



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

**DESARROLLO DE CALIBRACIÓN EN OLIVINO MEDIANTE ESPECTROSCOPIA  
RAMAN: CLASIFICACIÓN DE CONDRIOS ORDINARIOS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

MARÍA FRANCISCA TAPIA AYALA

PROFESOR GUÍA:  
DANIEL MONCADA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
VERÓNICA OLIVEROS CLAVIJO  
ALEXANDRE CORGNE

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por Fondecyt 11170210 y Fondecypr EQM170103

SANTIAGO DE CHILE  
2023

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE:** Geóloga  
**POR:** María Francisca Tapia Ayala  
**FECHA:** 2023  
**PROFESOR GUÍA:** Daniel Moncada, PhD

## **DESARROLLO DE CALIBRACIÓN EN OLIVINO MEDIANTE ESPECTROSCOPIA RAMAN: CLASIFICACIÓN DE CONDRIOS ORDINARIOS**

La caída de material extraterrestre a la Tierra es un hecho que ocurre constantemente, destacándose los desiertos cálidos y fríos como ubicaciones favorables para la conservación de este tipo de rocas. Las muestras estudiadas en este trabajo provienen del desierto de Atacama, caracterizado por ser uno de los más áridos del mundo, con un porcentaje de material extraterrestre importante que está esperando ser estudiado.

Los condritos ordinarios son el tipo de meteorito más común que se puede encontrar en la superficie terrestre, conteniendo información valiosa sobre los procesos que dieron origen al Sistema Solar. Es debido a esto que su estudio y clasificación es importante, ya que permite ordenar la información y comprender estos eventos con mayor detalle, minimizando la incertidumbre que se tiene sobre estos procesos y, en consecuencia, sobre nuestro origen.

Este trabajo consiste en el desarrollo de una calibración mediante el uso de espectroscopía Raman con el fin de clasificar condritos ordinarios en sus distintos grupos químicos. La metodología y resultados de este estudio se encuentran detallados en este informe, mediante los cuales se clasificaron 6 muestras de condritos ordinarios en dos grupos distintos: H y L.

Esta metodología se basa principalmente en el análisis de espectros Raman de olivino, estudiando el cambio de número de onda o *Raman shift* observado para este mineral y cómo distintas variables, como composición, posición del cristal, y estado de choque afectan estos espectros. Luego, se relaciona la composición de miembros extremos del olivino (fayalita) con los espectros Raman, y se calculan ajustes lineales que representan esta correlación. De acuerdo con estos resultados, se analiza la composición de olivinos en cóndrulos presentes en las muestras, la cual luego es comparada con rangos establecidos de clasificación para cada grupo químico.

## AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por apoyarme desde siempre y darme amor incondicional. A mi papá, por inculcarme el amor por la ciencia y especialmente por la astronomía, por enseñarme a pensar en grande y por impulsarme a siempre seguir estudiando. A mi mamá, por darme todo su apoyo emocional durante mi paso por la universidad, por soportar mis llantos a las 2 de la mañana y mis interminables frustraciones, por enseñarme a siempre pensar positivo y moldear la persona que soy hoy. A mis hermanos, que me motivan a salir adelante y me llenan de risas.

A mis abuelitas Rosa y María Fresia, y a mi tía Peti, por darme el ejemplo de mujeres resilientes, trabajadoras y fuertes, y que sin su ayuda no hubiese podido estudiar sin preocupaciones financieras.

A mis amigos del colegio, I.S., A.A. y J.C., por seguir aquí a pesar de los años. A mis amigos de plan común, algún día nos pondremos de acuerdo para vernos. A Wilki y Vicky de geo, quienes alegraron los últimos años de mi carrera y con quienes compartí infinitas risas, llantos y papitas fritas en las salidas a terreno.

A Rómulo, por acompañarme y apoyarme en todas, por estar siempre dispuesto a ayudar y por quererme incondicionalmente. Por ser mi compañero de vida y mi segundo hogar. Agradecerte por todo lo que has hecho por mi tendría más páginas que esta memoria.

A mi profesor guía, Daniel Moncada, por responder todas y cada una de mis dudas, por su buena disposición y motivación para la realización de este trabajo.

A los proyectos FONDECYT 11170210 y FONDEQUIP EQM170103 destinados a financiar esta memoria de título. A Alexandre Corgne y Pablo Salas por las muestras de olivino  $Fa_{8.1\pm 0.2}-Fa_{22.7\pm 0.5}$  (O11-O19), a Valentina Villanueva por las muestras de olivino  $Fa_{16\pm 0.2}-Fa_{17\pm 0.1}$  (MV83-MV84), y a Eduardo Morgado y Miguel Ángel Parada por las muestras de olivino  $Fa_{21.41\pm 0.3}-Fa_{21.78\pm 0.2}$  (Os1641-Os16413).

## Tabla de Contenido

I.	Introducción .....	1
1.1.	Formulación del Problema .....	1
1.2.	Objetivos.....	3
1.2.1.	Objetivo General.....	3
1.2.2.	Objetivos Específicos .....	3
1.3.	Material de estudio .....	3
1.4.	Trabajos anteriores .....	4
II.	Metodología.....	6
2.1.	Etapas de gabinete.....	6
2.2.	Trabajo en laboratorio.....	6
2.2.1.	Descripción Petrográfica .....	6
2.2.2.	Análisis Raman .....	6
2.2.3.	Análisis de Datos .....	8
III.	Marco teórico .....	11
3.1.	Generalidades .....	11
3.2.	Clasificación de Condritos .....	11
3.2.1.	Clasificaciones	Secundarias
	12	
3.2.2.	Metamorfismo	de Choque
	13	
3.2.3.	Clasificaciones	Terciarias
	15	
3.3.	Condritos Ordinarios .....	15
3.3.1.	.....	Caracterización
	16	
i.	Cóndrulos.....	17
ii.	Matriz.....	19
iii.	Metales de Fe-Ni y sulfuros .....	19
iv.	Inclusiones refractarias .....	20
3.4.	Espectroscopía Raman.....	20
3.4.1.	Principios Básicos.....	22

3.4.2. Cristalografía y espectros Raman del Olivino	24
3.4.2.1 Propiedades de las bandas Raman características del olivino .....	25
IV. Resultados.....	29
4.1. Calibración del espectrómetro .....	29
4.2. Espectroscopía Raman .....	31
4.2.1. Muestras de composición conocida .....	31
4.2.3. Muestras estudiadas.....	34
4.3. Análisis de Datos: clasificación de muestras .....	38
4.3. Petrografía.....	40
4.1.1. MV023.....	40
4.1.2. MV025.....	41
4.1.3. DM053-A1.....	42
4.1.4. DM055-A2.....	43
4.1.5. JG124.....	44
4.1.6. JG151.....	46
V. Discusiones .....	47
5.1. Espectroscopía Raman .....	47
5.2. Calibración.....	48
5.3. Análisis de datos: clasificación de muestras.....	49
VI. Conclusiones .....	51
Bibliografía .....	52
Anexos.....	57
A. Mapas petrográficos y Espectros Raman .....	57
A.1. Muestras Estudiadas .....	57
A.2. Muestras de composición conocida.....	69
B. Calibraciones.....	73
B.1. Dependencia de razón de intensidades con respecto a la orientación del cristal ....	73
B.2. Tiempo de adquisición .....	73
B.3. Cálculo de ajuste lineal .....	75
C. Cálculo de composición de Fa para cada cóndrulo.....	77

## Índice de tablas

Tabla 1. Códigos de muestras estudiadas y su clasificación petrológica según Amengual (2019) y Luna (2022). *Clasificada como S3 por Amengual (2019) y S5 por Luna (2022). .....	4
Tabla 2. Criterios de definición de tipos petrológicos para condritos, según Van Schmus y Wood (1967).....	13
Tabla 3. Criterios para establecer los distintos estados de choque progresivos en condritos ordinarios (Stöffler et al., 1991) .....	14
Tabla 4. Grados de meteorización y sus criterios asociados (Hutchinson, 2004). .....	15
Tabla 5. Propiedades de condritos ordinarios equilibrados. Extraído y modificado de Vernazza et al. (2015).....	16
Tabla 6. Composición en porcentaje molar de fayalita para muestras de granos de olivino, y su cambio de longitud de onda o Raman shift para bandas A y B de olivino, y para las bandas 1 y 2 de neón.....	32
Tabla 7. Composición en porcentaje molar de fayalita para muestras de granos de olivino, y su cambio de longitud de onda o Raman shift para bandas A y B de olivino, y para las bandas 1 y 2 de neón.....	33
Tabla 8. Peaks A y B obtenidos para los cóndrulos escogidos de las muestras MV023 y MV025. ....	35
Tabla 9. Peaks A y B obtenidos para los cóndrulos escogidos de las muestras DM053-A1 y DM055-A2. ....	36
Tabla 10. Peaks A y B obtenidos para los cóndrulos escogidos de las muestras JG124 y JG151. ....	37
Tabla 11. Resultados de FWHM para cada muestra de condrito ordinario. ....	38
Tabla 12. Contenido promedio de fayalita calculado de acuerdo con los resultados obtenidos mediante la calibración, y su clasificación según grupo químico basado en los rangos establecidos por Van Schmus & Wood (1967). ....	39
Tabla 13. Resultados de FWHM para cada muestra de condrito ordinario, y su estado de choque clasificado anteriormente por Amengual (2019) para todas las muestras y Luna (2022) para las muestras MV025 y JG124. ....	48
Tabla 14. Resumen de los resultados obtenidos para las clasificaciones de todas las muestras, según la metodología aplicada en este trabajo. ....	50
Tabla 15. Razón de intensidades obtenidas para las bandas A y B representativas del olivino, y su variación con respecto a la orientación de la muestra medida en intervalos de 15°.....	73

Tabla 16. Intensidades $I_A$ e $I_B$ para bandas A y B característicos del olivino, para los puntos P1, P2 y P3 de la muestra Os164-12, de acuerdo a los tiempos de adquisición en un rango de 5 a 60 segundos. ....	73
Tabla 17. Distribución normal calculada de acuerdo a los resultados mostrados en la tabla 16... ..	74
Tabla 18. Resultados de calibración calculada a partir de las ecuaciones definidas por Bakker (2021) para las muestras de composición conocida. ....	75
Tabla 19. Resultados de composición de Fayalita para los cóndrulos de la muestra MV023 .....	77
Tabla 20. Resultados de composición de Fayalita para los cóndrulos de la muestra MV025 .....	78
Tabla 21. Resultados de composición de Fayalita para los cóndrulos de la muestra DM053-A1 .....	79
Tabla 22. Resultados de composición de Fayalita para los cóndrulos de la muestra MV023 .....	80
Tabla 23. Resultados de composición de Fayalita para los cóndrulos de la muestra JG124 .....	81
Tabla 24. Resultados de composición de Fayalita para los cóndrulos de la muestra JG151 .....	82

