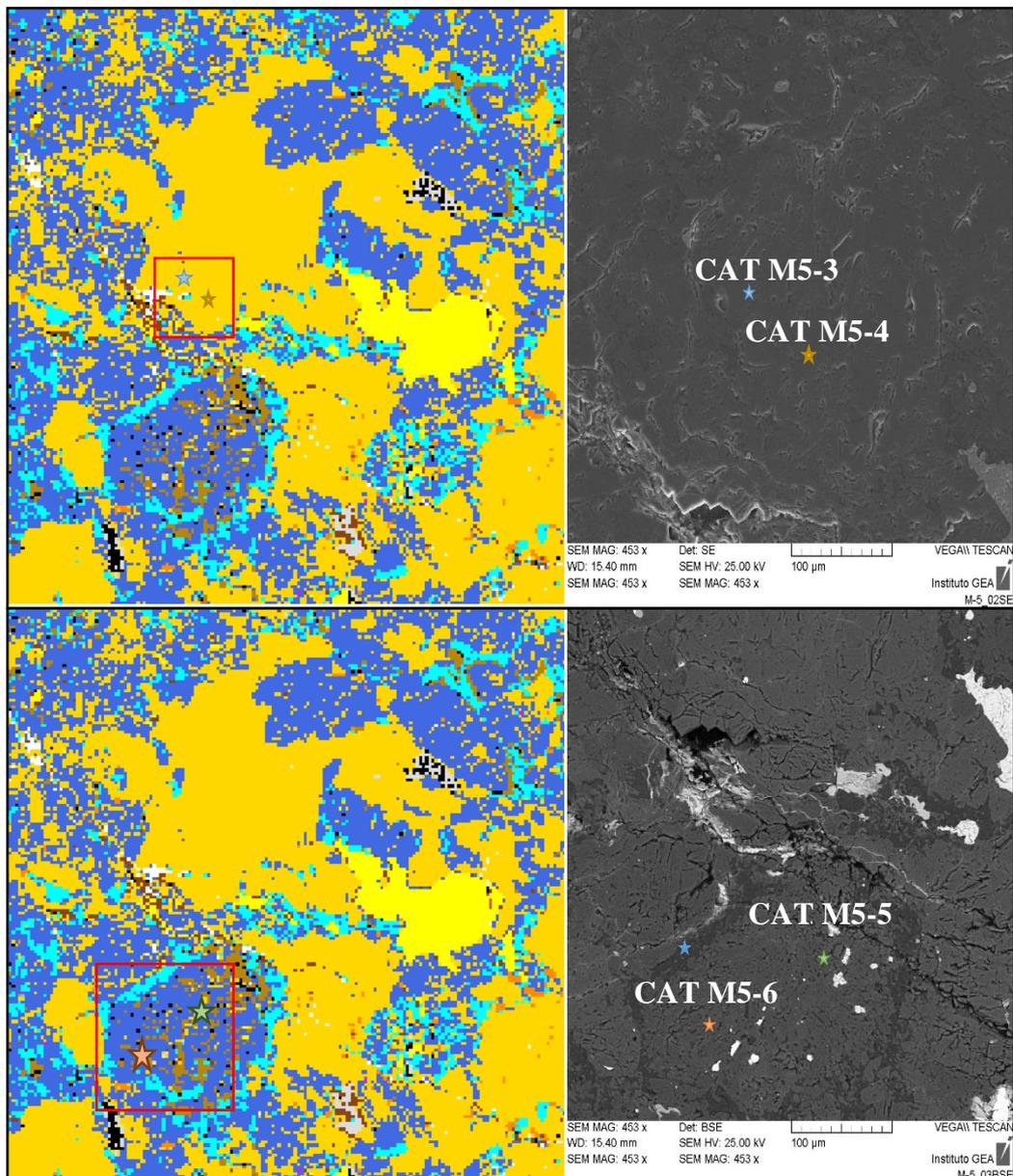


Figura 6.3: Comparaciones entre clasificación de QEMSCAN® (izquierda) con análisis puntuales realizados con microscopía electrónica de barrido (SEM) (derecha). Las estrellas indican los puntos que fueron medidos con SEM; además se indica el código asignado a cada medición.

Figura 6.3 continuación.

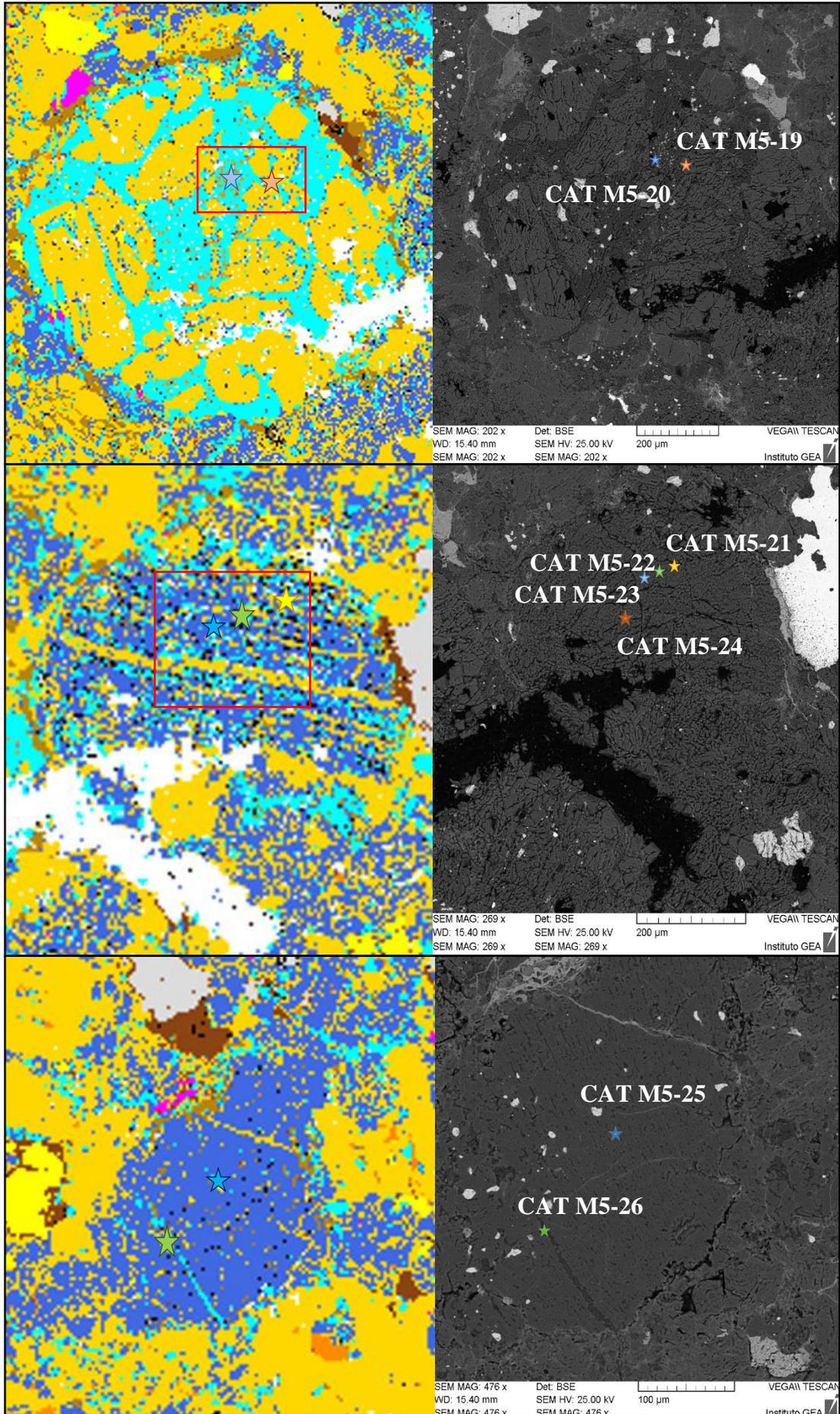
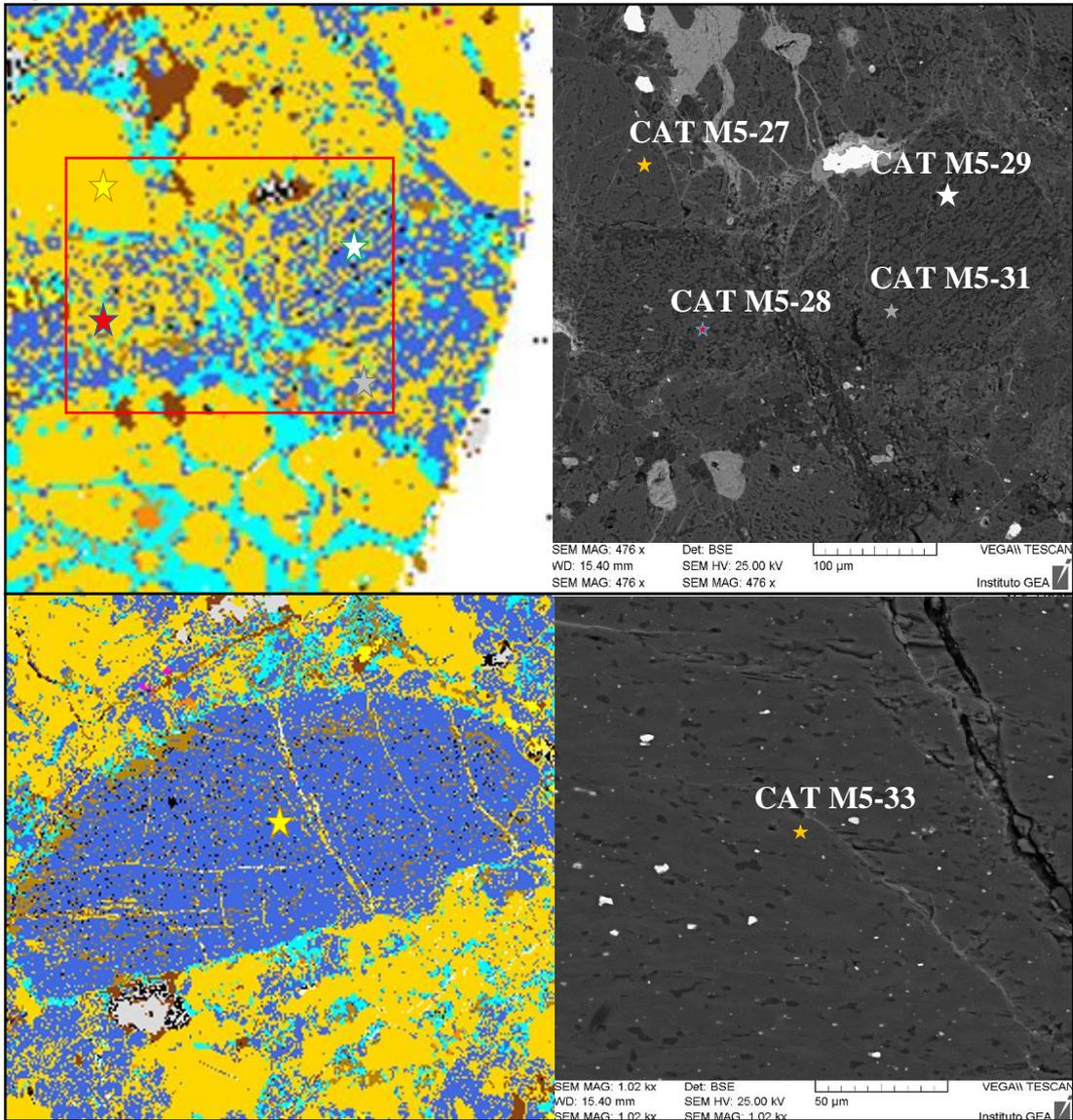


Figura 6.3 continuación.



6.3. Aportes mapa mineralógico en falso color en clasificaciones

En cuanto a la clasificación química de las muestras analizadas en este trabajo, el mayor aporte de información ocurrió mediante los datos químicos que entrega iDiscover, una vez se pudo realizar en trabajo estadístico. Para esta clasificación, el mapa mineralógico aporta indirectamente, puesto que fue de utilidad al momento de verificar y contrastar esta información química, con lo que se observaba al microscopio óptico o mediante los análisis puntuales.

En la clasificación petrológica, algunos parámetros como por ejemplo la presencia de feldespatos y vidrio, pueden ser analizados mediante el mapa mineralógico en falso color (aunque en este trabajo no se realizó la distinción química entre feldespatos y vidrio). Por otra parte, un criterio importante en esta clasificación es la textura (integración cóndrulos - matriz), y para poder definirla, el mapa mineralógico es un gran aporte, pues permite tener una mejor visualización del corte transparente al darle contrastes a los granos minerales. Además, en el caso de no tener análisis puntuales químicos que permitan conocer la dispersión en la composición de los olivinos, de manera cualitativa se puede, en base a mapas mineralógicos que muestren la disposición de las soluciones sólidas, analizar la dispersión en la composición de olivinos, como se realizó en la muestra CAT-M9.