## Índice de figuras

Figura 1. Porcentaje molar de Ferrosilita vs. Porcentaje molar de Fayalita en olivinos de condritos ordinarios equilibrados. Extraído y modificado de Pourkhorsandi et al. (2015).....	2
Figura 2. Disposición de las muestras para la toma de espectros Raman con luz de Neón. ....	7
Figura 3. Ajustes de tipo Lorentziano (curva amarilla y roja), para bandas de olivino (A) y neón (B) (puntos verdes). ....	8
Figura 4. (A) Representación esquemática del método de calibración definido por Bakker (2021). (B) Espectro Raman obtenido para la muestra Os164-12, en donde se muestran las bandas de olivino entre dos bandas de Neón.....	10
Figura 5. Diagrama de clasificación de meteoritos. Extraído y modificado de Krot et al., (2007). ....	12
Figura 6. Imágenes SEM de texturas típicas presentes en cóndrulos de condritos con composiciones variadas. (a) Texturas no porfídicas, en donde se muestran cóndrulos criptocristalinos (CC), radiados, que comúnmente son ricos en piroxeno (RP) y dendríticos, comúnmente de olivino (OB). (b) Texturas porfídicas, en donde se encuentran cóndrulos ricos en óxidos de Mg y Fe, respectivamente. Extraído de Russell et al. (2018).....	18
Figura 7. Diagrama de los procesos de dispersión de Rayleigh y Raman. Extraído y modificado de Smith & Dent (2019). ....	23
Figura 8. Estructura cristalina del Olivino (Pbnm) con tetraedros aislados de SiO <sub>4</sub> asociados a los cationes octaedrales M1 y M2, visto desde el eje a. Extraído de Kuebler et al. (2006). ....	24
Figura 9. Espectros Raman de olivino en la región 700-1000 cm <sup>-1</sup> . Extraído de Kuebler et al., 2006. ....	26
Figura 10. Dependencia del ángulo de las razones de intensidad para dos peaks Raman a 822 cm <sup>-1</sup> y 855 cm <sup>-1</sup> , a lo largo del láser incidente. Extraído de Ishibashi et al., 2008. ....	27
Figura 11. Diagrama de orientación cristalográfica del olivino (la flecha indica la dirección del láser incidente), y espectros Raman representativos cerca de los ejes [100] (a), [010] (b) y [001] (c). Extraído y modificado de Ishibashi et al., 2008. ....	28
Figura 12. Gráfica que representa la dependencia de la razón de intensidades I <sub>A</sub> /I <sub>B</sub> de las bandas representativas del olivino con respecto a la orientación de la muestra, medida en intervalos de 15°. ....	29
Figura 13. Espectros Raman de la muestra Os164-12, tomados en intervalos de tiempo de 5 a 60 segundos. ....	30
Figura 14. (A) Razón de intensidades I <sub>A</sub> /I <sub>B</sub> (para bandas A y B características de olivino, respectivamente) en función del tiempo. (B) Distribución normal calculada para los datos anteriores, en donde se observa un máximo o valor de tendencia en, aproximadamente, I <sub>A</sub> /I <sub>B</sub> = 1.14. ....	30
Figura 15. Espectro Raman representativo obtenido para una muestra de cristal de olivino de composición conocida (Olivino 83, composición Fa17±0.1), obtenida por EMPA.....	31
Figura 16. Espectro Raman representativo obtenido para una muestra de cóndrulo (MV023-A). 35	
Figura 17. Correlación entre contenido de fayalita y los resultados de calibración para muestras de composición conocida (terrestres) y el ajuste lineal obtenido. ....	39

Figura 18. Clasificación de muestras según la cantidad de fayalita calculada de acuerdo a la calibración. El grupo químico LL queda fuera del rango de datos obtenidos.....	40
Figura 19. Microfotografía de cóndrulo y fragmento MV023-A (A y B) y MV023-B (C y D), a luz reflejada y luz transmitida respectivamente. ....	41
Figura 20. Microfotografías de cóndrulos MV025-D (A y B) y MV025-E (C y D), a luz reflejada y luz transmitida respectivamente. ....	42
Figura 21. Microfotografías de cóndrulos DM053A1-C (A y B) y DM053A1-D (C y D), a luz reflejada y luz transmitida respectivamente. ....	43
Figura 22. Microfotografías de cóndrulos DM055A2-A (A y B), DM055A2-B (C y D), a luz reflejada y luz transmitida respectivamente. ....	44
Figura 23. Microfotografías de cóndrulos JG124-C (A y B) y JG124-J (C y D), a luz reflejada y luz transmitida respectivamente. ....	45
Figura 24. Microfotografías de fragmentos JG151-A (A y B) y JG151-C (C y D), a luz reflejada y luz transmitida respectivamente. ....	46
Figura 25. Resultados de composición de fayalita (%mol.) y su clasificación en grupos químicos para condritos ordinarios estudiados de acuerdo con las ecuaciones obtenidas por Pittarello et al. (2015) -en rojo- y el ajuste lineal calculado en este trabajo (azul). (a) Resultados para la banda A, (b) resultados para la banda B. ....	49
Figura 26. Mapa de corte de la muestra MV023 con microfotografías, aumento 4X. ....	58
Figura 27. Mapa de la muestra MV025 con microfotografías, aumento 4X.....	58
Figura 28. Mapa de la muestra DM053-A1 con microfotografías, aumento 4X.....	59
Figura 29. Mapa de la muestra DM055-A2 con microfotografías, aumento 4X.....	60
Figura 30. Mapa de la muestra JG124 con microfotografías, aumento 4X.....	61
Figura 31. Mapa de la muestra JG151 con microfotografías, aumento 4X.....	62
Figura 32. Espectros Raman para la muestra MV023. (a) Cóndrulo A, (b) Cóndrulo B. ....	63
Figura 33. Espectros Raman para la muestra MV025. (a) Cóndrulo D y (b) Cóndrulo E. ....	64
Figura 34. Espectros Raman para la muestra DM053-A1. (a) Cóndrulo C y (b) Cóndrulo D.....	65
Figura 35. Espectros Raman para la muestra DM055-A2. (a) Cóndrulo A, y (b) Cóndrulo B.....	66
Figura 36. Espectros Raman para la muestra JG124. (a) Cóndrulo C, (b) Cóndrulo J.....	67
Figura 37. Espectros Raman para la muestra JG151. (a) Cóndrulo A y (b) Cóndrulo C. ....	68
Figura 38. Cristales de olivino de composición conocida. (a) Ol-1, Fa $17.7\pm 0.1$ , (b) Ol-3, Fa $22.7\pm 0.5$ , (c) Ol-5, Fa $18.8\pm 0.2$ , (d) Ol-9, Fa $8.1\pm 0.2$ , (e) Ol-11, Fa $9.7\pm 0.2$ . ....	69
Figura 39. Cristales de olivino (a) MV83, composición Fa $17\pm 0.1$ , y (c) MV84, composición Fa $16\pm 0.2$ . ....	70
Figura 40. Cristales de olivino 1 (Fa $21.75\pm 0.3$ ) y 6 (Fa $21.53\pm 0.2$ ) de la muestra Os-164 1mm..	70
Figura 41. Cristales de olivino 12 (Fa $21.78\pm 0.2$ ) y 13 (Fa $21.41\pm 0.3$ ) de la muestra Os-164 0.5 mm. ....	70
Figura 42. Espectros Raman obtenidos para muestras de cristales de olivino de composiciones conocidas, obtenidas por EMPA. (a) Olivino 1, composición Fa $17.7\pm 0.1$ . (b) Olivino 3, composición Fa $22.7\pm 0.5$ , (c) Olivino 5, composición Fa $18.8\pm 0.2$ , (d) Olivino 9, composición Fa $8.1\pm 0.2$ , (e) Olivino 11, composición Fa $9.7\pm 0.2$ y (f) Olivino 83, composición Fa $17\pm 0.1$ . ....	71

Figura 43. Espectros Raman obtenidos para muestras de cristales de olivino de composiciones conocidas, obtenidas por EMPA. (a) Olivino 84, composición  $\text{Fa}16\pm0.2$ , (b) Olivino Os164-1, composición  $\text{Fa}21.75\pm0.3$ , (c) Olivino Os164-6, composición  $\text{Fa}21.53\pm0.2$ , (d) Olivino Os164-12, composición  $\text{Fa}21.78\pm0.2$ , (e) Olivino Os164-13, composición  $\text{Fa}21.41\pm0.3$ ..... 72

# I. Introducción

Los meteoritos son una fuente de información importante sobre los procesos que dieron origen y la evolución posterior del Sistema Solar. Recientemente se ha reportado que, en un año, ocurren aproximadamente 17.000 impactos alrededor del globo (Evatt et al., 2020), en donde la mayor parte de estos eventos ocurren en latitudes bajas. Los principales hallazgos de este material se encuentran limitados a desiertos cálidos y fríos, debido a las condiciones favorables para la conservación de estos meteoritos. En este sentido, se destaca el desierto de Atacama como uno de los lugares más propicios para la búsqueda y descubrimiento de este tipo de rocas, del cual provienen las muestras estudiadas en esta memoria.

La clasificación de meteoritos es un proceso necesario para poder comprender los distintos eventos que ocurrieron en la formación temprana del sistema en el que vivimos, definiendo propiedades distintivas para el material estudiado. Este tipo de análisis implica dar un orden a la información obtenida y agruparla para su mejor entendimiento. Así, la clasificación de meteoritos es importante debido a que se definen propiedades mineralógicas y petrológicas fundamentales que permiten estudiar estos procesos con mayor detalle y, además, permite ordenar meteoritos en grupos de características similares que facilita una mejor comprensión del origen de este tipo de rocas y su relación con el entorno.

Según Grier y Rivkin (2019) los meteoritos pueden dividirse principalmente en dos categorías importantes, que se distinguen de acuerdo con los procesos de formación de estos. Así, se tienen los condritos, que son aquellos formados en las etapas más primitivas del Sistema Solar mediante aglomeración de partículas de gas y polvo en el disco protoplanetario (Grier & Rivkin, 2019). La segunda categoría corresponde a los no-condritos, los cuales sufrieron cambios mediante procesos de diferenciación planetaria, provocando cambios en su mineralogía, textura y química (Grier & Rivkin, 2019; Hutchinson, 2004). A su vez, estas dos categorías se dividen en clases que agrupan sus distintas características. Los condritos pueden clasificarse en condritos ordinarios, carbonáceos, de enstatita, R y K. Mientras que los no-condritos se dividen en acondritos, meteoritos de Fe y mixtos (que contienen minerales silicatados y metales Fe-Ni) (Hutchinson, 2004).

## 1.1. Formulación del Problema

Según Van Schmus & Wood (1967), los condritos ordinarios pueden subclasificarse en grupos dependiendo de la cantidad de hierro presente en la muestra. Estos corresponden a los grupos H (*high iron*), L (*low iron*) y LL (*very low iron*). La clasificación de este tipo de meteoritos, además, es un proceso que implica observación y descripción petrológica, mediante las cuales se reconocen los distintos minerales presentes y se detalla la presencia de alteraciones provocadas por procesos de metamorfismo y meteorización terrestre (Bland et al., 2006; Hutchinson, 2004; Stöffler et al., 1991; Van Schmus & Wood, 1967).

Los condritos ordinarios se caracterizan por presentar una textura representativa, que corresponde a una matriz de grano fino con agregados minerales llamados cóndrulos

(Hutchinson, 2004; Ulloa, 2017). Estos presentan, generalmente, formas esféricas y se componen principalmente por los minerales ferromagnesianos olivino y piroxeno (Russell et al., 2018). Para condritos equilibrados (tipo petrológico mayor o igual a 4), Van Schmus y Wood (1967) proponen rangos establecidos de cantidad de fayalita en olivinos presentes en estos cóndrulos para la clasificación y distinción de condritos ordinarios en los diferentes grupos químicos, según la cantidad de hierro presente (Fig. 1).

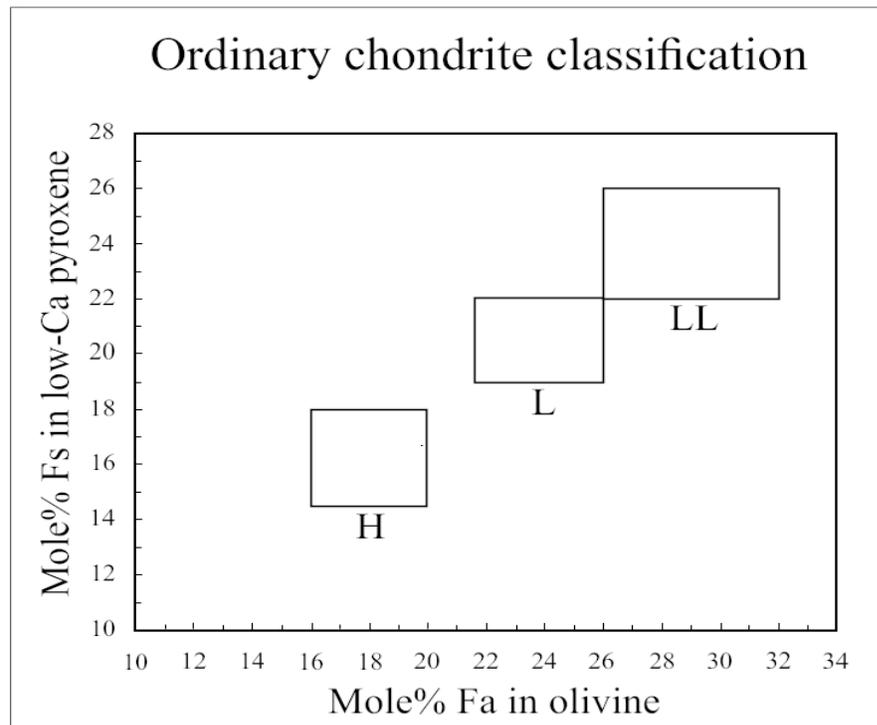


Figura 1. Porcentaje molar de Ferrosilita vs. Porcentaje molar de Fayalita en olivinos de condritos ordinarios equilibrados. Extraído y modificado de Pourkhorsandi et al. (2015).

La espectroscopía Raman es una técnica no destructiva de análisis químico, basada en la interacción de la luz monocromática con los estados vibracionales de una molécula (Das & Agrawal, 2011). El cambio de longitud de onda, inducido por la interacción de fotones presentes en la luz, depende de la estructura química de esta última y, por lo tanto, su espectro Raman representa una “huella digital” del mineral estudiado (Das & Agrawal, 2011). Esta técnica representa una herramienta significativa para investigaciones petrológicas y mineralógicas de rocas terrestres y meteoritos, proporcionando identificación mineral de forma no destructiva, rápida y específica (Fries & Steele, 2018). Esta herramienta presenta, además, la capacidad de mostrar la presencia de una amplia variedad de fases minerales en un solo espectro a resoluciones sub-micrométricas. Fries y Steele (2018) destacan que el resultado práctico de un espectro Raman es la identificación individual de fases minerales que se encuentran agrupadas, mientras que otras técnicas que utilizan haz de electrones (como microsondas electrónicas o SEM) entregan la composición extensa de las fases entremezcladas o la suma de las contribuciones de todas las fases presentes dentro del volumen de excitación.

Este trabajo busca facilitar la clasificación de condritos ordinarios en los distintos grupos químicos (H, L y LL), mediante el uso de espectroscopía Raman. Esto último se basa en relaciones lineales obtenidas del estudio y análisis de espectros Raman de muestras de condritos ordinarios, relacionando la cantidad de hierro presente en minerales de olivino (fayalita-forsterita) con el cambio de longitud de onda o bandas del espectro obtenido para cada espécimen.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo General**

Desarrollo de una calibración utilizando espectroscopía Raman para clasificar condritos ordinarios en grupos químicos.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Realizar calibración mediante espectroscopía Raman, obteniendo espectros de muestras terrestres de composición conocida con luz de neón, relacionando matemáticamente la posición de las bandas A y B características del olivino y de bandas características de neón.
- Proponer un ajuste lineal que relacione la calibración anterior, con la cantidad de fayalita presente en las muestras de composición conocida.
- Caracterizar petrográficamente condritos candidatos de las muestras de condritos de composición desconocida, realizar el análisis Raman y clasificarlas de acuerdo con el ajuste lineal calculado y los rangos de contenido de fayalita correspondientes para cada grupo químico (H, L y LL).

## **1.3. Material de estudio**

Las muestras de estudio corresponden a 6 cortes delgados de meteoritos hallados en una campaña de terreno realizada en noviembre de 2017, en los sectores de El Médano y Los Vientos, región de Antofagasta. Estos meteoritos fueron originalmente propuestos como condritos ordinarios a partir de una inspección macroscópica, y luego fueron clasificados, mediante estudios químicos y petrológicos, en subgrupos químicos y petrológicos respectivos, los cuales fueron realizados por Amengual (2019) para todas las muestras y Luna (2022) para las muestras MV023 y MV025. Los códigos de cada muestra y su clasificación se encuentran en la tabla 1.

Tabla 1. Códigos de muestras estudiadas y su clasificación petrológica según Amengual (2019) y Luna (2022). \*Clasificada como S3 por Amengual (2019) y S5 por Luna (2022).

<b>Código</b>	<b>Grupo químico y tipo petrológico</b>	<b>Grado de meteorización</b>	<b>Estado de Choque</b>
MV023	H6	W3	S4
MV025	H4	W2	S2
DM053 A1	H6	W1	S3
DM055 A2	L6	W4	S3
JG124	H5	W1	S3-S5*
JG151	L6	W2	S5

#### 1.4. Trabajos anteriores

Utilizando espectroscopía Raman, Wang et al. (2001) caracterizan estructural y composicionalmente distintos tipos de piroxenos provenientes de rocas terrestres y meteoritos, logrando diferenciarlos de acuerdo con la cantidad -en porcentaje molar- de sus miembros extremos (Mg, Fe y Ca), a partir de una relación lineal para las tres bandas en el espectro representativo del piroxeno. Este porcentaje molar depende del número de onda o *Raman shift* correspondiente a cada banda característica.

Posteriormente, Wang et al. (2003) utilizan espectroscopía Raman para identificar y caracterizar las fases minerales principales, menores y trazas del meteorito marciano EETA 79001, en donde se proporciona información sobre variaciones composicionales de piroxeno y olivino. Estas variaciones se basan en la posición de las bandas Raman y son calculadas mediante correlaciones de tipo cuadráticas que relacionan este cambio con las fracciones molares de Mg ( $Mg/Mg + Fe$ ) para olivinos y piroxenos. Estos resultados son validados con datos obtenidos de análisis de microsonda electrónica realizada previamente.

Kuebler et al. (2006) realizan un trabajo similar para obtener la composición Fayalita-Forsteria en olivinos presentes en muestras terrestres, de meteoritos, y dos muestras sintéticas de composición  $Fa_{100}$  y  $Fo_{100}$ , cubriendo el espectro de composiciones para olivinos. Asimismo, se obtienen relaciones lineales para la cantidad -en porcentaje molar- de miembros extremos (Fa y Fo), de acuerdo con las dos bandas presentes en el espectro Raman para olivinos.

A partir de estos estudios, Pittarello et al. (2015) proponen la espectroscopía Raman como una técnica alternativa para determinar el contenido de miembros extremos de olivino y piroxeno en condritos ordinarios, mediante una relación entre el cambio de longitud de onda de bandas características en el espectro y su razón Mg/Fe en estas fases. El contenido de Ferrosilita-

Enstatita en piroxenos y Fayalita-Forsterita en olivinos fue estimado mediante un recálculo de las relaciones lineales propuestas por Wang et al. (2001) y Kuebler et al. (2006), respectivamente. Este estudio deduce una relación entre la posición de las bandas en el espectro Raman para olivino y piroxeno, y los distintos grupos químicos en los que se pueden clasificar los condritos ordinarios. Para esto se utilizaron dos instrumentos: LabRAM HR Evolution (HORIBA Scientific), equipado con un láser de estado sólido correspondiente a luz verde (532 nm), con excitación de 1.25 mW y un filtro de 10%; y SENTERRA Dispersive Raman Microscope (BRUKER), con un láser de estado sólido correspondiente a luz verde (532 nm), con excitación de 2 mW. Se utilizó la base de datos RRUFF para realizar una correlación de referencia entre espectros Raman para olivinos y piroxenos y su composición química, y tres condritos (2 condritos ordinarios y uno de enstatita) para comprobar y refinar esta relación, específicamente para condritos ordinarios. Finalmente, utilizando estas correlaciones, se clasifican 8 muestras anteriormente analizadas por microsonda y microscopía óptica (que pertenecen a las colecciones *Antarctic* y *Northwestern Africa*), a forma de “prueba a ciegas”, para comprobar la validez del método. De esto se obtiene que los resultados para espectros de olivino son consistentes con la clasificación oficial y para piroxenos los resultados son menos directos, pero presentan información que, en general, está de acuerdo con los datos para olivinos. En este estudio se destaca que el uso de espectroscopía Raman es un método alternativo para la clasificación química en masa de condritos ordinarios y, además, que esta metodología no es nueva en la literatura, sin embargo, no había sido usada anteriormente para la clasificación de condritos ordinarios a gran escala.

Saikia et al. (2017) utilizan el estudio anterior como base para caracterizar el meteorito Kamargaon. En este trabajo se realiza análisis mediante microsonda electrónica que indica que este meteorito pertenece al grupo L. Este análisis se compara con lo propuesto por Pittarello et al. (2015), en donde, de acuerdo con la posición y los rangos establecidos para las bandas de olivino y piroxeno, a Kamargaon se le atribuye el grupo químico L. Esto implica que el análisis Raman es consistente con los resultados, proporcionando validez al método propuesto anteriormente.