El grado de choque, se define principalmente con la ayuda del microscopio óptico, puesto que se evalúa en base a criterios que no pueden ser analizados mediante el mapa mineralógico en falso color, como lo es la extinción ondulosa y el mosaiquismo, además de las venas opacas y bolsones de fundido. Sin embargo, otros criterios como la presencia de fracturas y algunas veces los mismos bolsones de fundido, pueden ser reconocidos con el mapa mineralógico.

En la definición del grado de meteorización, el aporte de la imagen en falso color es fundamental, porque esta herramienta permite ver de manera muy sencilla la presencia de mineralogía secundaria y su distribución, ya sea en venillas, reemplazos en halos alrededor de minerales opacos o como reemplazos intramineral dentro de los minerales opacos.

Los mapas mineralógicos en falso color, por lo tanto, permiten inferir procesos del cuerpo parental de manera general, además de conceder la información necesaria para definir si ocurrió o no meteorización terrestre. A grandes rasgos, si la imagen muestra fracturas, claramente se infiere que el meteorito sufrió un grado de choque importante. Si se ve una buena integración cóndrulo – matriz, se sabe que la muestra tiene un tipo petrológico mayor y si hay mineralogía

secundaria, y dependiendo de sus texturas, se sabe que sufrió meteorización terrestre. Todo lo anterior debe ser analizado con mayor detalle, pero la imagen en falso color, funciona muy bien como un primer acercamiento para conocer la historia del cuerpo parental.

6.4. Alcances y limitaciones de la técnica QEMSCAN

QEMSCAN[®] resulta ser una herramienta que permite llegar a una clasificación química de meteoritos de manera general. Sin embargo, los pasos para cumplir este objetivo, no son sencillos. En primer lugar, la elaboración de una lista SIP a partir de estadística, es un procedimiento que requiere de estudio y, además, puede llegar a ser largo y engorroso. Este trabajo estadístico puede realizarse a partir de dos tipos de datos: intensidades de peaks o química. En este trabajo se utilizó lo primero, debido a que corresponde a la lectura directa que realiza QEMSCAN, y no a una transformación de valores que realiza el mismo software, sin que el usuario tenga algún control sobre ello. El hecho de trabajar estadísticamente con la química, probablemente arroje un mayor grado de imprecisión en el resultado final.

Por otra parte, para poder conocer el contenido de soluciones sólidas (forsterita/fayalita y ferrosilita/enstatita), se requiera probablemente de otras técnicas más precisas (análisis puntual SEM). En cuanto a la factibilidad de realizar con QEMSCAN una lista SIP completa, que incluya soluciones sólidas en base a intensidades de peaks, sería un trabajo complejo. Este procedimiento podría llevarse a cabo recogiendo solamente los datos asociados a los píxeles reconocidos en una primera instancia como olivinos, y analizarlos estadísticamente. El procedimiento sería muy similar a lo realizado en este trabajo, sin embargo, el número de clústeres, podría llegar a 100, teniendo en cuenta que las soluciones van desde un 0% a un 100% de forsterita o de fayalita. Mediante herramientas estadísticas de agrupamiento, habría que buscar el número mínimo de clústeres que se puedan definir y a partir de esto, se podrían tener las fases minerales. En base a la química de ellas (que entrega complementariamente QEMSCAN), se debería poder definir el nombre de dichas fases, es decir, conocer el contenido de forsterita o de fayalita con las que se definió. Lo mismo se debería hacer con los píxeles asociados a ortopiroxenos.

Además, el software de procesamiento de datos iDiscover, debe ser utilizado con precaución ya que mucha de la información final que entregará, dependerá de cómo se utiliza, por ejemplo, en el orden jerárquico que se les otorgue a las fases minerales en la lista SIP, o de las fórmulas químicas que se designen a las fases minerales.

Las ventajas de QEMSCAN, se centran en que se trata de una técnica no destructiva. Además, entrega un mapa mineralógico en falso color, donde la mineralogía es reconocida sencillamente, a diferencia del reconocimiento a través del microscopio óptico, técnica con la cual es difícil reconocer la mineralogía de meteoritos debido a sus alteraciones. QEMSCAN permite además reconocer texturas de manera sencilla, lo que es bastante útil al realizar una clasificación de acuerdo al grado de meteorización y grado de choque, lo que permite tener un primer acercamiento hacia la historia geológica del cuerpo parental. Otra de las ventajas de esta técnica, es que entrega información química por elemento y por minerales, adecuándose con lo que el usuario ingresa. Una vez se tiene una lista SIP completa y adecuada, la técnica y la información que entrega, resulta ser de rápido procesamiento y resulta de mucha utilidad en una primera instancia.

6.5. Recomendaciones

Se sugiere que se siga empleando QEMSCAN como herramienta para clasificar meteoritos, sin embargo, la lista SIP elaborada en este trabajo debe ser mejorada, por ejemplo, con una integración de datos únicamente provenientes de la información original de la lectura de muestras. Esto quiere decir, que, con otra herramienta, microscopía electrónica de barrido (SEM), por ejemplo, se reconozca la química de cientos de puntos de olivinos y ortopiroxenos, con el fin de elaborar un patrón de las soluciones sólidas que forman a estos elementos o hacer un nuevo análisis estadístico que solamente incluya los píxeles de olivino y de ortopiroxeno de manera separada, con el fin de agrupar estos píxeles de acuerdo a sus contenidos de fayalita - forsterita y enstatita - ferrosilita. Lo mismo se puede hacer con el vidrio; el vidrio aquí reconocido incluye tanto vidrio primario como secundario, y lo ideal sería tener ambos clústeres o fases minerales por separado. Se propone, además, que este trabajo pudiera realizarse en colaboración con la Universidad Católica del Norte, con el fin de tener una lista SIP en común, elaborada bajo las mismas técnicas.

Otra importante sugerencia radica en que se debe encontrar una muestra lo bastante fresca para realizar o mejorar la lista SIP, con el fin de que no existan grandes alteraciones químicas en el espécimen, que puedan afectar la química total de la muestra. Además, se podría integrar la información en una lista SIP proveniente de varias muestras, con el propósito de que existan datos de los tres grupos de condritos: L, LL y H.

7. CONCLUSIONES

QEMSCAN® sirve para hacer una clasificación química de meteoritos, pero debe ser complementada con otras técnicas de forma inicial. La lista SIP se puede crear en base a estadística, pero no con un nivel de precisión que entregue la información de soluciones sólidas. Se sugiere que, en una próxima etapa, el reconocimiento de los parámetros químicos de forsterita/fayalita y enstatita/ferrosilita, se haga en base a microscopía electrónica de barrido (SEM), con un análisis de cientos de puntos, para luego ser integrado a QEMSCAN. El grado de choque no puede ser definido usando QEMSCAN ya que se necesita ver propiedades en el microscopio óptico como extinción ondulosa, venas de choque, entre otras, pero sí funciona como técnica complementaria. Además, se recomienda para el futuro, mejorar la lista SIP creando clústeres separados para vidrio primario y secundario, con el fin de caracterizar mejor el metamorfismo de choque. El grado de meteorización por su parte, cualitativamente sí puede ser definido en base a los productos entregados por QEMSCAN.

A modo general, la muestra CAT-M5 se encuentra menos afectada por procesos posteriores a su formación, si se la compara con la muestra CAT-M9. La muestra CAT-M5 si conserva su textura condritica original, mientras que en la muestra CAT-M9, es difícil reconocer cóndrulos. Esta última muestra, además, presenta muchas venas de meteorización que son rellenadas actualmente por óxidos de Fe, lo que indica una fuerte meteorización terrestre, además, la misma muestra sufrió fuertes procesos de metamorfismo de choque al presentar casi el total de sus cristales silícicos con extinción ondulosa, además de fracturas planares.

En cuanto a la clasificación química, la muestra CAT-M5, dependiendo del diagrama utilizado, resultó con distintas clasificaciones. El diagrama de Valenzuela (2003, con los datos de Von Michaelis y otros, 1969) clasificó a esta muestra como condrito ordinario, lo que es consistente con la textura condritica observada en la muestra. Además, este mismo diagrama, que tiene como parámetros las relaciones Mg/Si vs Al/Si y Mg/Si vs Fe/Si, clasifica a la muestra CAT-M5 como condrito ordinario del grupo L/LL. El diagrama de Van Schmus y Wood (1967), de parámetros Fe^0/Fe vs Fe/SiO_2 , arroja una clasificación en el grupo de los condritos L para la muestra CAT-M5, lo cual es consistente con la clasificación de Valenzuela (2003). Un segundo diagrama de clasificaciones (Van Schmus y Wood, 1967), de parámetros Fa vs Fe^0/Fe , indica que la muestra pertenece al grupo L, siendo consistente con las dos clasificaciones descritas anteriormente. Por último, el diagrama Fs vs Fa de Valenzuela (2003, con los datos de Keil y Fredriksson, 1964 y Fredikkson y otros, 1968), indica que la muestra

CAT-M5 se trata de un condrito del grupo LL. Se concluye, por lo tanto, que la muestra CAT-M5 corresponde a un condrito de la clase ordinaria, del grupo L/LL. La muestra CAT-M9, dependiendo del diagrama utilizado, también resultó con distintas clasificaciones químicas. El diagrama de Valenzuela (2003, con los datos de Von Michaelis y otros, 1969) clasificó a esta muestra como condrito ordinario, lo que es consistente con la textura condritica de la muestra. Además, este mismo diagrama, que tiene como parámetros las relaciones Mg/Si vs Al/Si y Mg/Si vs Fe/Si, clasifica a la muestra CAT-M9 como condrito ordinario del grupo H. El diagrama de Van Schmus y Wood (1967), de parámetros Fe^0/Fe vs Fe/SiO_2 , arroja una clasificación en el grupo de los condritos L, para la muestra CAT-M9, lo cual difiere de la clasificación del grupo H arrojado en el diagrama de Valenzuela (2003). Además, el parámetro Fe/SiO_2 , proyecta a la muestra en el campo de los condritos carbonáceos. Lo anterior tiene su explicación en una sobre-estimación en dicho parámetro (Fe/SiO_2), debido a que la muestra presenta un alto contenido de Fe que proviene de los óxidos de Fe producidos durante los procesos de meteorización terrestre. Si se toma en cuenta solo el eje de las ordenadas, el parámetro Fe^0/Fe , indicaría que la muestra se trata de un condrito del grupo L o LL. Un segundo diagrama de clasificaciones (Van Schmus y Wood, 1967), de parámetros Fa vs Fe^0/Fe , indica que la muestra pertenece al grupo LL, siendo consistente con la primera clasificación de Van Schmus y Wood (1967), pero no con la de Valenzuela (2003). Por último, el diagrama Fs vs Fa de Valenzuela (2003, con los datos de Keil y Fredriksson, 1964 y Fredriksson y otros, 1968), indica que la muestra CAT-M9 se trata de un condrito del grupo LL. Se concluye, por lo tanto, que la muestra CAT-M9 corresponde a un condrito de la clase ordinaria, del grupo LL.

En cuanto a la clasificación del tipo petrológico (Van Schmus y Wood, 1967), el parámetro dispersión en la composición de olivinos, indica que la muestra CAT-M5, presenta un tipo petrológico 4. El parámetro estado estructural de piroxenos, indica que esta muestra presenta un tipo petrológico igual a 5, 6 o 7. En cuanto al contenido de Ni en sulfuros (troilita), el tipo petrológico de la muestra es de mayor o igual a 4. El parámetro integración cóndrulos-matriz (textura), indica que la muestra CAT-M5 presenta un tipo petrológico igual a 4. Se concluye, por lo tanto, en base a la evidencia presentada, que la muestra CAT-M5 presenta un tipo petrológico cercano a 4. Para la muestra CAT-M9, el parámetro estado estructural de piroxenos, indica un tipo petrológico 5, 6 o 7. En cuanto al contenido de Ni en sulfuros (troilita), el tipo petrológico de la muestra es de mayor o igual a 4, 5, 6 o 7. El parámetro integración cóndrulos-matriz (textura), indica que la muestra CAT-M9 presenta un tipo

petrológico 5-6. Para el caso de la muestra CAT-M9, no se realizaron análisis puntuales que permitan tener nociones sobre la dispersión en la composición de los granos de olivino, sin embargo, en base a mapas mineralógicos en falso color de QEMSCAN que separan la composición del olivino de acuerdo al contenido de forsterita, se puede estimar un tipo petrológico de 4 o mayor. Se concluye, por lo tanto, en base a la evidencia presentada, que la muestra CAT-M9 presenta un tipo petrológico cercano 5 o 6 *a priori*, pero se recomienda hacer una clasificación más completa, que al menos muestre una dispersión cuantitativa en la composición del olivino.