Nascimento-Dias et al. (2021) utilizan la misma metodología para analizar un fragmento del meteorito de Allende que corresponde a un meteorito de tipo carbonáceo, expandiendo las posibilidades de clasificación de condritos no solo ordinarios, sino para las otras clases (carbonáceos) mediante espectroscopía Raman. En este estudio se utilizó un láser de 632.8 nm, estandarizado con una excitación de 5 mW. La calibración del instrumento se llevó a cabo utilizando una lámina de silicio con un Raman shift de  $521 \text{ cm}^{-1}$ , y los espectros Raman se ajustaron utilizando geometría Lorentziana. A diferencia de las otras investigaciones, Nascimento-Dias et al. (2021) solo utiliza espectroscopía Raman para la clasificación de este meteorito, del cual no se sabe con exactitud la cantidad de hierro presente. Sin embargo, se concluye que la metodología utilizada proporciona información de manera rápida y efectiva sobre la razón de Fa en la muestra, por lo que se considera la espectroscopía Raman como una alternativa prometedora para la clasificación química de colecciones grandes de condritos.

## II. Metodología

### 2.1. Etapa de gabinete

Recopilación y estudio de material bibliográfico sobre los distintos tipos de meteoritos, sus procesos de formación, componentes y su clasificación. Para el caso de estudio, se hace énfasis en el análisis de condritos ordinarios y su clasificación de acuerdo con los distintos grupos químicos (H, L y LL) y su composición según su porcentaje molar de los miembros extremos Fa-Fo para olivinos.

Se recopila información y material bibliográfico de estudios previos sobre espectroscopía Raman de olivino, y la relación de esta técnica con la clasificación de condritos ordinarios.

### 2.2. Trabajo en laboratorio

#### 2.2.1. Descripción Petrográfica

Se realizó la observación de las muestras estudiadas utilizando el microscopio óptico Olympus BX53 en el laboratorio de inclusiones fluidas del departamento de Geología de la Universidad de Chile. Esta observación consistió en un reconocimiento de texturas y componentes presentes en las muestras y, específicamente, la selección de cóndrulos para el análisis Raman. Debido a la variedad de estados de meteorización, se eligieron al menos 2 cóndrulos distintos por cada muestra, descartando aquellas en las que estos agregados no pudieron identificarse con claridad.

#### 2.2.2. Análisis Raman

El análisis Raman se llevó a cabo en el laboratorio micro-Raman del departamento de Geología de la Universidad de Chile, con un espectrómetro LabRAM HR Evolution (HORIBA Scientific) equipado con un láser HeNe correspondiente a luz verde (532 nm), con un objetivo 100X, resolución espectral de 1800 gr/mm, un filtro de 10% para no dañar la muestra (~5 mW), una apertura de 200  $\mu\text{m}$ , y un *spot* Raman de 1  $\mu\text{m}$ . Al momento de utilizar el instrumento, se calibró utilizando una lámina de silicio con vibración principal en la longitud de onda 520  $\text{cm}^{-1}$  y luz de Neón.

A diferencia de los trabajos anteriores, para realizar la calibración en cristales de olivino se tomó en cuenta la propiedad anisótropa que presenta este mineral, es decir, que sus características dependen de la orientación del cristal en la que se miden (Kocks, 2000). Para confirmar esta propiedad, se tomaron espectros de un cristal de olivino terrestre de composición conocida  $\text{Fa}_{21.78}$  (muestra Os164-12), obtenida previamente mediante análisis por microsonda electrónica. Los espectros fueron tomados en un mismo punto, con orientaciones entre 0° a 90° con intervalos de 15°, en tiempos de 5 segundos, en un rango entre 200 a 1750  $\text{cm}^{-1}$ . De acuerdo con las propiedades anisótropas del olivino confirmadas mediante el análisis anterior, se realiza una calibración para obtener un tiempo de

adquisición para la toma de espectros de todas las muestras. El tiempo de adquisición es aquel en donde la variación entre la razón de intensidades de las bandas características del olivino ( $I_A/I_B$ ) es mínima o alcanza una tendencia, implicando -a su vez- una variación mínima de posiciones en los cristales de olivino.

De acuerdo con el tiempo de adquisición obtenido, se tomaron espectros de 11 muestras terrestres correspondientes a cristales de olivino de composición conocida (obtenidas previamente mediante análisis por microsonda electrónica) y de las 6 muestras de condritos ordinarios a estudiar, para las cuales se analizaron dos cóndrulos o fragmentos por muestra. Para cada muestra, se tomaron espectros Raman en tres puntos distintos, tres veces, con una luz de Neón por debajo de la muestra (Fig. 2), en un rango de  $200-1750\text{ cm}^{-1}$ . Este rango cubre tanto las posiciones de las bandas 1 y 2 de Neón utilizadas para la calibración (que se encuentran en los  $276-277\text{ cm}^{-1}$  y  $1707-1709\text{ cm}^{-1}$ , respectivamente), como las posiciones de las bandas características de olivino, que se encuentran entre los  $815-825\text{ cm}^{-1}$  y  $838-857\text{ cm}^{-1}$  (Kuebler et al., 2006) para las bandas A y B, respectivamente.

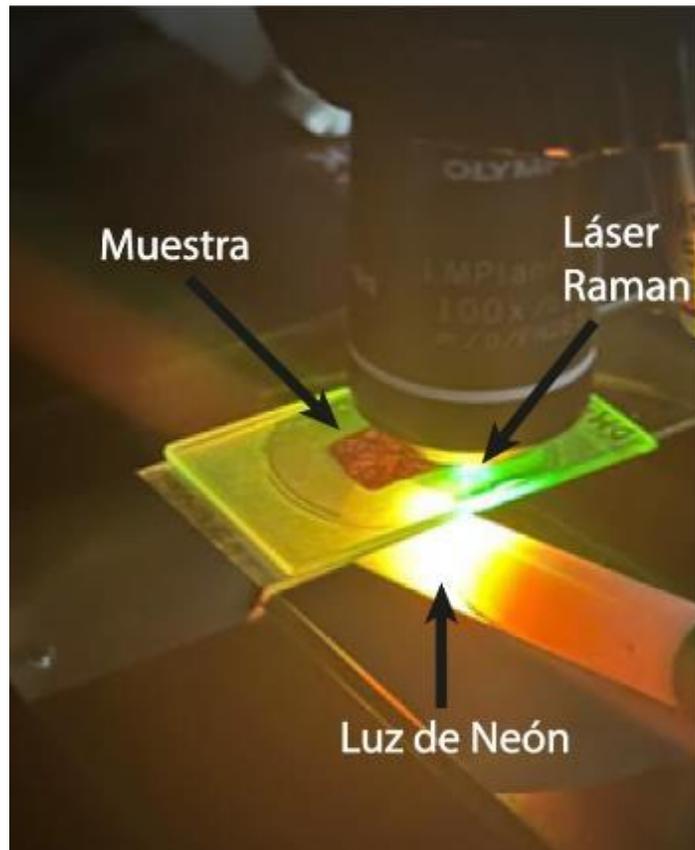


Figura 2. Disposición de las muestras para la toma de espectros Raman con luz de Neón.

### 2.2.3. Análisis de Datos

El análisis de datos se realizó por medio del software *LabSpec 6* (HORIBA Scientific) y *Fityk* (Wojdyr, 2010), mediante los cuales se realizó una corrección de línea base para minimizar el residual, seguida de un ajuste de geometría Lorentziana para los espectros, seleccionando automáticamente las bandas características de Neón y de olivino (Fig. 3). Se utiliza este tipo de geometría debido al tipo de materiales con los que se trabaja, que corresponden a gases (Neón) y a estructuras cristalinas ordenadas (cristales de olivino). Este tipo de estructuras implican que las bandas presentes en el espectro se presentan de forma nítida y están bien separadas, por lo que su identificación y cuantificación en términos de intensidad, centro y ancho son sencillas, y su forma se aproxima a una curva Lorentziana (Tagliaferro et al., 2020).

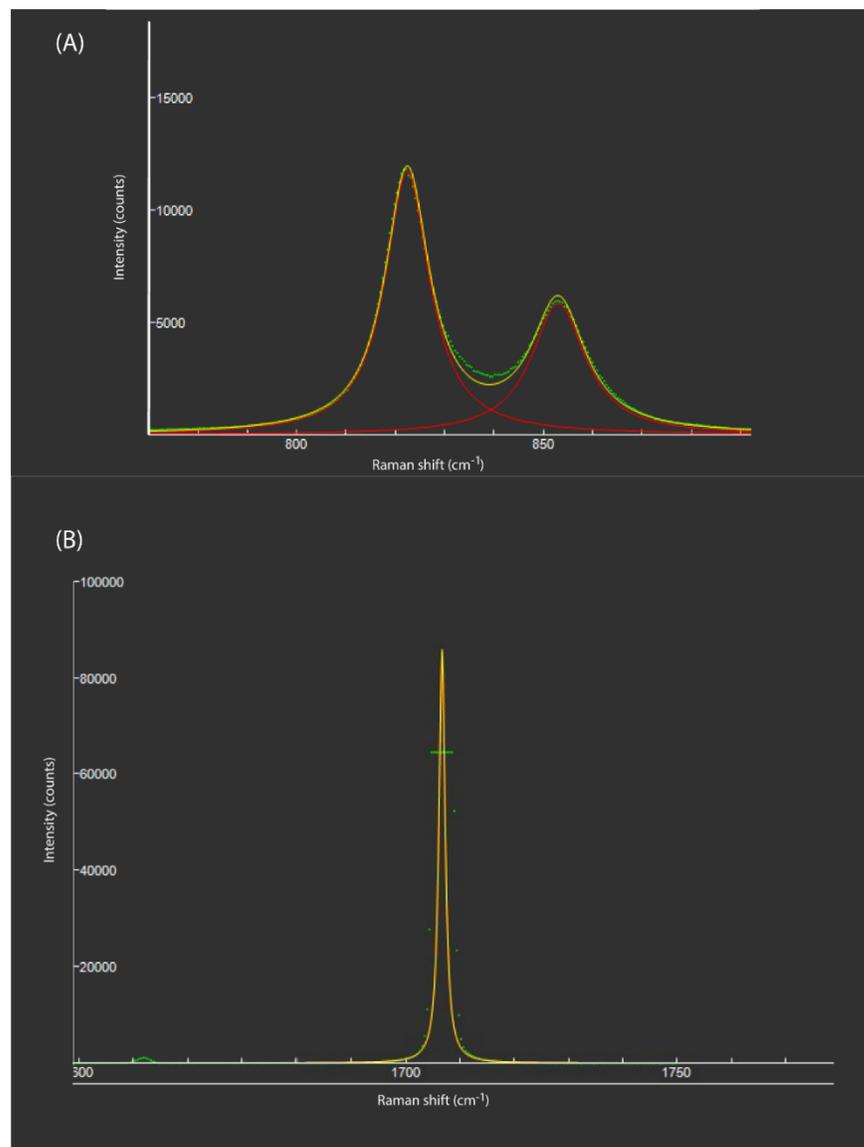


Figura 3. Ajustes de tipo Lorentziano (curva amarilla y roja), para bandas de olivino (A) y neón (B) (puntos verdes).

Acorde a los resultados dados por los espectros de muestras de composición conocida, se relaciona la posición de las bandas de Neón con las bandas de olivino, de acuerdo con las ecuaciones (1), (2) y (3), definidas por Bakker (2021) para la calibración de dos bandas Raman que se encuentran entre dos bandas de Neón posicionadas a ambos lados de las bandas anteriores (Fig 4.A). La distancia entre las bandas Raman es normalizada a la distancia de referencia de las bandas de Neón.

$$\Delta_R^{cal} = \Delta_R^{med} \cdot \frac{\Delta_N^{ref}}{\Delta_N^{med}} \quad (1)$$

$$\Delta_R^{med} = \nu_{R2} - \nu_{R1} \quad (2)$$

$$\Delta_N^{med} = \nu_{N2} - \nu_{N1} \quad (3)$$

En donde  $\Delta_R^{med}$  es la distancia entre las bandas Raman  $\nu_{R1}$  y  $\nu_{R2}$ , que en este caso corresponden a las bandas características de olivino (Fig. 4.B), y  $\Delta_N^{med}$  corresponde a la distancia entre las bandas de neón  $\nu_{N1}$  y  $\nu_{N2}$ .  $\Delta_N^{ref}$  corresponde a la diferencia entre las medidas para las bandas de Neón de referencia, que corresponden a  $277.67 \text{ cm}^{-1}$  (Feuchtgruber et al., 1997) y  $1709.18 \text{ cm}^{-1}$  (Civiš, 2020).

Los resultados de esta calibración fueron relacionados con la cantidad de fayalita presente en las muestras de composición conocida, obteniéndose una ecuación de tipo lineal, que vincula el *Raman shift* o la variación de número de onda de los minerales y la luz de Neón, con su composición.

De acuerdo con esta relación, se analizan los resultados obtenidos para las muestras estudiadas de condritos ordinarios a partir de las ecuaciones para la calibración con luz de Neón mostradas anteriormente, obteniéndose las composiciones de fayalita para cada muestra. A partir de estos valores se clasifican las muestras de acuerdo con los rangos establecidos de composición de cada mineral respectivo para cada grupo químico (H, L o LL).

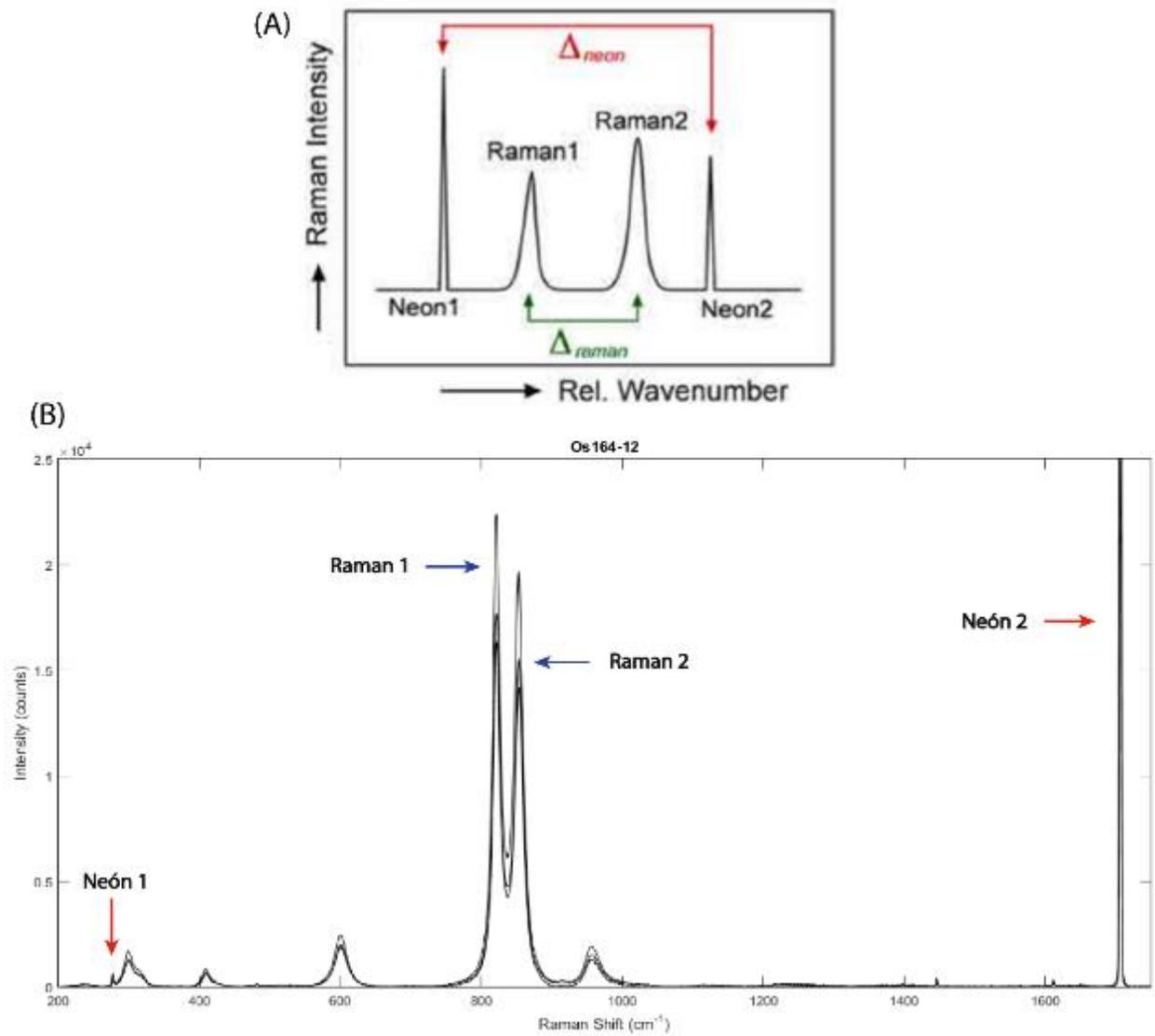


Figura 4. (A) Representación esquemática del método de calibración definido por Bakker (2021). (B) Espectro Raman obtenido para la muestra Os164-12, en donde se muestran las bandas de olivino entre dos bandas de Neón.

### III. Marco teórico

#### 3.1. Generalidades

La clasificación de meteoritos se basa principalmente en la agrupación de cuerpos similares en distintas categorías que definen sus características mineralógicas y petrológicas fundamentales (Hutchinson, 2004; Weisberg, 2006; Krot et al., 2007). Un tipo de clasificación primaria involucra el momento de hallazgo de material, en donde se diferencian dos tipos de meteoritos: “caídos” (falls) y “encontrados” (finds) (Hutchinson, 2004). Los meteoritos *caídos* corresponden a aquellos que fueron recolectados luego de verlos caer, mientras que los meteoritos *encontrados* son aquellos de los que no se tiene información adicional sobre su caída o el tiempo que han estado expuestos a procesos como la meteorización terrestre (Hutchinson, 2004).

En términos petrológicos, los meteoritos se pueden agrupar en dos categorías principales: condriticos y no condriticos (acondritos) (Fig. 5) (Hutchinson, 2004; Krot et al., 2007). Estos se diferencian de acuerdo con su composición y evidencias de procesos o eventos que pudieron haber causado un cambio en esta. Un *condrito* posee una composición química semejante a la de la nebulosa solar primitiva y no ha pasado por procesos de diferenciación, pueden encontrarse minerales silicatados y metales de Fe/Ni muy cerca unos de otros, y la evidencia textural y geoquímica demuestra que se han mantenido bajo sus temperaturas de fusión desde su formación (Russell et al., 2018). Un *acondrito* presenta evidencias de eventos ígneos como fusión, cristalización u otros procesos que implican una diferenciación y un cambio en su composición química (Grier & Rivkin, 2019).

#### 3.2. Clasificación de Condritos

Los condritos están considerados como uno de los tipos de meteoritos más primitivos, puesto que no han experimentado procesos de diferenciación química desde su formación, hace aproximadamente 4.6 billones de años (Yomogida & Matsui, 1983). Es debido a esto que los condritos corresponden a una de las fuentes más importantes de información sobre procesos nebulares que llevaron a la formación de planetesimales y cuerpos asteroidales, eventos que ocurrieron durante las etapas más tempranas de la evolución del sistema solar (Russell et al., 2018).

Basado en características tanto petrográficas como mineralógicas, la clasificación de condritos puede derivarse en distintas categorías. Estas corresponden a órdenes taxonómicos que incluyen agrupaciones como clases, grupos y subgrupos (Weisberg, 2006; Krot et al., 2007). Dentro de las clasificaciones, las categorías de clase y grupo son las más utilizadas. Según Weisberg (2006), condritos de una misma *clase* contienen composiciones químicas primarias de roca total, de isótopos de oxígeno y abundancias de elementos litófilos refractarios similares. Estas últimas pueden estar enriquecidas, empobrecidas o ser equivalentes a abundancias presentes en la fotosfera solar (Weisberg, 2006). Los condritos pueden clasificarse en tres tipos de clases principales: condritos **carbonáceos (C)**, **ordinarios (O)**, y **enstatita (E)**.

Un *grupo* corresponde a la clasificación de meteoritos provenientes de un mismo cuerpo parental, y está definido como un mínimo de cinco condritos de composición petrológica y mineralógica, composición química de roca total e isótopos de oxígeno de características similares. Se infiere que los meteoritos de una misma clase fueron formados por los mismos procesos en igualdad de condiciones (Krot et al., 2007). Es posible diferenciar distintos grupos dentro de cada clase (Figura 5), en donde para condritos tipo C se distinguen 8 grupos distintos: CI, CM, CO, CV, CK, CR, CB y CH; para condritos tipo O se tienen tres grupos: H, L y LL; y para condritos E se distinguen dos grupos: EH y EL. Finalmente se encuentran dos grupos que no pertenecen a una clase distintiva, que corresponden a los grupos R (Rumurutti) y K (Kakangari).