En cuanto al estado de choque, la muestra CAT-M5 presenta extinción ondulosa en algunos granos primarios de olivino (~2%), además de que una cantidad importante de cristales, principalmente de olivinos y piroxenos, se encuentran fracturados, tanto con fracturas irregulares como con fracturas planares. La evidencia descrita, indica que el espécimen, presenta, según la clasificación de Stöffler y otros (1991), un estado de choque S3, es decir, se encuentra débilmente choqueada. La muestra CAT-M9 por su parte, presenta una pervasiva extinción ondulosa en la mayoría de sus cristales silicatados, además de presentar comúnmente fracturas planares. Estos dos hechos indican que la muestra CAT-M9, según la clasificación de Stöffler y otros (1991), presenta un estado de choque S4 (choqueado moderadamente) o mayor.

En cuanto al grado de meteorización, la muestra CAT-M5, presenta una familia principal de venas de meteorización que está siendo parcialmente rellenada por óxidos de Fe. Además, ocurren halos de alteración en ciertos cristales de kamacita y de troilita en menor proporción. Los silicatos por su parte no son afectados por estos procesos. Dado lo anterior, la muestra CAT-M5 según el criterio de Wlotzka (1993), presenta un grado de meteorización W2. La muestra CAT-M9 por su parte, presenta cuatro familias principales de venas de meteorización que están siendo rellenadas por óxidos de Fe. Además, ocurren halos de alteración en ciertos cristales de kamacita y de troilita. Los silicatos en esta muestra, sí son afectados por procesos de meteorización. Dado lo anterior, la muestra CAT-M9 según el criterio de Wlotzka (1993), presenta un grado de meteorización W5, caracterizado por el inicio de la alteración de silicatos máficos.

8. REFERENCIAS

- ÁLVAREZ, S. 2021. Caracterización y análisis del meteorito Paposo utilizando SEM-EDS (QEMSCAN®): alcances de la evaluación cuantitativa de minerales para la clasificación de condritos ordinarios. Memoria para optar al Título de Geóloga. Universidad Católica del Norte (Inédito): 94 pp., Antofagasta.
- BENNETT, M.E. y MCSWEEN, H.Y. 1996. Shock features in iron-nickel metal and troilite of L-group ordinary chondrites. *Meteoritics & Planetary Science*, Vol. **31**: 255-264.
- BOSTRÖM, K. Y FREDRIKSSON, K. 1966. Surface conditions of the Orgueil meteorite parent body as indicated by mineral associations. *Smithsonian Miscellaneous Collections*. Vol. 151. Washington.
- CASTELLANOS, O. Y RÍOS, C. 2005. EPMA: Electronic microanalysis; Principles of operation. *Revista Colombiana de tecnologías de Avanzada*. Vol. 2: 1-6.
- DODD, R.T.; GROVER, J.E. y BROWN, G.E. 1975. Pyroxenes in the Shaw (L7) chondrite. *Geochim. Cosmochim.* Vol. **39**: 1585-1594.
- DODD, R.T. 1981. Meteorites: A petrological chemical synthesis. Cambridge University Press: 368 pp. Londres.
- DUNN, T.L.; MCCOY, T.J.; SUNSHINE, J.M. y MCSWEEN JR, H. 2010. A coordinated spectral, mineralogical, and compositional study of ordinary chondrites. *Icarus*. Vol. **208**: 789-797.
- FREDRIKSSON, K.; NELEN, J. y FREDRIKSSON, B.J. 1968. The LL-group chondrites. *Origin and Distribution of the Elements*: 457-466. Pergamon.
- GENGE, M.J. y GRADY, M.M. 1999. The fusion crusts of stony meteorites: Implications for the atmospheric reprocessing of extraterrestrial materials. *Meteoritics & Planetary Science*, vol. **34**: 341-356.
- GOLDSTEIN, J.I. y MICHAEL, J.R. 2006. The formation of plessite in meteoritic metal. *Meteoritics & Planetary Science*, Vol. **41**: 553-570.
- GOLDSTEIN, J.I.; NEWBURY, D.E.; MICHAEL, J.R.; RITCHIE, N.W.; SCOTT, J.H.J. Y JOY, D.C. 2017. Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis. Springer: 660 pp. Nueva York.
- GOODING, J.L. y KEIL, K. 1981. Relative abundances of chondrule primary textural types in ordinary chondrites and their bearing on conditions of chondrule formation. *Meteoritics*. Vol. **16**: 17-43.
- HUTCHISON, R. 2004. Meteorites: A petrologic, chemical and isotopic synthesis. Cambridge University Press: 511 pp. New York.
- HUTZLER, A.; GATTACCECA, J.; ROCHETTE, P.; BRAUCHER, R.; CARRO, B.; CHRISTENSEN, E.J.; COURNEDE, C.; GOUNELLE, M.; LARIDHI OUAZAA, N.; MARTINEZ, R.; VALENZUELA, M.; WARNER, M. y BOURLES, D. 2016.

Description of a very dense meteorite collection area in western Atacama: Insight into the long-term composition of the meteorite flux to Earth. *Meteoritics & Planetary Science* Vol. **51**: 468-482.

- JONES, R.H.; GROSSMAN, J.N. Y RUBIN, A.E. 2005. Chemical, mineralogical and isotopic properties of chondrules: Clues to their origin. *Chondrites and the protoplanetary disk*. Vol. **341**:251-285.
- KEIL, K. y FREDRIKSSON, K. 1964. The iron, magnesium and calcium distribution in coexisting olivines and rhombic pyroxenes of chondrites. *Journal of Geophysical Research*. Vol. **69**: 3487-3515.
- KROT, A.N.; BREARLEY, A.J.; PETAEV, M.I.; KALLEMEYN, G.W.; SEARS, D.W. G.; BENOIT, P.H.; HUTCHEON, I.D.; ZOLENSKY, M.E. y KEIL, K. 2000. Evidence for low-temperature growth of fayalite and hedenbergite in MacAlpine Hills 88107, an ungrouped carbonaceous chondrite related to the CM-CO clan. *Meteoritics & Planetary Science*. Vol.**35**: 1365-1386.
- KROT, A.N.; KEIL, K.; SCOTT, E. R.D.; GOODRICH, C.A. y WEISBERG, M.K. 2014. Classification of Meteorites and Their Genetic Relationships. *Treatise on Geochemistry*: 1-63.
- LEWIS, J.A.; JONES, R.H. y BREARLEY, A.J. 2022. Plagioclase alteration and equilibration in ordinary chondrites: Metasomatism during thermal metamorphism. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol. **316**: 201-229.
- LOZARES, C. y LÓPEZ-ROLDÁN, P. 1991. El análisis de componentes principales: aplicación al análisis de datos secundarios. *Revista de sociología*: 31-63.
- METZLER, K.; HEZEL, D.C.; BAROSCH, J.; WÖLFER, E.; SCHNEIDER, J.M.; HELLMANN, J.L. y KLEINE, T. 2021. The Loongana (CL) group of carbonaceous chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol **304**: 1-31.
- PINTO, G. 2017. Definición, clasificación y emparejamiento de los fragmentos del meteorito PAMPA-A, Pampa de Mejillones, Región de Antofagasta, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad Católica del Norte (Inédito): 157 pp., Antofagasta.
- PIRRIE, D. y ROLLINSON, G.K. 2011. Unlocking the applications of automated mineral analysis. *Geology Today*. Vol. **27**: 226-235.
- RAGLAND, P.C. 1989. Basic Analytical Petrology. Oxford University Press: 369 pp. Nueva York.
- REID, A.M. y FREDRIKSSON, K. 1967. Chondrules and Chondrites. *Researches in Geochemistry*. Vol. **2**: 170-203.
- RUBIN, A.E. y GROSSMAN, J.N. 2010. Meteorite and meteoroid: New comprehensive definitions. *Meteoritics & Planetary Science*. Vol. **45**:114-122.

- SCOTT, E.R.D. y KROT, A.N. 2007. Chondrites and their components. *Treatise on Geochemistry: Meteorites, Comets and Planets*. Vol. **1**:143-200. Oxford.
- SEARS, D.W.G.; HASAN, F.A.; BATCHELOR, J.D. y LU J. 1991. Chemical and physical studies of type 3 chondrites: XI. Metamorphism, pairing, and brecciation of ordinary chondrites. *Lunar Planetary Science Conference*. Vol. **21**:493–512.
- STÖFFLER, D.; KEIL, K. y SCOTT, E.R.D. 1991. Shock metamorphism of ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol. **55**: 3.845-3.867.
- TOMKINS, A.G.; WEINBERG, R.F.; SCHAEFER, B.F. y LANGENDAM, A. 2013. Disequilibrium melting and melt migration driven by impacts: Implications for rapid planetesimal core formation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. **100**: 41-59.
- ULLOA GONZÁLEZ, B. 2017. Clasificación y Caracterización del grado de metamorfismo de choque de tres condritos ordinarios del desierto de Atacama J3109, J657, J302. Memoria para optar al Título de Geóloga. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 110 pp., Concepción.
- VALENZUELA, E.M. 2003. Petrología y geoquímica del meteorito Paposo. Memoria para optar al Título de Geólogo (Inédito) Universidad de Chile, Departamento de Geología. 103 pp. Santiago.
- VALENZUELA, M. 2009. Meteoritos chilenos y su necesidad de protección y preservación como un nuevo tipo de geopatrimonio. XII Congreso Geológico Chileno. 22-26. Santiago.
- VALENZUELA, E.M. 2011. Procesos de meteorización en condritos ordinarios del Desierto de Atacama, norte de Chile: Nuevos antecedentes sobre meteorización de material extraterrestre en ambientes desérticos. Tesis de grado de Doctor en Ciencias mención Geología. Inédito. Universidad de Chile, Departamento de Geología. 291 pp. Santiago.
- VARELA, M.E. 2015. Meteoritos: Restos rocosos del Sistema Solar primitivo. Vázquez Mazzini Editores: 232 pp. Buenos Aires.
- VERNAZZA, P.; ZANDA, B.; NAKAMURA, T.; SCOTT, E. y RUSSELL, S. 2015. The formation and evolution of ordinary chondrite parent bodies. Asteroids IV. (Michel, P., Demeo, F.E. y Bottke, W.F. editores). *The University of Arizona press*: 617-634. Tucson.
- VAN SCHMUS, W.R. y WOOD, J.A. 1967. A chemical-petrologic classification for the chondritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol. **31**: 747-765.
- VAN SCHMUS, W.R. 1969. The mineralogy and petrology of chondritic meteorites. *Earth-Science Reviews*. Vol. **5**: 145-184.
- VON MICHAELIS, H.; AHRENS, L.H. y WILLIS, J.P. 1969. The Composition of stony meteorites II. The analytical data and an assessment of their quality. *Earth and Planetary Science Letters*. Vol. **5**: 387-394

- WASSON, J.T. 1974. *Meteorites: Classification and Properties*, Springer-Verlag: 316 pp. Nueva York.
- WASSON, J. T. 1993. Constraints on chondrule origins. *Meteoritics*, Vol. **28**: 14-28.
- WEYRAUCH, M., Y BISCHOFF, A. 2012. Macrochondrules in chondrites—Formation by melting of mega-sized dust aggregates and/or by rapid collisions at high temperatures?. *Meteoritics & Planetary Science*. Vol. **47**: 2237-2250.
- WEISBERG, M.K.; MCCOY, T.J. y KROT, A.N. 2006. Systematics and evaluation of meteorite classification. *Meteorites and the early solar system II*. (Lauretta, D.S. y McSween, H.Y. editores). *The University of Arizona press*: 19-52. Tucson.
- WLOTZKA, F. 1993. A weathering scale for the ordinary chondrites. *Meteoritics*. Vol. **28**: 460-460.

ANEXOS

ANEXO 1

**PROCEDIMIENTO DE TRANSFORMACIÓN DE
DATOS QUÍMICOS PROPORCIONADOS POR UCN
A ESPECTROS EDS (“INTENSIDADES DE
PEAKS”)**

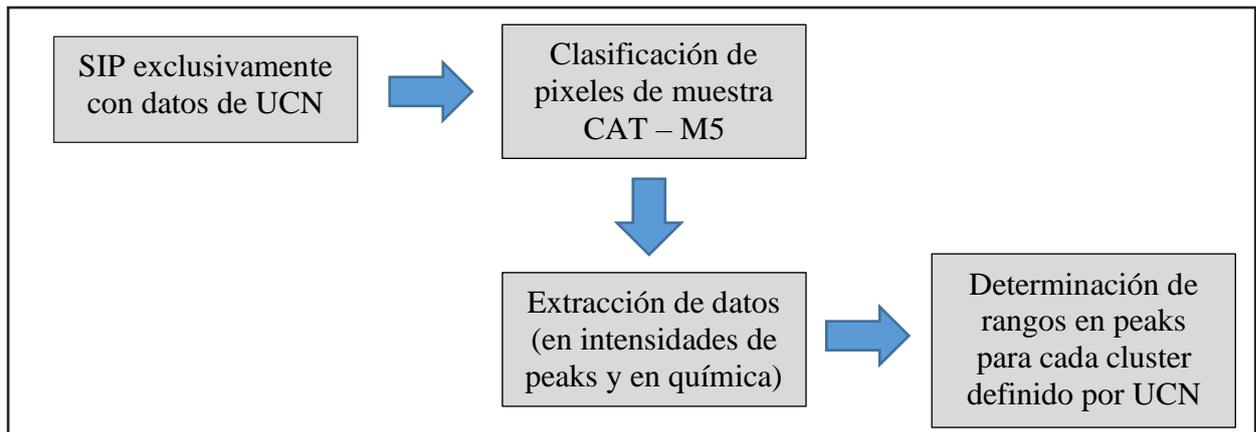


Figura 1: Esquema explicativo del procedimiento llevado a cabo para incluir datos de SIP entregados por la Universidad Católica del Norte (UCN) en SIP elaborada en este trabajo. El primer paso consistió en crear una SIP exclusivamente con datos proporcionados por la UCN. A continuación, se hizo una clasificación de las muestras en base a este archivo SIP. Posteriormente, se importaron datos asociados a esta muestra, que son entregados por el software iDiscover tanto en química como intensidades de peaks en un archivo “csv”. Por último, estos datos fueron agrupados de acuerdo a la fase mineral que definen y se determinaron los valores mínimos y máximos para cada elemento químico que tiene información asociada al cluster o fase mineral, en intensidades de peaks, para finalmente incluir estos valores en la lista SIP elaborada en este trabajo de memoria, realizada en intensidades de peaks.

The image shows a software interface for mineral identification. On the left, a list of minerals is displayed, each with a small colored square next to its name. The colors range from red to green. On the right, a window titled 'PUC Opx En90 (S)' is open, showing detailed information for this specific mineral. The window is divided into several sections: 'General' (Id Code: 927, Name: PUC Opx En90 (S), Description, Colour: Crimson), 'Show simustat ranges for:' (None), 'X-ray Count Rate' (slider), 'BSE Brightness' (slider), 'Elemental Set' (Used, Concentrations), 'Peak Intensities' (Concentrations), 'Composition Confidence' (slider at 85), and 'Other' (Not allowed, Optimize Low Element Values).

Mineral List (Left):

- Background
- PUC Aegirine (T)
- PUC Augite (D)
- PUC Augite (S)
- PUC Diopside (D)
- PUC Diopside (S)
- PUC Diopside Cr (M)
- PUC Rhodonite (S)
- PUC Rhodonite (D)
- PUC Opx En90 (S)
- PUC Opx En90 (S)
- PUC Opx En70 (S)
- PUC Opx En60 (S)
- PUC Opx En87 (S)
- PUC Opx En75 (S)
- PUC Opx En75 (A)
- PUC Opx En50 (S)
- PUC Opx En50 (A)
- PUC Omphacite (T)
- PUC Jadeite (T)
- PUC Hypersthene (S)
- PUC Hypersthene (M)
- PUC Hyoersthene (A)
- PUC Hedenbergite (S)
- PUC Hedenbergite (D)
- PUC Enstatite (S)
- PUC Enstatite (D)
- PUC Ferrosilite (S)
- PUC Ferrosilite (S)
- PUC Forsterite (S)
- PUC Forsterite (D)
- PUC Forsterite (A)
- PUC Fayalite (S)
- PUC Fayalite (S)
- PUC Fayalite (D)
- PUC Fayalite (A)
- PUC Olv Fo90 (S)
- PUC Olv Fo90 (A)
- PUC Olv Fo80 (S)
- PUC Olv Fo80 (A)
- PUC Olv Fo70 (S)
- PUC Olv Fo70 (A)
- PUC Olv Fo60 (S)
- PUC Olv Fo60 (A)
- PUC Olv Fo50 (S)
- PUC Olv Fo50 (A)
- PUC Olv Fo40 (S)
- PUC Olv Fo40 (A)
- PUC Olv Fo30 (S)
- PUC Olv Fo30 (A)
- PUC Olv Fo20 (S)
- PUC Olv Fo20 (A)
- PUC Olv Fo10 (S)
- PUC Olv Fo10 (A)
- PUC Olivine(S)
- PUC Olivine(M)
- PUC Forsterite (S)

Mineral Details (Right):

General

Id Code	927
Name	PUC Opx En90 (S)
Description	
Colour	Crimson

Show simustat ranges for: None

X-ray Count Rate: [Slider]

BSE Brightness: [Slider]

Elemental Set: Used, Concentrations

Peak Intensities: Concentrations

Must Have

O	17	34
Mg	19	33
Si	35	49
Fe	4	14

May Have

C	4
F	3
Cu	3
Zn	3
As	4
Zr	3
Nb	3
Sb	4
Ba	3
Ce	4
Pb	5
Bi	5

Composition Confidence: [Slider] 85

Other: Not allowed, Optimize Low Element Values

Figura 2: Fases minerales que incluye la lista SIP proporcionada por la Universidad Católica del Norte. La figura de la derecha, muestra los parámetros químicos (en concentraciones) que determinan a la fase mineral enstatita 90 (En 90).

1	Mineral Name	BSE	C	O	F	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co
2	PUC Opx En60 (S)	53.99611	0	88.300003	35.299999	0	101.66425	0	231.9913	0	0	0	0	0	0	0	0	0	123.12093	0
3	PUC Opx En60 (S)	54.8677	0	80.300003	21.299999	21.299999	100.61624	0	174.8894	0	0	0	0	0	0	0	0	0	137.34943	0
4	PUC Opx En60 (S)	54.96498	0	113.3	37.299999	22.299999	82.359444	0	177.53807	0	0	0	0	0	0	0	0	0	139.84908	0
5	PUC Opx En60 (S)	49.3463	0	78.300003	28.299999	0	105.05464	0	227.5733	0	0	0	0	0	0	0	0	0	122.07529	0
6	PUC Opx En60 (S)	53.99611	0	110.3	42.299999	0	82.086639	0	217.41928	0	0	0	0	0	0	0	0	0	127.51566	0
7	PUC Opx En60 (S)	53.89883	0	70.300003	28.299999	0	101.25784	0	209.94815	0	0	0	0	0	0	0	0	0	134.94699	0
8	PUC Opx En60 (S)	57.47082	0	93.300003	35.299999	0	88.477043	0	182.75578	0	0	0	0	0	0	0	0	0	144.30667	0
9	PUC Opx En60 (S)	52.35019	0	83.300003	31.299999	22.299999	107.44505	0	193.1886	0	0	0	0	0	0	0	0	0	126.1455	0
10	PUC Opx En60 (S)	50.12062	0	90.300003	38.299999	0	99.96904	0	187.68742	0	0	0	0	0	0	0	0	0	124.41548	0
11	PUC Opx En60 (S)	51.77043	0	102.3	41.299999	32.299999	68.108246	28.050604	198.49498	0	0	0	0	0	0	0	0	0	95.260582	0
12	PUC Opx En60 (S)	51.4786	0	71.300003	27.299999	0	93.156242	0	227.39589	0	0	0	0	0	0	0	0	0	129.94469	0
13	PUC Opx En60 (S)	57.18288	0	79.300003	33.299999	0	95.781845	0	188.21317	0	0	0	0	0	0	0	0	0	133.18629	0
14	PUC Opx En60 (S)	55.92996	0	80.300003	32.299999	0	92.765846	0	207.57008	0	0	0	0	0	0	0	0	0	140.79579	0
15	PUC Opx En60 (S)	60.93774	0	103.3	50.299999	0	95.070641	0	188.45926	0	0	0	0	0	0	0	0	0	135.31697	0
16	PUC Opx En60 (S)	50.80156	0	91.300003	42.299999	0	82.054642	0	173.19719	0	0	0	0	0	0	0	0	0	134.65088	0
17	PUC Opx En60 (S)	48.37354	0	85.300003	35.299999	23.299999	108.56264	0	201.30742	0	0	0	0	0	0	0	0	0	127.53654	0
18	PUC Opx En60 (S)	55.15564	0	81.300003	25.299999	0	75.172241	0	188.5519	0	0	0	0	0	0	0	0	0	141.42502	0
19	PUC Opx En60 (S)	50.80156	0	83.300003	33.299999	0	97.359444	0	223.59747	0	0	0	0	0	0	0	0	0	137.20197	0
20	PUC Opx En60 (S)	52.54475	0	94.300003	44.299999	0	89.461044	0	207.97302	0	0	0	0	0	0	0	0	0	122.27882	0
21	PUC Opx En60 (S)	53.70817	0	93.300003	32.299999	0	95.359444	0	203.12892	0	0	0	0	0	0	0	0	0	130.8439	0
22	PUC Opx En60 (S)	50.02335	0	74.300003	24.299999	0	104.95304	0	198.7225	0	0	0	0	0	0	0	0	0	127.13187	0
23	Valor mínimo	48.37354	0	70.300003	21.299999	0	68.108246	0	173.19719	0	0	0	0	0	0	0	0	0	95.260582	0
24	Valor máximo	60.93774	0	113.3	50.299999	32.299999	108.56264	28.050604	231.9913	0	0	0	0	0	0	0	0	0	144.30667	0

Figura 3: Extracto de archivo .xlw que agrupa a los píxeles definidos bajo la fase mineral En 60. Se determinaron los valores mínimos y máximos en intensidades de peaks, para cada elemento químico que compone a dicha fase mineral para ser incluidos en la lista SIP elaborada en este trabajo de memoria.

ANEXO 2

**RESUMEN CARACTERÍSTICAS EN LISTA SIP
PARA CADA FASE MINERAL**

Apatito C#01				Cromita C#02			
Fórmula química		Ca 37.75, Fe 2.00, H 0.18, O 40.6, P 19.77		Fórmula química		Al 2.30, Cr 43.44, Fe 23.86, O 29.40	
Densidad (g/cm ³)		3.19		Densidad (g/cm ³)		4.795	
Rango señal		Min	Max	Rango señal		Min	Max
BSE		25	116	BSE		25	103
Debe tener	P	0	231	Debe tener	O	0	134
	Ca	0	391		Cr	0	370
Puede tener	O	0	109		Fe	0	318
	F	0	69	Puede tener	F	0	68
	Na	0	211		Na	0	39
	Mg	0	199		Mg	0	114
	Al	0	106		Al	0	129
	Si	0	267		Si	0	232
	S	0	133		P	0	83
	Cl	0	429		S	0	261
	K	0	45		Cl	0	41
	Cr	0	152		Ca	0	144
	Fe	0	392		Ti	0	211
	Ni	0	163		V	0	57
	Cu	0	236		Mn	0	90
Sn	0	36	Co		0	26	
				Ni	0	63	
				Pb	0	26	

Clinopiroxeno C#03				Oxi-hidróxidos de Fe C#04			
Fórmula química		Ca 15.92, Fe 6.30, Mg 6.44, O 43.79, Si 27.55		Fórmula química		Fe 62.85, H 1.14, O 36.01	
Densidad (g/cm ³)		3.4		Densidad (g/cm ³)		3.8	
Rango señal		Min	Max	Rango señal		Min	Max
BSE		4	95	BSE		25	117
Debe tener	O	0	140	Debe tener	O	0	180
	Si	0	619		Fe	35	343
	Ca/(Ca+Si)	0.3	1	Puede tener	F	0	111
Puede tener	C	0	23		Na	0	44
	F	0	52		Mg	0	177
	Na	0	66		Al	0	127
	Mg	0	222		Si	0	276
	P	0	137		P	0	108
	S	0	334		S	0	266
	Cl	0	55		Cl	0	55
	Cr	0	163		K	0	101
	Fe	0	332		Ca	0	219
	Co	0	22		Ti	0	22
	Ni	0	74		Cr	0	158
	Cu	0	30		Co	0	35
	As	0	13		Cu	0	28
	Ce	0	26		Ag	0	30
	Pb	0	27	Sn	0	37	
				Sb	0	138	

Troilita C#05				Kamacita (Fe - Ni) C#05a			
Fórmula química		Fe 83.43, S 12.87		Fórmula química		Fe 83.43 Ni 3.76	
Densidad		4.6		Densidad		7.9	
Rango señal		Min	Max	Rango señal		Min	Max
BSE		27	129	BSE		25	117
Debe tener	S	0	372	Debe tener	Fe	0	600
	Fe	214	416		Puede tener	O	0
Puede tener	O	0	41	F		0	105
	F	0	73	Na		0	105
	Si	0	24	Mg		0	100
	Ni	0	28	Al		0	81
				Si		0	175
				P		0	55
				Cl		0	55
				K		0	55
				Ca		0	155
				Ti	0	30	
				Cr	0	135	
				Co	0	35	
				Ni	0	210	
				Cu	0	265	
				Zn	0	35	