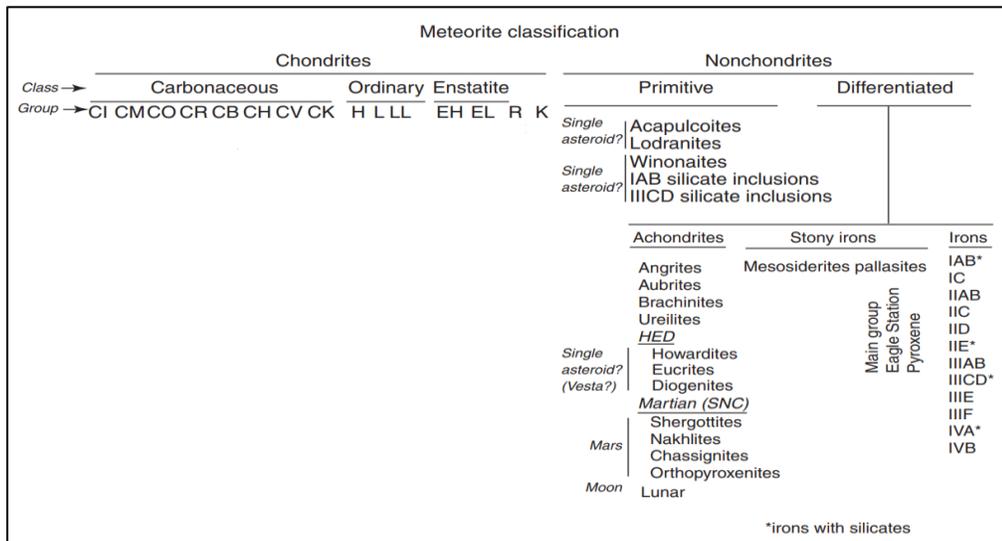


Figura 5. Diagrama de clasificación de meteoritos. Extraído y modificado de Krot et al., (2007).

### 3.2.1. Clasificaciones Secundarias

De acuerdo con sus características petrológicas, es posible subclasificar los grupos químicos anteriormente mencionados. Esta distinción se basa en la observación de evidencias de procesos metamórficos que afectaron a los materiales condriticos primitivos. Así, Van Schmus y Wood (1967) definen estos criterios según el nivel de equilibrio que presentan los condritos. Un condrito es más equilibrado que otro si:

- i. Presenta composiciones de material silicatado homogéneas. Cristales de olivino y piroxeno de composición heterogénea implican un mayor nivel de desequilibrio y tienden a llegar a ser más homogéneos a medida que adquieren mayor grado de equilibrio. Esto puede medirse según el contenido de FeO en granos de olivino, obteniéndose un “porcentaje de desviación media” de la composición de este mineral.
- ii. La estructura de los cristales de piroxeno es mayoritariamente ortorrómbica, lo cual indica una recristalización progresiva del condrito, bajo condiciones de metamorfismo.
- iii. Presenta granos de feldespato visibles en cortes transparentes. Esta fase es el producto principal de reconstrucción metamórfica de vidrio primario o material microcristalino en condritos, y solo se presenta en aquellos con buena recristalización.

- iv. El vidrio ígneo se presenta en algunos cóndrulos que no han sufrido procesos de metamorfismo aparente o en algunos condritos con metamorfismo leve. El vidrio es evidencia del estado templado o de enfriamiento rápido de estos cóndrulos. Este vidrio primario se encuentra ausente en condritos con mayores niveles de recristalización.
- v. Minerales metálicos y sulfuros presentan un mayor nivel de reemplazo por óxidos, además de estar deformados. Cantidades mayores de Fe sobre Ni indican procesos metamórficos.
- vi. Se observan cóndrulos con texturas homogéneas, pérdida de redondez y engrosamiento de cristales, lo cual indica una recristalización termal. En casos más extremos, no se puede diferenciar matriz de cóndrulos.

Estos criterios permiten definir seis tipos petrológicos con características presentes en la tabla 2.

Tabla 2. Criterios de definición de tipos petrológicos para condritos, según Van Schmus y Wood (1967).

Criterio	Tipo Petrológico					
	1	2	3	4	5	6
(i) Homogeneidad composicional de olivino y piroxeno	-	>5% desviación media		<5% desviación media a uniformes	Uniformes	
(ii) Estructura de piroxeno bajo en Ca	-	Mayoritariamente monoclinico		Cristales monoclinicos abundantes	Ortorrómico	
(iii) Grado de evolución de feldespato secundario	-	Ausente		Predominantemente como agregados microcristalinos	Granos intersticiales limpios	
(iv) Vidrio ígneo	-	Limpio e isotrópico, de abundancia variable		Nuboso	Ausente	
(v) Minerales metálicos (máximo contenido de Ni)	-	(<20%) Taenita escasa o ausente		Presencia de kamacita y taenita (>20%)		
(v) Minerales de sulfuro (contenido de Ni promedio)	-	>0-5%		<0-5%		
(vi) Textura de cóndrulos	Sin cóndrulos	Cóndrulos bien definidos, redondeados, con bordes claros		Cóndrulos bien definidos	Cóndrulos reconocibles	Pobrementemente definidos
(vi) Matriz	Grano muy fino, opaca	Muy opaca	Opaca	Microcristalina	Recristalizada	

### 3.2.2. Metamorfismo de Choque

El metamorfismo de choque es producto de colisiones a altas velocidades de cuerpos parentales. Estos impactos afectan propiedades fundamentales de los meteoritos, como la

abundancia y distribución de gases nobles y elementos traza (particularmente volátiles), edades radiométricas y otras características físicas (Stöffler et al., 1991). Es por esto por lo que esta clasificación es una fuente de información importante, ya que se reconocen procesos fundamentales que ocurrieron durante la historia temprana de los cuerpos parentales.

Stöffler et al. (1991) establece que una onda de choque en un sólido o un fluido solo puede producirse debido a una aceleración muy rápida del material. En este caso, esta aceleración es ocasionada por un impacto a alta velocidad a causa de las colisiones de cuerpos parentales. Según estos autores, la compresión resultante, normalmente transmitida por una onda compresiva, se propaga a velocidades supersónicas, provocando que el material fluya detrás de esta onda a una velocidad un poco menor. Es por esto por lo que la compresión de choque siempre va de la mano con el flujo de material a velocidades supersónicas, y ocurre en un espacio de tiempo de nano a microsegundos. Además, este evento genera un aumento de entropía en la roca. Esto último, sumado a una descompresión adiabática posterior, implican un aumento en la temperatura, llamada temperatura post-choque. Esta temperatura aumenta a medida que la presión aumenta, y puede provocar fusión o vaporización a presiones muy altas (Stöffler et al., 1991). La tabla 3 muestra la clasificación de los distintos estados de choque relacionados a estos eventos y los criterios basados en observaciones petrológicas para cada uno.

Tabla 3. Criterios para establecer los distintos estados de choque progresivos en condritos ordinarios (Stöffler et al., 1991)

Estado de choque	Efectos resultantes de equilibrio de peak de presión		Efectos resultantes de excursiones locales de p-T
	Olivino	Plagioclasa	
<b>S1 (Sin Impacto)</b>	Extinción recta, fracturas irregulares		Ninguno
<b>S2 (Impacto muy débil)</b>	Extinción ondulosa, fracturas irregulares		Ninguno
<b>S3 (Impacto débil)</b>	Extinción ondulosa, fracturas planares e irregulares	Extinción ondulosa	Venas de impacto opacas, formación de <i>melt pockets</i> , a veces interconectados
<b>S4 (Impacto Moderado)</b>	Mosaiquismo (débil), fracturas planares	Extinción ondulosa, parcialmente isotrópico, deformaciones planares	<i>Melt pockets</i> , venas de fusión interconectadas, venas de impacto opacas
<b>S5 (Impacto fuerte)</b>	Mosaiquismo (fuerte), fracturas y deformaciones planares	Maskelenita	Formación de <i>melt pockets</i> pervasiva, venas y diques, venas de impacto opacas
<b>S6 (Impacto muy fuerte)</b>	Restringido a regiones locales en o cerca de zonas de fusión		
	Recristalización de estado sólido,	Fusión por impacto (vidrio)	
<b>Fusión por impacto</b>	Fusión total de la roca		

### 3.2.3. Clasificaciones Terciarias

Una vez entrado a la Tierra, los meteoritos se exponen a un cambio significativo de condiciones, provocando alteraciones en minerales silicatados, metálicos y que contienen sulfuro (Bland et al., 2006). Es debido a esto que se destaca la importancia de distinguir entre propiedades pre-terrestres y aquellas provocadas por meteorización en la Tierra (Abreu & Brearley, 2005; Bland et al., 2006). Los factores que controlan este proceso son, esencialmente, la exposición a una mayor fugacidad de oxígeno, diferencias de temperaturas (que dependen principalmente de la ubicación geográfica donde cae el meteorito), y la presencia de agua en forma de humedad (Bland et al., 2006).

De acuerdo con esto, se aplica una escala que describe e indica el grado de meteorización exhibido principalmente en meteoritos “encontrados” (*finds*), aunque también toma en cuenta meteoritos “caídos” (*falls*), con un grado de meteorización 0 (Hutchinson, 2004). Esta clasificación toma en cuenta la cantidad de minerales metálicos y sulfurados afectados por procesos de oxidación, y la alteración de minerales silicatados, que implican la formación de arcillas y filosilicatos. La tabla 4 muestra cada grado de meteorización y su criterio de observación, según Hutchinson (2004).

Tabla 4. Grados de meteorización y sus criterios asociados (Hutchinson, 2004).

<b>Grado de meteorización</b>	<b>Criterios</b>
<b>W0</b>	No hay oxidación visible. Es posible observar tinción limonítica a luz transmitida (común en caídas observadas).
<b>W1</b>	Oxidación menor de bordes alrededor de metales y sulfuros. Presencia menor de venas de óxidos.
<b>W2</b>	Metal afectado por oxidación abarca entre 20-60% de su volumen. Presencia común de venas de óxidos.
<b>W3</b>	Fuerte grado de oxidación, reemplazando el 60-95% de metales y sulfuros.
<b>W4</b>	Oxidación completa de metales y sulfuros (>95%). No hay alteración de silicatos.
<b>W5</b>	Silicatos máficos se encuentran levemente alterados, principalmente en fracturas. Olivinos tienden a alterarse desde el centro.
<b>W6</b>	Reemplazo masivo de silicatos por minerales de arcilla y óxidos.

### 3.3. Condritos Ordinarios

Los condritos comprenden la mayor parte de los meteoritos caídos a la Tierra (~80%), y de estos, más del 90% corresponden a condritos ordinarios (Weisberg., 2006). Al no haber sufrido cambios que resultaran en diferenciación, los condritos ordinarios corresponden a las muestras menos alteradas de aglomerados nebulares. Además, de los distintos grupos de condritos, estos presentan un rango variado y amplio de texturas y composiciones.

Como se mencionó anteriormente, los condritos ordinarios se dividen en tres grupos químicos: H, L y LL, que se diferencian de acuerdo a la cantidad de hierro en la muestra (Van Schmus & Wood, 1967).

- El grupo *H* representa aquellos condritos con el mayor contenido de hierro (que en su mayoría se presenta en forma metálica) y, por lo tanto, con las razones Fe/SiO<sub>2</sub> y Fe<sup>0</sup>/Fe más altas, lo cual se ve reflejado en su bajo nivel de oxidación. En el caso de condritos tipo H con olivinos y piroxenos homogéneos, la baja razón de FeO/(FeO + MgO) explica el bajo grado de oxidación, por lo que los condritos ordinarios H pueden ser reconocidos por su contenido de fayalita en olivinos, con un 16-20% mol.
- Los grupos *L* y *LL* se diferencian del grupo *H* por tener porcentajes menores de Fe total (razones Fe/SiO<sub>2</sub> y Fe<sup>0</sup>/Fe) y, por lo tanto, un grado de oxidación mayor. Específicamente, el grupo *LL* presenta la menor cantidad de Fe total y, además, la menor razón atómica Fe/Si, por lo tanto, corresponden al grupo con mayor nivel de oxidación dentro de los condritos ordinarios. El grupo *L* se caracteriza por cantidades de fayalita en el rango 21-26% mol., mientras que el grupo *LL* se encuentra en el rango 27-31% mol. para esta fase mineral.