Vidrio C#06				Ortopiroxeno C#07			
Fórmula química		Al 19.18, Ca 8.70, Fe 0.21, K 0.10, Na 2.20, O 47.06, Si 22.54		Fórmula química		Fe 12.23, Mg 14.76, O 45.06, Si 27.95	
Densidad (g/cm ³)		2.695		Densidad (g/cm ³)		3.95	
Rango señal		Min	Max	Rango señal		Min	Max
BSE		20	85	BSE		25	82
Debe tener	O	0	163	Debe tener	O	0	130
	Al	0	475		Mg	0	260
	Si	0	464		Si	40	440
Puede tener	C	0	53		Fe	0	265
	F	0	69	Puede tener	F	0	60
	Na	0	71		Na	0	85
	Mg	0	188		Al	0	85
	P	0	67		P	0	40
	S	0	211		S	0	250
	Cl	0	48		Ca	0	142
	K	0	155				
	Ca	0	209				
	Ti	0	28				
	Cr	0	161				
	Fe	0	380				
	Ni	0	112				
	Cu	0	92				
	Ag	0	37				
Sn	0	103					
Sb	0	71					

Olivino C#08				Ortopiroxeno con análisis k-means KM#01-OPX			
Fórmula química		Fe 17.15, Mg 19.18, O 42.19, Si 21.56		Fórmula química		Fe 12.23, Mg 14.76, O 45.06, Si 27.95	
Densidad (g/cm ³)		3.32		Densidad (g/cm ³)		3.95	
Rango señal		Min	Max	Rango señal		Min	Max
BSE		25	106	BSE		25	85
Debe tener	O	42	181	Debe tener	O	0	180
	F	0	94		Mg	0	210
	Mg	0	273		Si	120	430
	Si	39	325		Fe	0	200
	Fe	0	227		Fe/(Fe+Si)	0.04	0.5
Puede tener	Na	0	70		Mg/(Mg+Si)	0.06	0.48
	Al	0	87	Puede tener	F	0	85
	Ca	0	112		Ca	0	145
	Cr	0	125				
	Ni	0	44				
	Cu	0	57				

Olivino con análisis k-means KM#02-OLV				Enstatita 50 C#En50 (UCN)			
Fórmula química		Fe 17.15, Mg 19.18, O 42.19, Si 21.56		Fórmula química		Fe 24.02, Mg 10.46, O 41.32, Si 24.18	
Densidad (g/cm ³)		3.32		Densidad (g/cm ³)		3.5	
Rango señal		Min	Max	Rango señal		Min	Max
BSE		25	110	BSE		26	78
Debe tener	O	0	175	Debe tener	O	46	148
	Mg	0	280		Si	154	289
	Si	35	230		Fe	67	185
	Fe	0	250	Puede tener	F	0	73
	Fe/(Fe+Si)	0.5	0.85		Na	0	42
	Mg/(Mg+Si)	0.1	0.66		Mg	0	124
			Al		0	55	
Puede tener	F	0	95	S	0	60	
	Ca	0	130	Cl	0	42	
				Ca	0	35	

Enstatita 60 C#En60 (UCN)				Enstatita 70 C#En70 (UCN)			
Fórmula química		Fe 19.77, Mg 12.91, O 42.47, Si 24.85		Fórmula química		Fe 15.25, Mg 15.49, O 43.69, Si 25.57	
Densidad (g/cm ³)		3.4		Densidad (g/cm ³)		3.3	
Rango señal		Min	Max	Rango señal		Min	Max
BSE		48	61	BSE		32	62
Debe tener	O	46	148	Debe tener	O	59	148
	F	154	289		Mg	71	147
	Mg	67	185		Si	190	288
	Si	173	232		Fe	52	115
	Fe	95	145	Puede tener	F	0	56
	Na	0	33		Na	0	37
Puede tener	Al	0	29				

Enstatita 75 C#En75 (UCN)				Enstatita 80 C#En80 (UCN)			
Fórmula química		Fe 12.89, Mg 16.84, O 44.33, Si 25.94		Fórmula química		Fe 10.47, Mg 18.23, O 44.98, Si 26.32	
Densidad (g/cm ³)		3.3		Densidad (g/cm ³)		3.2	
Rango señal		Min	Max	Rango señal		Min	Max
BSE		25	84	BSE		35	58
Debe tener	O	46	148	Debe tener	O	60	140
	Mg	67	185		Mg	89	191
	Si	173	232		Si	200	300
	Fe	95	145		Fe	30	87
Puede tener	F	0	73	Puede tener	F	0	57
	Na	0	56		Na	0	44
	Al	0	50				
	P	0	32				
	S	0	68				
	Cl	0	45				
	Ca	0	40				
	Ti	0	27				
	Cr	0	26				
	Ni	0	20				
	Sn	0	24				

Enstatita 87 C#En87 (UCN)				Enstatita 90 C#En90 (UCN)			
Fórmula química		Fe 6.95, Mg 20.24, O 45.93, Si 26.88		Fórmula química		Fe 5.39, Mg 21.13, O 46.35, Si 27.13	
Densidad (g/cm ³)		3.1		Densidad (g/cm ³)		3.1	
Rango señal		Min	Max	Rango señal		Min	Max
BSE		41	54	BSE		25	57
Debe tener	O	62	130	Debe tener	O	70	137
	Mg	124	192		Mg	129	201
	Si	231	308		Si	219	305
	Fe	28	59		Fe	25	56
Puede tener	F	0	52	Puede tener	F	0	55
	Na	0	41		Na	0	40

Forsterita 30 C#Fo30 (UCN)				Forsterita 40 C#Fo40 (UCN)			
Fórmula química		Fe 42.30, Mg 7.89, O 34.62, Si 15.19		Fórmula química		Fe 37.53, Mg 10.89, O 35.84, Si 15.73	
Densidad (g/cm ³)		3.9		Densidad (g/cm ³)		3.8	
Rango señal		Min	Max	Rango señal		Min	Max
BSE		40	86	BSE		38	85
Debe tener	O	54	129	Debe tener	O	59	133
	Si	67	137		Si	70	162
	Fe	193	272		Fe	173	256
Puede tener	F	0	66	Puede tener	F	0	77
	Na	0	22		Na	0	27
	Mg	0	59		Mg	0	88
	Al	0	38		Al	0	32
	S	0	38		S	0	52
	Ca	0	27		Cl	0	39
	Ni	0	23		K	0	23
				Ca	0	25	
				Ni	0	21	

Forsterita 50 C#Fo50 (UCN)				Forsterita 60 C#Fo60 (UCN)			
Fórmula química		Fe 32.42, Mg 14.11, O 37.16, Si 16.31		Fórmula química		Fe 26.93, Mg 17.58, O 38.57, Si 16.92	
Densidad (g/cm ³)		3.7		Densidad (g/cm ³)		3.6	
Rango señal		Min	Max	Rango señal		Min	Max
BSE		38	87	BSE		28	76
Debe tener	O	60	139	Debe tener	O	60	134
	Mg	30	110		Mg	54	147
	Si	80	167		Si	90	175
	Fe	146	230		Fe	120	203
Puede tener	F	0	87	Puede tener	F	0	77
	Na	0	29		Na	0	35
	Al	0	30		Al	0	35
	S	0	39		S	0	39
	Ca	0	25		Cl	0	45
	Cr	0	21		Ca	0	28
	Ni	0	21				

Forsterita 70 C#Fo70 (UCN)				Forsterita 80 C#Fo80 (UCN)					
Fórmula química		Fe 21.21, Mg 21.31, Mn 0.43, O 39.84, Si 17.21		Fórmula química		Fe 14.57, Mg 25.37, O 41.74, Si 18.32			
Densidad (g/cm ³)		3.5		Densidad (g/cm ³)		3.4			
Rango señal		Min	Max	Rango señal		Min	Max		
BSE		25	77	BSE		25	65		
Debe tener	O	55	153	Debe tener	O	60	147		
	Mg	79	189		Mg	116	273		
	Si	90	203		Si	96	241		
	Fe	90	177		Fe	49	135		
Puede tener	F	0	84	Puede tener	F	0	72		
	Na	0	49		Na	0	56		
	Al	0	31		Al	0	29		
	S	0	55		P	0	31		
	Cl	0	42		S	0	38		
	Ni	0	20		Cl	0	42		
	F	0	84		Ca	0	31		
				Cr				0	25

Forsterita 90 C#Fo90 (UCN)				Fayalita C#Fa (UCN)			
Fórmula química		Fe 7.60, Mg 29.76, O 43.53, Si 19.11		Fórmula química		Fe 54.81, O 31.40, Si 13.78	
Densidad (g/cm ³)		3.27		Densidad (g/cm ³)		4.2	
Rango señal		Min	Max	Rango señal		Min	Max
BSE		28	83	BSE		30	112
Debe tener	O	63	150	Debe tener	O	50	111
	Mg	170	273		Si	48	113
	Si	118	231		Fe	228	309
	Fe	25	100	Puede tener	F	0	87
Puede tener	F	0	67		Mg	0	46
	Na	0	60		Al	0	37
	Al	0	29		S	0	39
	Cl	0	42		Ca	0	25
	Ca	0	29	Ni	0	22	

ANEXO 3

**RESUMEN DE DATOS PARA FÓRMULAS
EMPÍRICAS DE FASES MINERALES DE LISTA SIP**

Elementos Apatito	Q2 de la concentración (%wt)	Masa molar (g/mol)	Moles	Proporción	Moles recalculados	Concentración recalculada (wt%)	Concentración normalizada (wt%)
O	4.74	16.00	2.96	1.03	13.95	22.32	40.66
P	29.36	31.00	9.47	3.30	3.50	10.85	19.77
Ca	58.79	41.00	14.34	5.0	5.00	20.50	37.35
H		1.01			1.00	0.10	0.18
Fe	2.65	55.85	0.47	0.17	0.20	1.12	2.04
Total					0 Equilibrio	54.89	100.00
Elementos Cromita	Q2 de la concentración (%wt)	Masa molar (g/mol)	Moles	Proporción	Moles recalculados	Concentración recalculada (wt%)	Concentración normalizada (wt%)
O	9.64	16	6.02	1.23	4.3	6.88	29.40
Al	2.22	27	0.82	0.17	0.2	0.54	2.31
Cr	53.05	52	10.20	2.08	2	10.4	44.43
Fe	27.34	55.85	4.90	1	1	5.59	23.86
Total					0 Equilibrio	23.41	100.00
Elementos Clino-piroxeno	Q2 de la concentración (%wt)	Masa molar (g/mol)	Moles	Proporción	Moles recalculados	Concentración recalculada (wt%)	Concentración normalizada (wt%)
O	10.31	16	6.44	0.94	5.58	8.93	43.79
Mg	9.09	24.31	3.74	0.54	0.54	1.31	6.44
Si	38.69	28.09	13.77	2	2	5.62	27.55
Ca	22.39	40.08	5.59	0.81	0.81	3.25	15.92
Fe	8.92	55.85	1.60	0.23	0.23	1.28	6.30
Total					0 Equilibrio	20.40	100.00
Elementos Oxi-hidróxidos de Fe	Q2 de la concentración (%wt)	Masa molar (g/mol)	Moles	Proporción	Moles recalculados	Concentración recalculada (wt%)	Concentración normalizada (wt%)
O	14.39	16	9	0.87	2	3.2	36.01
Mg	2.30	24.32	0.94	0.09	0.00	0.00	0.00
Si	12.28	28.09	4.37	0.42	0.00	0.00	0.00
Fe	55.29	55.85	9.90	1	1	5.56	62.85
H		1.01	0		1	0.10	1.14
Total					0 Equilibrio	8.89	100.00
Elementos Orto-piroxeno	Q2 de la concentración (%wt)	Masa molar (g/mol)	Moles	Proporción	Moles recalculados	Concentración recalculada (wt%)	Concentración normalizada (wt%)
O	15.77	16	9.90	0.70	2.83	4.53	45.06
Mg	20.88	24.31	8.60	0.61	0.61	1.48	14.76
Si	39.32	28.09	14	1	1	2.81	27.95
Fe	16.95	55.85	3.03	0.22	0.22	1.23	12.23
Total					0 Equilibrio	10.05	100.00

Elementos Olivino	Q2 de la concentración (%wt)	Masa molar (g/mol)	Moles	Proporción	Moles recalculados	Concentración recalculada (wt%)	Concentración normalizada (wt%)
O	17.78	16	11.11	1.15	3.55	5.68	41.82
Mg	26.42	24.31	10.87	1.13	1.13	2.75	20.23
Si	27.05	28.09	9.63	1	1	2.81	20.68
Fe	22.59	55.85	4.04	0.42	0.42	2.35	17.27
Total					0 Equilibrio	13.58	100.00
Elementos En 50	Q2 de la concentración (%wt)	Masa molar (g/mol)	Moles	Proporción	Moles recalculados	Concentración recalculada (wt%)	Concentración normalizada (wt%)
O	15.58	16	9.73	0.74	3	4.8	41.32
Mg	20.38	24.31	8.38	0.64	0.5	1.22	10.46
Si	36.98	28.09	13.16	1	1	2.81	24.18
Fe	18.6	55.85	3.33	0.25	0.5	2.80	24.04
Total					0 Equilibrio	11.62	100.00
Elementos En 60	Q2 de la concentración (%wt)	Masa molar (g/mol)	Moles	Proporción	Moles recalculados	Concentración recalculada (wt%)	Concentración normalizada (wt%)
O	15.58	16	9.73	0.74	3	4.8	42.47
Mg	20.38	24.31	8.38	0.64	0.6	1.46	12.91
Si	36.98	28.09	13.16	1	1	2.81	24.85
Fe	18.6	55.85	3.33	0.25	0.4	2.23	19.77
Total					0 Equilibrio	11.30	100.00
Elementos En 70	Q2 de la concentración (%wt)	Masa molar (g/mol)	Moles	Proporción	Moles recalculados	Concentración recalculada (wt%)	Concentración normalizada (wt%)
O	15.58	16	9.73	0.74	3	4.8	43.69
Mg	20.38	24.31	8.38	0.64	0.7	1.70	15.49
Si	36.98	28.09	13.16	1	1	2.81	25.57
Fe	18.6	55.85	3.33	0.25	0.3	1.68	15.25
Total					0 Equilibrio	10.99	100.00
Elementos En 75	Q2 de la concentración (%wt)	Masa molar (g/mol)	Moles	Proporción	Moles recalculados	Concentración recalculada (wt%)	Concentración normalizada (wt%)
O	15.58	16	9.73	0.74	3	4.8	44.33
Mg	20.38	24.31	8.38	0.64	0.75	1.82	16.84
Si	36.98	28.09	13.16	1	1	2.81	25.94
Fe	18.6	55.85	3.33	0.25	0.25	1.40	12.89
Total					0 Equilibrio	10.83	100.00

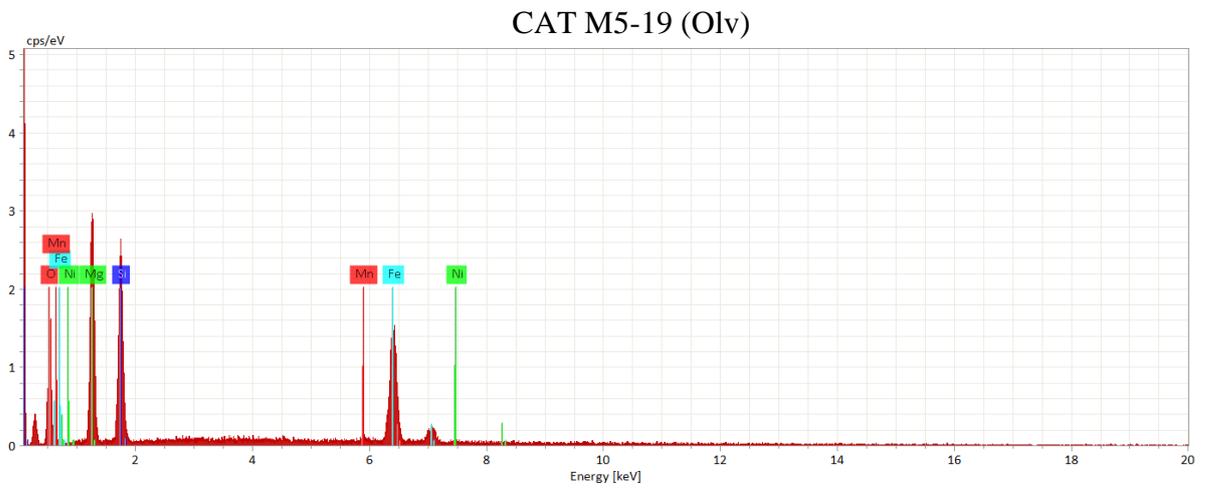
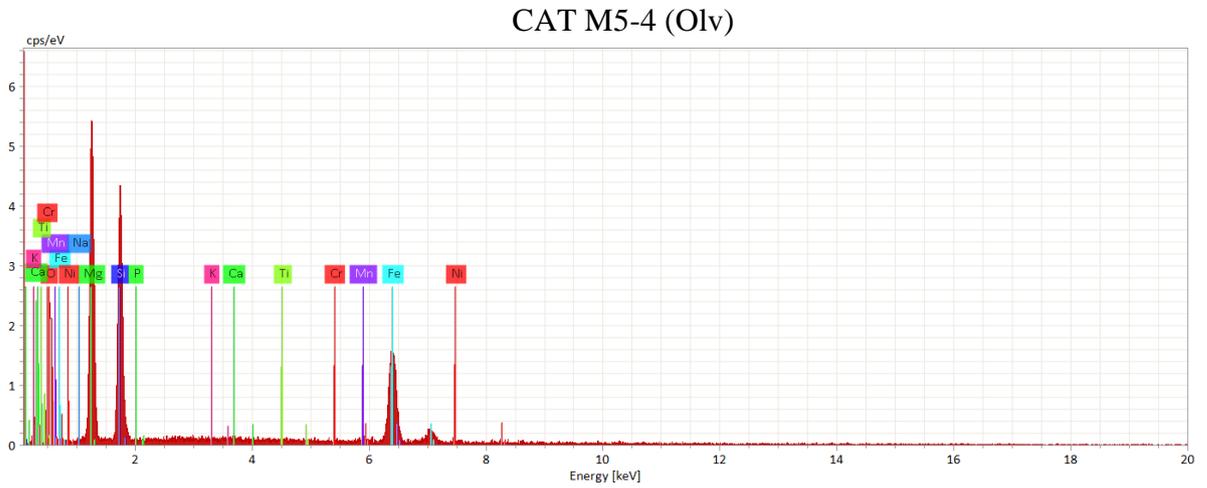
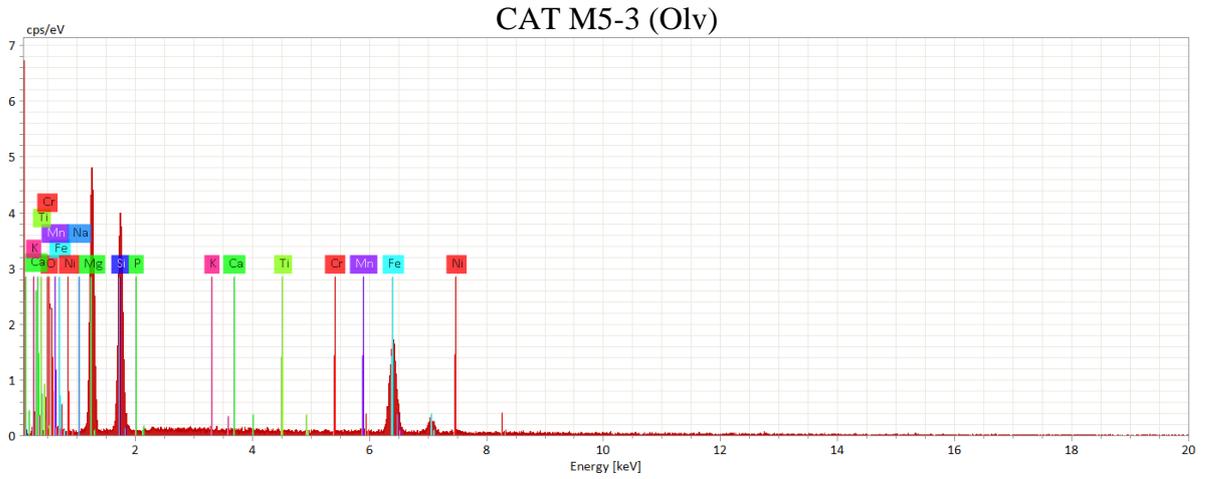
Elementos En 80	Q2 de la concentración (%wt)	Masa molar (g/mol)	Moles	Proporción	Moles recalculados	Concentración recalculada (wt%)	Concentración normalizada (wt%)
O	15.58	16	9.73	0.74	3	4.8	44.98
Mg	20.38	24.31	8.38	0.64	0.8	1.94	18.23
Si	36.98	28.09	13.16	1	1	2.81	26.32
Fe	18.6	55.85	3.33	0.25	0.2	1.12	10.47
Total					0 Equilibrio	10.67	100.00
Elementos En 87	Q2 de la concentración (%wt)	Masa molar (g/mol)	Moles	Proporción	Moles recalculados	Concentración recalculada (wt%)	Concentración normalizada (wt%)
O	15.58	16	9.73	0.74	3	4.8	45.93
Mg	20.38	24.31	8.38	0.64	0.87	2.11	20.24
Si	36.98	28.09	13.16	1	1	2.81	26.88
Fe	18.6	55.85	3.33	0.25	0.13	0.73	6.95
Total					0 Equilibrio	10.45	100.00
Elementos En 90	Q2 de la concentración (%wt)	Masa molar (g/mol)	Moles	Proporción	Moles recalculados	Concentración recalculada (wt%)	Concentración normalizada (wt%)
O	15.58	16	9.73	0.74	3	4.8	46.35
Mg	20.38	24.31	8.38	0.64	0.9	2.19	21.13
Si	36.98	28.09	13.16	1	1	2.81	27.13
Fe	18.6	55.85	3.33	0.25	0.1	0.56	5.39
Total					0 Equilibrio	10.36	100.00
Elementos Fo 30	Q2 de la concentración (%wt)	Masa molar (g/mol)	Moles	Proporción	Moles recalculados	Concentración recalculada (wt%)	Concentración normalizada (wt%)
O	17.90	16	11.19	11.19	4	6.4	34.62
Mg	25.60	24.31	10.53	10.53	0.6	1.46	7.89
Si	28.78	28.09	10.25	10.25	1	2.81	15.19
Fe	22.92	55.85	4.10	4.10	1.4	7.82	42.30
Total					0 Equilibrio		100.00
Elementos Fo 40	Q2 de la concentración (%wt)	Masa molar (g/mol)	Moles	Proporción	Moles recalculados	Concentración recalculada (wt%)	Concentración normalizada (wt%)
O	17.90	16	11.19	11.19	4	6.4	35.84
Mg	25.60	24.31	10.53	10.53	0.8	1.95	10.89
Si	28.78	28.09	10.25	10.25	1	2.81	15.73
Fe	22.92	55.85	4.10	4.10	1.2	6.70	37.53
Total					0 Equilibrio		100.00

Elementos Fo 50	Q2 de la concentración (%wt)	Masa molar (g/mol)	Moles	Proporción	Moles recalculados	Concentración recalculada (wt%)	Concentración normalizada (wt%)
O	17.90	16	11.19	11.19	4	6.4	37.16
Mg	25.60	24.31	10.53	10.53	1	2.43	14.11
Si	28.78	28.09	10.25	10.25	1	2.81	16.31
Fe	22.92	55.85	4.10	4.10	1	5.59	32.42
Total					0 Equilibrio	17.225	100.00
Elementos Fo 60	Q2 de la concentración (%wt)	Masa molar (g/mol)	Moles	Proporción	Moles recalculados	Concentración recalculada (wt%)	Concentración normalizada (wt%)
O	17.90	16	11.19	11.19	4	6.4	38.57
Mg	25.60	24.31	10.53	10.53	1.2	2.92	17.58
Si	28.78	28.09	10.25	10.25	1	2.81	16.93
Fe	22.92	55.85	4.10	4.10	0.8	4.47	26.93
Total					0 Equilibrio	16.59	100.00
Elementos Fo 70	Q2 de la concentración (%wt)	Masa molar (g/mol)	Moles	Proporción	Moles recalculados	Concentración recalculada (wt%)	Concentración normalizada (wt%)
O	17.90	16	11.19	4	6.4	6.4	40.09
Mg	25.60	24.31	10.53	1.4	3.40	3-40	21.32
Si	28.78	28.09	10.25	1	1	2.81	17.60
Fe	22.92	55.85	4.10	0.6	0.6	3.35	20.99
Total					0 Equilibrio	15.96	100.00
Elementos Fo 80	Q2 de la concentración (%wt)	Masa molar (g/mol)	Moles	Proporción	Moles recalculados	Concentración recalculada (wt%)	Concentración normalizada (wt%)
O	17.90	16	11.19	1.09	4	6.4	41.74
Mg	25.60	24.31	10.53	1.03	1.6	3.89	25.37
Si	28.78	28.09	10.25	1	1	2.81	18.32
Fe	22.92	55.85	4.10	0.40	0.4	2.23	14.57
Total					0 Equilibrio	15.33	100.00
Elementos Fo 90	Q2 de la concentración (%wt)	Masa molar (g/mol)	Moles	Proporción	Moles recalculados	Concentración recalculada (wt%)	Concentración normalizada (wt%)
O	17.90	16	11.19	1.09	4	6.40	43.53
Mg	25.60	24.31	10.53	1.03	1.8	4.38	29.76
Si	28.78	28.09	10.25	1	1	2.81	19.11
Fe	22.92	55.85	4.10	0.40	0.2	1.11	7.60
Total					0 Equilibrio	14.70	100.00
Elementos Fa	Q2 de la concentración (%wt)	Masa molar (g/mol)	Moles	Proporción	Moles recalculados	Concentración recalculada (wt%)	Concentración normalizada (wt%)
O	17.90	16	11.19	1.09	4	6.4	31.40
Mg	25.60	24.31	10.53	1.03	0	0	0.00
Si	28.78	28.09	10.25	1	1	2.81	13.78
Fe	22.92	55.85	4.10	0.40	2	11.17	54.81
Total					0 Equilibrio	20.38	100.00