La tabla 5 muestra las propiedades de condritos ordinarios, en donde se muestra la cantidad de Fe, la razón Fe/Si, el volumen de metal total, y los rangos de contenido de fayalita y forsterita en olivinos y piroxenos.

Tabla 5. Propiedades de condritos ordinarios equilibrados. Extraído y modificado de Vernazza et al. (2015).

<b>Grupo</b>	<b>H</b>	<b>L</b>	<b>LL</b>
<b>Fe (wt.%)</b>	28	22	19
<b>Fe/Si (atómico)</b>	0.81	0.57	0.52
<b>Metal (%)</b>	8.4	4.1	2
<b>Contenido de Fa en Olivino (% mol.)</b>	16-20	21-26	27-31
<b>Contenido de Fs en Piroxeno (% mol.)</b>	15-17	18-22	22-30

### 3.3.1. Caracterización

Los condritos se definen por ser rocas que presentan una textura característica en general, la cual corresponde –de forma simplificada– a una matriz de grano fino con agregados minerales

de tamaños milimétricos, llamados cóndrulos (Ulloa, 2017; Russell et al., 2018). Sin embargo, también es posible encontrar otro tipo de componentes que tienen un origen ligado a la temperatura de formación de la roca, como inclusiones refractarias ricas en Ca o Al (CAIs), minerales metálicos, o clastos líticos que pueden contener magnetita o filosilicatos (Hutchinson, 2004). En resumen, los condritos están compuestos por cuatro componentes principales: cóndrulos, matriz, metales de Fe-Ni e inclusiones refractarias (Ulloa, 2017).

### **i. Cóndrulos**

Los cóndrulos son objetos milimétricos de material silicatado que han experimentado procesos de fusión antes de ser incorporados a un cuerpo parental condritico, por lo que corresponden a objetos que fueron fusionados antes o durante el periodo de acreción que resultó en la formación de condritos (Hutchinson, 2004). Estos agregados generalmente presentan formas esféricas, pero también pueden presentarse como fragmentos, pueden estar moldeados alrededor de otros cóndrulos o simplemente no haber sido fusionados completamente y, por lo tanto, no presentar formas redondeadas (Zanda, 2004). Estos están compuestos principalmente por los minerales ferromagnesianos olivino [(Mg,Fe)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>] y piroxeno [(Ca,Mg,Fe)<sub>2</sub>SiO<sub>6</sub>], con este último presente típicamente como granos de piroxeno bajo en Ca. El material intersticial entre estos minerales se describe como mesostasis, que puede presentar texturas vítreas y composiciones feldespáticas. En los cóndrulos también se pueden encontrar componentes sulfurados de Fe-Ni, como troilita, pirrotita, pentlandita, magnetita y metales de Fe-Ni (Russell et al., 2018). El rango de tamaños conocido para los cóndrulos, en general, es de <1 μm a 5 cm, con diámetros de 0.1 a 3.8 mm para cóndrulos esféricos (Hutchinson, 2004).

Estos agregados se pueden clasificar de acuerdo a su textura y mineralogía. Con respecto a parámetros texturales, según Russell et al. (2018), se pueden distinguir los siguientes tipos de cóndrulos (Figura 6.a) ordenados de menor a mayor tamaño de cristales):

- Criptocristalinos (CC).
- Radiales, compuestos generalmente por piroxenos radiales (RP).
- Bandeados o dendríticos, compuestos usualmente por olivinos bandeados (BO).
- Porfídicos (P), los cuales se pueden subclasificar según su razón olivino/piroxeno como:
  - PO: Olivino porfídico, con un porcentaje mayor al 90% de este mineral.
  - PP: Piroxeno porfídico, con un porcentaje mayor al 90% para este mineral.
  - POP: Olivino y piroxeno porfídicos.

En términos mineralógicos, los cóndrulos porfídicos también se pueden clasificar de acuerdo a su contenido de óxido de hierro (FeO) en las fases minerales de olivino y piroxeno (fig. 6.b). El contenido de estas fases se calcula como la razón entre el contenido de hierro atómico y los componentes de los miembros extremos para fayalita y ferrosilita (Russell et al, 2018), como se muestra en la ecuación (4).

$$Fa = \frac{Fe}{Fe + Mg} \quad \text{y} \quad Fs = \frac{Fe}{Fe + Mg + Ca} \quad (4)$$

Así, se pueden diferenciar dos tipos de cóndrulos (Figura 9.b):

- Tipo I, con un contenido de Fa y Fs < 10% mol. Este tipo de cóndrulos están altamente reducidos y presentan una abundancia de metales de Fe-Ni.
- Tipo II, con un contenido de Fa y Fs > 10% mol. Los granos de olivino y piroxeno en este tipo de cóndrulos son, generalmente, de mayor tamaño que en los de tipo I, y poseen zonamiento composicional debido a un crecimiento desequilibrado.

Además, si un cóndrulo es particularmente rico en olivino se designa como tipo A, si es rico en piroxeno se denomina de tipo B, y si es rico en ambos minerales se denomina de tipo AB.

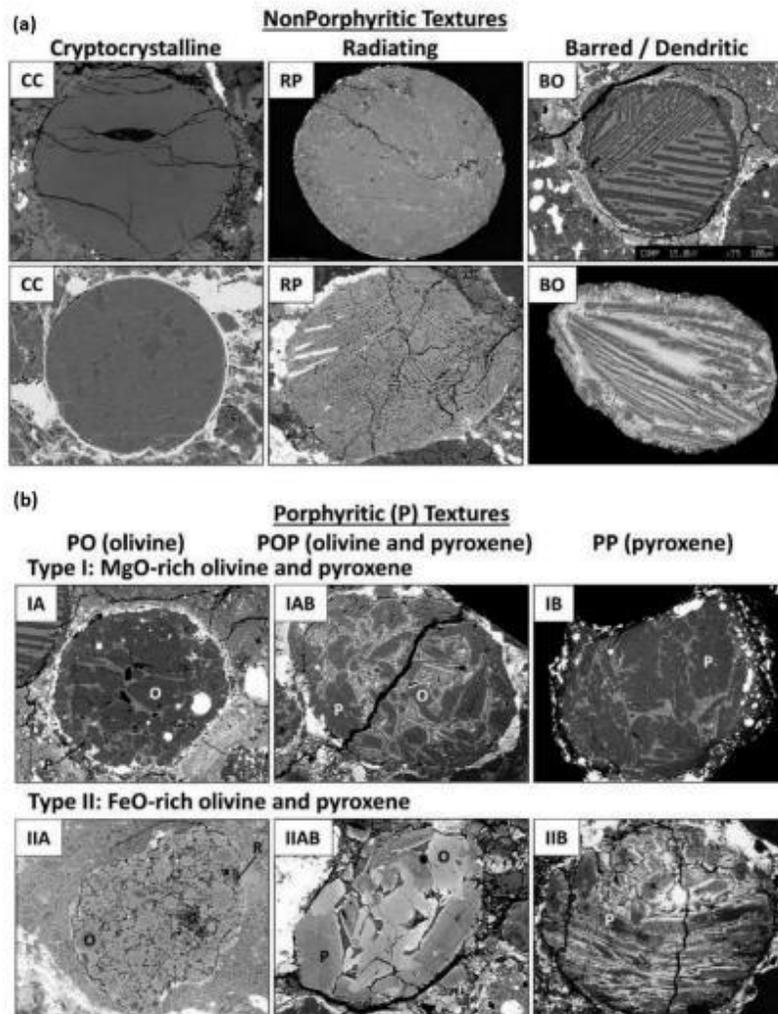


Figura 6. Imágenes SEM de texturas típicas presentes en cóndrulos de condritos con composiciones variadas. (a) Texturas no porfídicas, en donde se muestran cóndrulos criptocristalinos (CC), radiados, que comúnmente son ricos en piroxeno (RP) y dendríticos, comúnmente de olivino (OB). (b) Texturas porfídicas, en donde se encuentran cóndrulos ricos en óxidos de Mg y Fe, respectivamente. Extraído de Russell et al. (2018).

## **ii. Matriz**

La matriz puede ser descrita como material de grano fino ( $< 5\mu\text{m}$ ), ópticamente opaco, que rodea cóndrulos, CAIs y otros componentes presentes, además de los espacios intersticiales entre ellos (Scott & Krot, 2014; Russell et al., 2018). Scott y Krot (2014) destacan que los granos que componen la matriz se diferencian de otros componentes por su textura, forma y tamaños distintivos. Estos autores detallan que la matriz, generalmente, forma parte del 5-50 vol.% de los condritos, y está compuesta principalmente por minerales silicatados (principalmente olivino, piroxeno bajo en Ca y feldespatos), óxidos, sulfuros, Fe-Ni metálico y, especialmente en condritos de tipo petrológico 2, filosilicatos y material carbonatado. A diferencia de los cóndrulos, la matriz tiende a presentar un mayor contenido de óxidos de hierro. Además, la matriz tiende a ser más rica en elementos volátiles, por lo que comúnmente se le llama el componente de “baja temperatura”. Sin embargo, esta denominación es errónea, puesto que la matriz se compone de materiales diversos formados bajo distintas condiciones (Scott & Krot, 2014).

Usualmente se pueden observar dos tipos de matriz: la matriz intersticial, es decir, que se encuentra entre cóndrulos; y la matriz que rodea los bordes de estos (como anillos), sin embargo, en condritos ordinarios no es común observar esta división puesto que no se presentan diferencias texturales o mineralógicas importantes (Hutchinson, 2004; Ulloa, 2017).

La textura y composición de la matriz también puede diferenciarse de acuerdo al tipo petrológico correspondiente. Así, a medida que este aumenta de 3 a 6, se pueden observar procesos de recristalización debido al aumento de temperatura durante la formación del condrito (Van Schmus & Wood, 1967). Además, los cóndrulos comienzan a desintegrarse, perdiendo sus bordes y quedando como relictos de ellos o desapareciendo por completo en algunos casos, por lo que es más difícil establecer una clara diferencia entre cóndrulo y matriz (Ulloa, 2017).