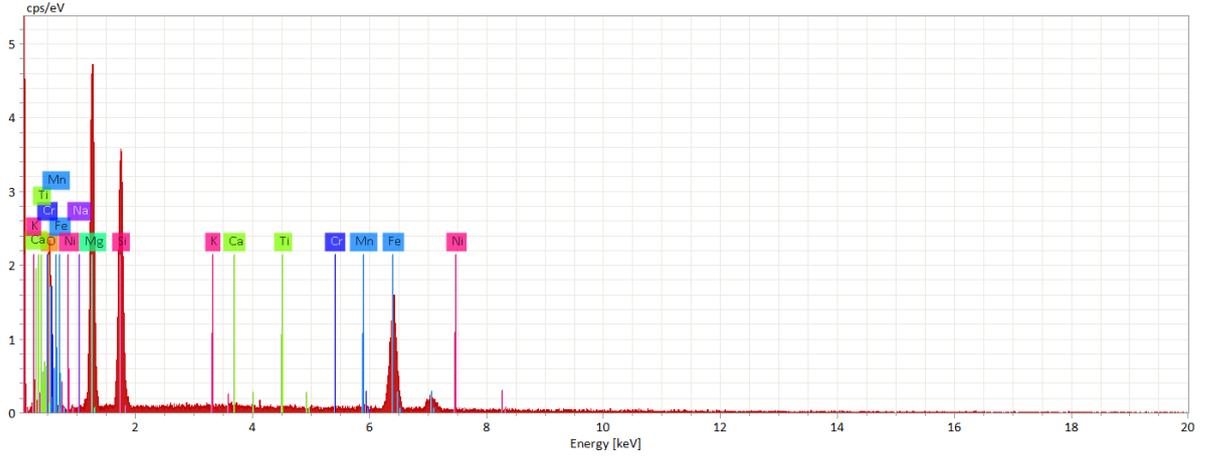
ANEXO 4

**GRÁFICOS DE LA SEÑAL DE RAYOS X PARA
LAS FASES OLIVINO, VIDRIO Y ORTOPIROXENO
A PARTIR DE ANÁLISIS SEM**

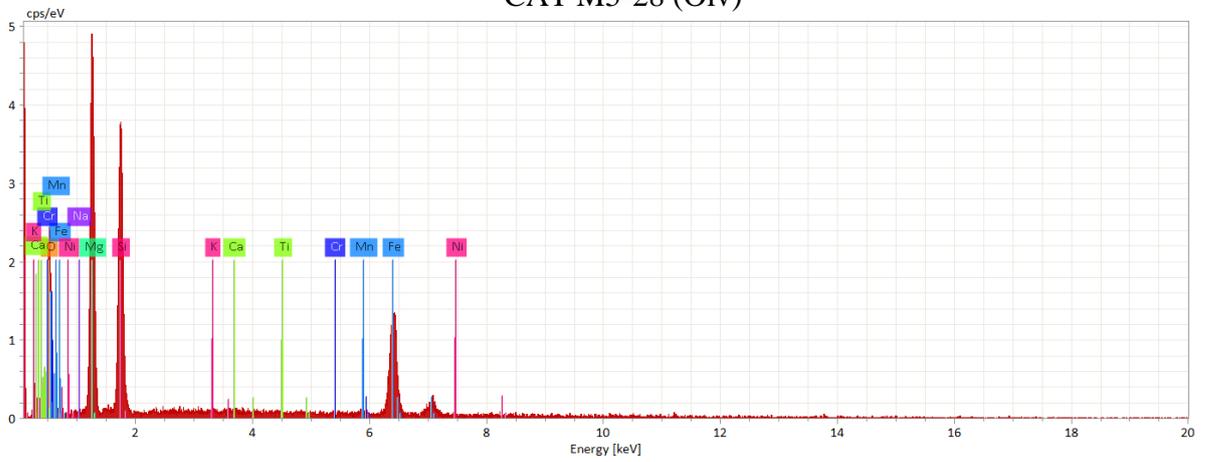
A. Señales reconocidas como la fase mineralógica olivino a partir de SEM.



CAT M5-27 (Olv)

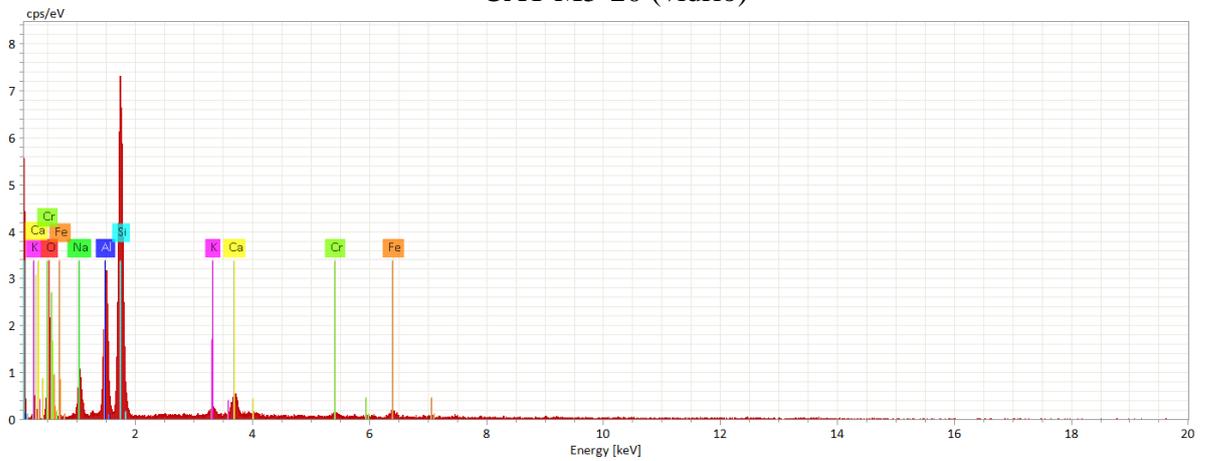


CAT M5-28 (Olv)

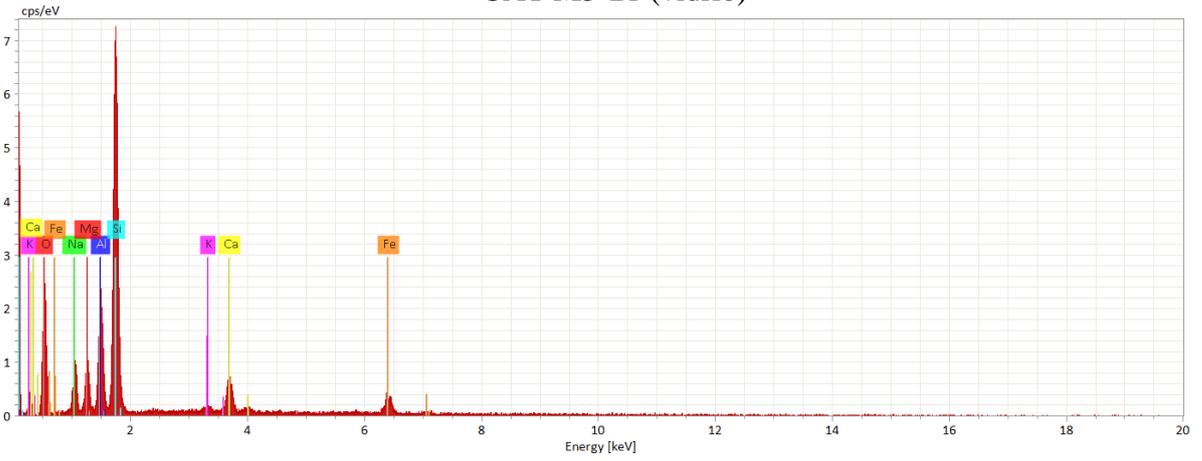


B. Señales reconocidas como la fase mineralógica vidrio a partir de SEM.

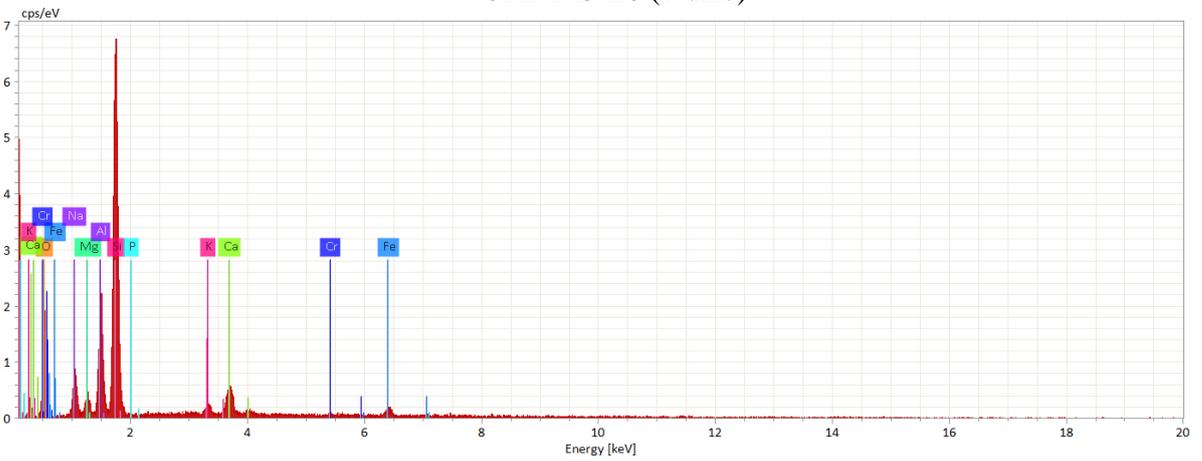
CAT M5-20 (vidrio)



CAT M5-21 (vidrio)

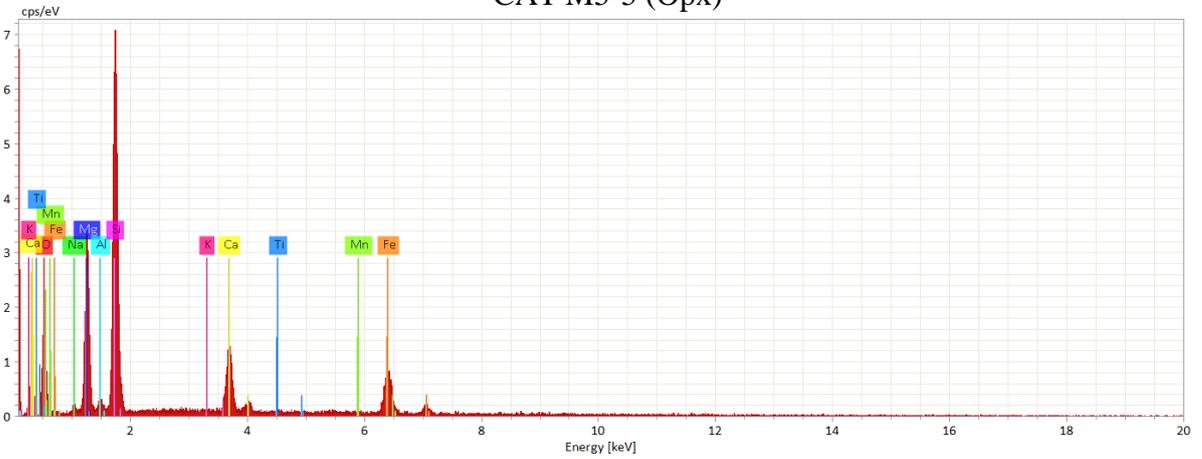


CAT M5-26 (vidrio)

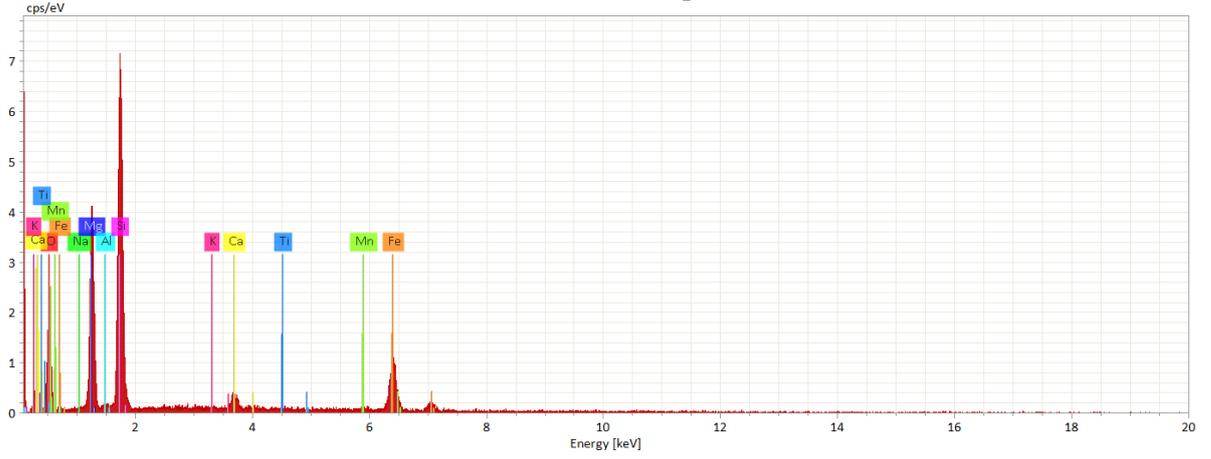


C. Señales reconocidas como la fase mineralógica ortopiroxeno a partir de SEM.

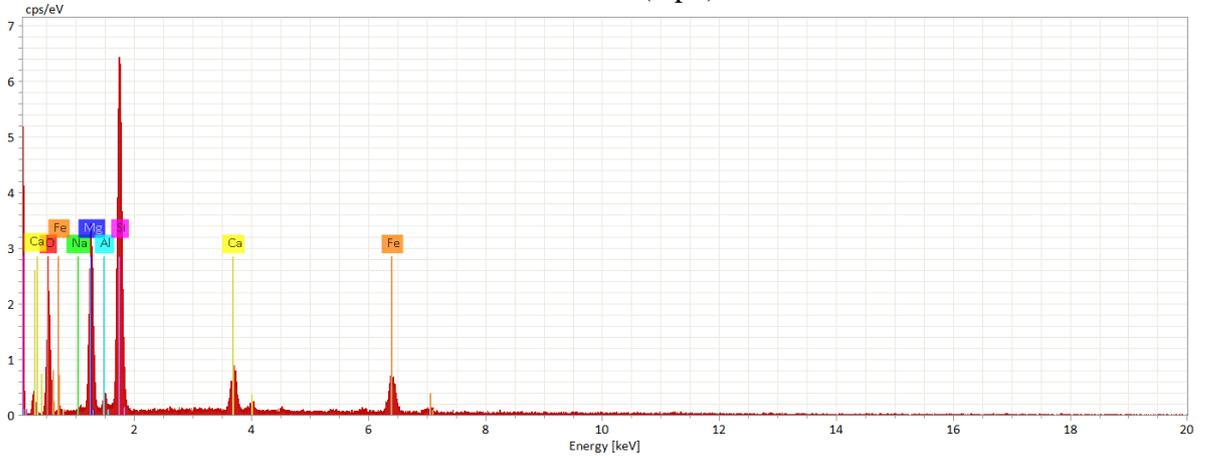
CAT M5-5 (Opx)



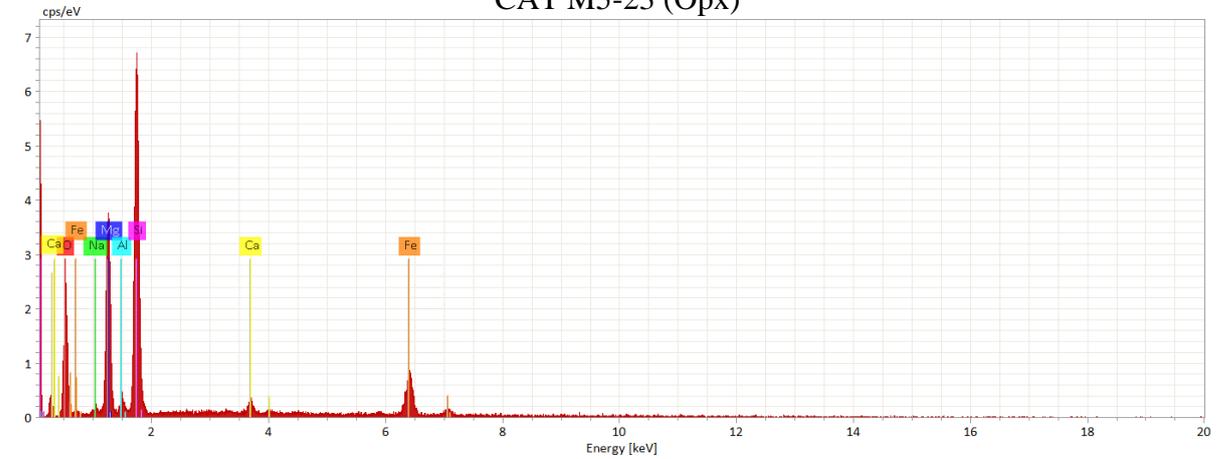
CAT M5-6 (Opx)



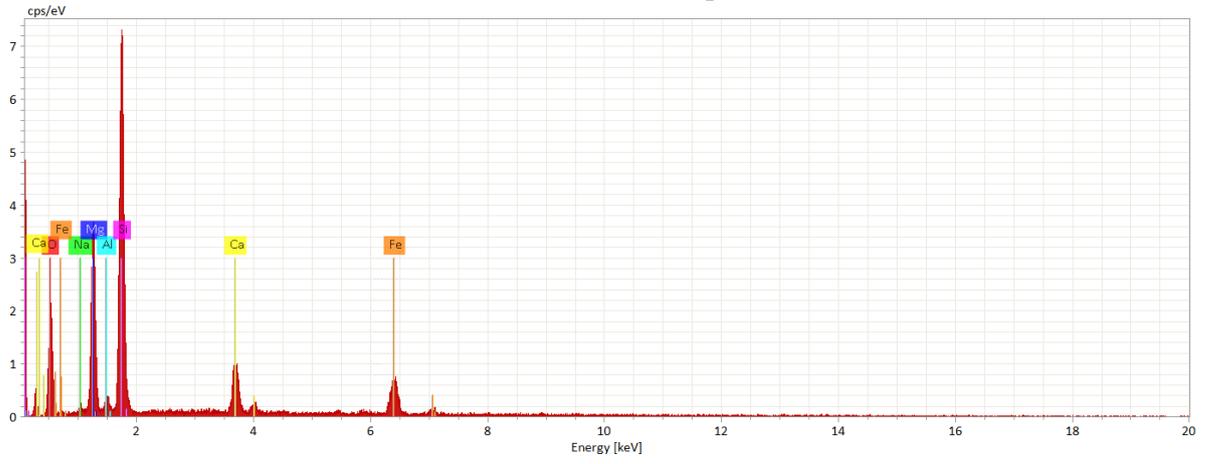
CAT M5-22 (Opx)



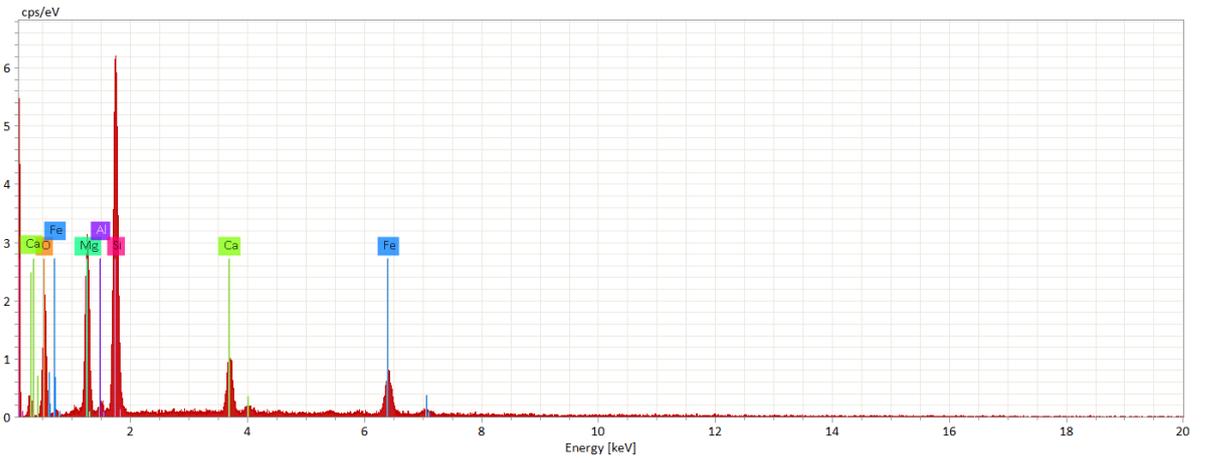
CAT M5-23 (Opx)



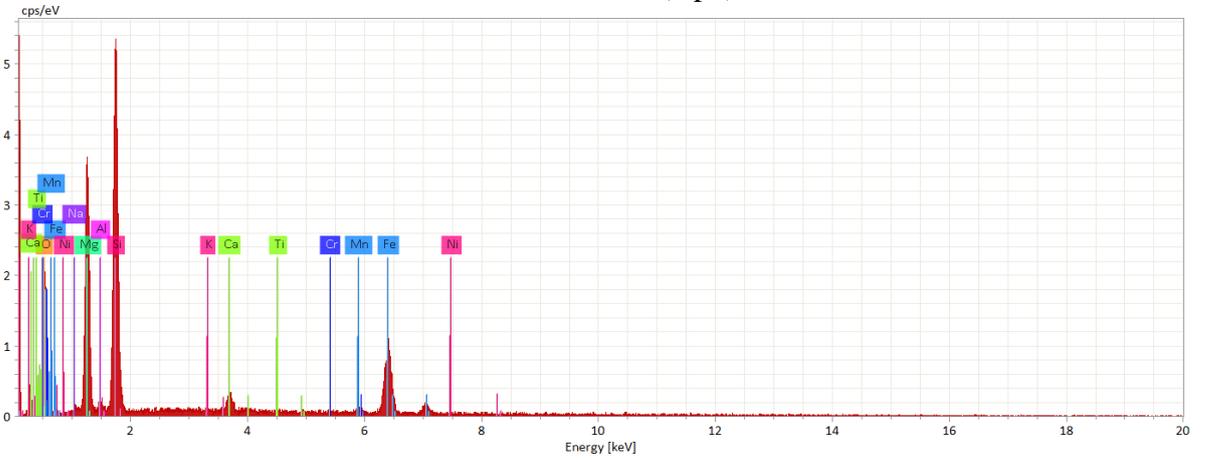
CAT M5-24 (Opx)



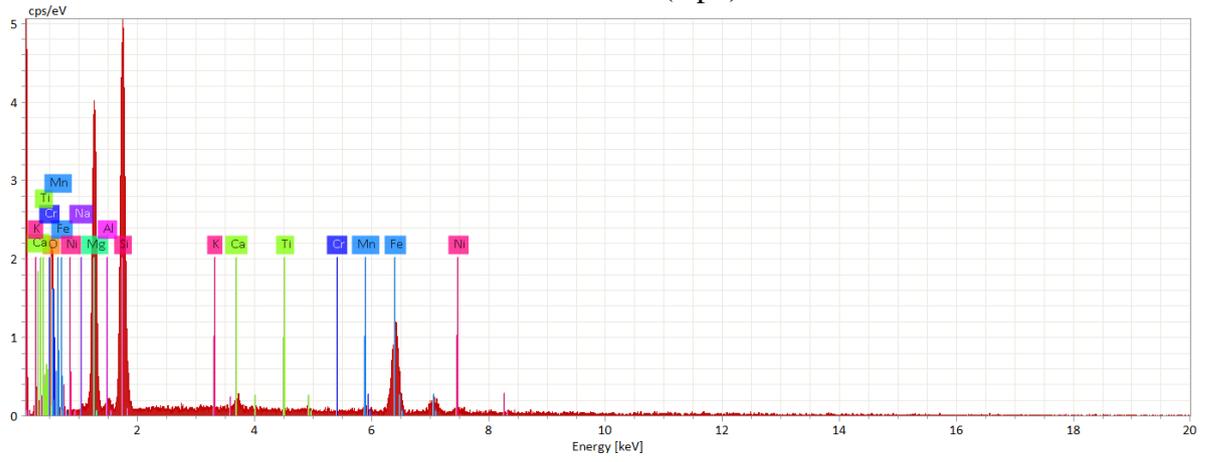
CAT M5-25 (Opx)



CAT M5-29 (Opx)



CAT M5-31 (Opx)



CAT M5-33 (Opx)