## **iii. Metales de Fe-Ni y sulfuros**

Van Schmus y Wood (1967) indican que, en la mayoría de los condritos, el componente metálico se encuentra como las fases kamacita y taenita, que contienen -aproximadamente- 4-7% y 30-55% de Ni, respectivamente. Estas cantidades de Ni son estables a temperaturas de 400-550°C, por lo que probablemente se establecieron durante el enfriamiento posterior a procesos de metamorfismo. Según estos autores, en la mayoría de los condritos de tipo petrológico 2-3, los granos de metal Fe-Ni contienen concentraciones de 0.1-1% de cromo, sílice y fósforo, los cuales no se encuentran en condritos de tipos petrológicos más altos, indicando procesos de mayor temperatura previos a la acreción. Muy pocos condritos conservan un buen registro de la historia de formación de sus granos metálicos, puesto que las reacciones de baja temperatura subsecuentes formaron óxidos y sulfuros, y el metamorfismo termal implicó la exsolución de kamacita a partir de taenita. Además, la mayoría de los granos de metal Fe-Ni que se encontraban fuera de los cóndrulos, probablemente se perdieron debido a estos procesos (Scott & Krot, 2014).

El tamaño y abundancia de los granos de taenita disminuye a medida que aumenta la cantidad de Fe en condritos ordinarios, es decir, un condrito tipo LL puede presentar granos más grandes y una mayor cantidad de taenita que un condrito tipo H, en el cual la fase mineral metálica representativa es la kamacita. En general, si un condrito es pobre en metales, estos últimos son ricos en Ni y las fases ferromagnesianas silicatadas son ricas en Fe (Ulloa, 2017). En condritos ordinarios, las fases metálicas representan aproximadamente un 8-20 wt.%, dispersadas uniformemente como granos irregulares de tamaños entre 10-200  $\mu\text{m}$  (Wood, 1967).

Wood (1967) observa que la kamacita se encuentra como cristales singulares, presentando bandas de Neumann en la mayoría de los condritos. Este autor destaca que este mineral también presenta una composición no homogénea, con una concentración mayor de Ni en su centro (6-7 wt.% en granos grandes) que en los bordes (5-6 wt.%). La taenita también se encuentra como cristales singulares, ocasionalmente policristalinos. Estos cristales presentan zonación composicional, con un contenido de Ni menor en el centro (25-35 wt.%) que en los bordes (45-55 wt.%) (Wood, 1967).

Además, todos los condritos ordinarios contienen, generalmente, un 6 wt.% de troilita, que corresponde a un sulfuro de hierro (Wood, 1967). Esta se encuentra como pequeñas gotas en cóndrulos o matriz, como cristales anhedrales singulares o en intercrecimientos con kamacita y/o taenita (Ulloa, 2017).

#### **iv. Inclusiones refractarias**

Según Scott y Krot (2014) en los condritos ordinarios es posible encontrar, aunque en bajas cantidades, inclusiones refractarias ricas en Aluminio y Calcio, o CAIs por sus siglas en inglés (*Ca-Al rich Inclusions*). Este tipo de inclusiones corresponden a uno de los objetos más antiguos presentes en condritos. Se cree que estas fueron formadas durante la fase de mayor energía de la evolución de discos protosolares (Scott & Krot, 2014). Su mineralogía es variada y está compuesta por fases que pudieron haber sido condensadas de gases de composiciones solares que sufrieron un proceso de enfriamiento bajo condiciones de temperaturas mayores a 1200-1300 K y presiones totales de  $10^{-5}$  bar. Estas fases minerales son corindón, hibonita, grossita, perovskita, melilita, espinela, dióxido de Al-Ti, anortita y forsterita. Debido a la diversidad de CAIs, no existen clasificaciones que las diferencien en grupos. No obstante, estas pueden clasificarse de acuerdo a su mineralogía predominante, con CAIs ricas en espinela, piroxeno y melilita las más comunes. En condritos ordinarios es posible encontrar CAIs ricas en melilita, hibonita  $\pm$  espinela, y/o espinela  $\pm$  piroxeno (Scott & Krot, 2014).

### **3.4. Espectroscopía Raman**

La espectroscopía Raman es una técnica no destructiva de análisis químico que entrega información detallada sobre la estructura cristalina de un material, basada en la interacción de la luz con los enlaces químicos de estos, es decir, el fenómeno de dispersión de luz inelástica, conocido como *efecto Raman*, el cual fue descubierto por el físico indio Chandrashekhara

Venkata Raman, en 1928 (Das & Agrawal, 2011). Esta técnica se basa en la iluminación de un material con luz monocromática en el rango de espectro visible, seguida por la interacción de fotones incidentes con las vibraciones moleculares o fonones cristalinos, que inducen un pequeño cambio en la longitud de onda de los fotones dispersados (Neuville et al., 2014). Este cambio de longitud de onda depende de la estructura química de las moléculas responsables de la dispersión (Das & Agrawal, 2011). El espectro Raman obtenido de este fenómeno representa una “huella digital” del compuesto estudiado. Así, es posible obtener información que permite el análisis tanto cualitativo como cuantitativo de muestras de distintos compuestos.

La espectroscopía Raman abarca la familia de mediciones espectrales a un nivel molecular, basado principalmente en la dispersión de radiación monocromática (Das & Agrawal, 2011). Durante este proceso, ocurre un intercambio de energía entre fotones de luz incidente y moléculas presentes en las muestras, tal que los fotones dispersados poseen más o menos energía que aquellos incidentes. Esta diferencia ocurre por un cambio de energía tanto rotacional como vibracional de la molécula y proporciona información sobre sus niveles energéticos (Laserna, 2001). Según Rostron et al. (2016), la espectroscopía Raman se especializa en medir el cambio de frecuencia de la dispersión inelástica de la luz de una muestra, cuando los fotones de la luz incidente “golpean” sus moléculas, produciendo dispersión de fotones. En general, esta técnica se basa en la medición del cambio de energía del fotón saliente. Este cambio en longitud de onda de la luz dispersada depende de la composición química de las moléculas responsables de la dispersión. La intensidad de la dispersión Raman es proporcional a la magnitud del cambio en la polarización molecular. El resultado es el cambio de posición de los átomos constituyentes de la molécula desde una posición de equilibrio debido a vibraciones moleculares (Rostron et al., 2016). Las propiedades de estos modos vibracionales están determinadas por la masa, el tipo de enlace y la simetría de los átomos que constituyen la unidad elemental de la muestra, como moléculas en gases y líquidos, y la celda unitaria primitiva en sólidos. Es debido a esto que el ambiente alrededor de un átomo en particular presenta una influencia importante en su dinámica. Es decir, cualquier factor físico que afecte el orden en un rango pequeño de área, como defectos o impurezas, tiene un impacto directo en las propiedades vibracionales del átomo (Jimenez-Sandoval, 2000). Esto puede observarse, por ejemplo, en las diferencias entre espectros de una muestra cristalina y otra de forma amorfa de un material del mismo tipo. Así, es importante tener conocimiento sobre las propiedades simétricas y cristalográficas de la molécula o el cristal que se está estudiando (Jimenez-Sandoval, 2000).

Algunas ventajas de la espectroscopía Raman son la poca preparación que necesitan las muestras, ya que no se necesita recubrirlas con una capa de carbono, pulirlas o separar minerales; la calibración del instrumento se limita a una verificación con una lámina de silicio, por lo que no depende del tipo de muestra analizada y no se requieren materiales de referencia específicos. El tipo petrológico de un condrito puede ser determinado en una misma sesión si el espectrómetro está montado a un microscopio petrográfico; y no se requiere un alto vacío,

reduciendo los problemas que pueden ser causados por la presencia de muestras húmedas (Pittarello et al., 2015).

### 3.4.1. Principios Básicos

Según Das y Agrawal (2011), y Smith y Dent (2019), cuando la luz interactúa con la materia, los fotones presentes en el haz pueden ser absorbidos, dispersados o no interactuar con el material y pasar a través de este. Si la energía de un fotón incidente corresponde con la diferencia de energía entre el estado fundamental y el estado excitado de una molécula, el fotón puede ser absorbido y la molécula cambiará a un estado de energía excitado más alto. Sin embargo, también es posible que el fotón interactúe con la molécula y se disperse, caso en el cual no es necesario que el fotón tenga una energía que iguale a la diferencia entre dos estados energéticos. Los fotones dispersados pueden observarse recolectándolos desde un ángulo con respecto al haz de luz incidente (Smith & Dent, 2019).

Según estos autores, la espectroscopía Raman usa una frecuencia única de radiación para irradiar una muestra. La radiación dispersada de la muestra es aquella que se detecta, con una diferencia de una unidad vibracional de energía con respecto a la luz incidente. Durante el proceso de dispersión, la luz interactúa con la molécula y distorsiona o polariza la nube de electrones alrededor del núcleo, formando un estado de vida corta llamado “estado virtual”, el cual es inestable, por lo que el fotón es reirradiado (Smith & Dent, 2019). Al irradiar una molécula con luz monocromática, y como describen Das y Agrawal (2011), se pueden producir dos tipos de dispersión de luz:

1. Si solo se distorsiona la nube de electrones, cuando esta vuelve a su estado inicial, los fotones se dispersan con la misma frecuencia que la radiación incidente. A este fenómeno se le llama *dispersión elástica*, en la cual no ocurre ningún cambio en la frecuencia, longitud de onda o energía del fotón. La luz incidente interactúa con la molécula, pero el intercambio de energía ( $E$ ) es nulo, por lo que la frecuencia de luz dispersada es igual a la frecuencia de luz incidente, es decir:

$$E = E_0 \quad (5)$$

Para moléculas, este fenómeno se denomina *dispersión de Rayleigh*.

2. En cambio, si se induce movimiento nuclear, la energía será transferida desde el fotón incidente hacia la molécula o desde la molécula hacia el fotón dispersado. En este caso, la *dispersión es inelástica*, en la cual la interacción entre la luz y la molécula genera un intercambio de energía equivalente a una vibración molecular. Si la interacción implica que los fotones ganan energía vibracional de las moléculas, entonces la frecuencia de luz dispersada será mayor que la frecuencia de luz incidente, resultando en dispersión de *Raman Anti-Stokes*:

$$E = E_0 + E_v \quad (6)$$

Por otro lado, si la interacción causa que las moléculas ganen energía de los fotones, entonces la frecuencia de luz dispersada será menor que la frecuencia de luz incidente, resultando en el proceso conocido como dispersión *Raman Stokes*:

$$E = E_o - E_v \quad (7)$$

El diagrama de la figura 7 muestra los procesos de dispersión elástica e inelástica para una vibración. En este, el estado vibracional más bajo, denominado *m*, se muestra al pie del diagrama, con un estado vibracional de una unidad de energía mayor que se encuentra por encima, denominado *n*. La energía de excitación se presenta como flechas apuntando hacia arriba, y la energía dispersada como flechas contrarias.

La intensidad de un espectro Raman es determinada por la sección transversal dispersada de la transición entre los niveles de energía vibracionales *n* y *m* (Rull, 2012). La intensidad de una banda Raman normal depende de la polarizabilidad de una molécula, la intensidad de la fuente de energía y la concentración del grupo activo. La intensidad de la fuente (o de la luz) se refiere a la fuerza o cantidad de luz producida por una fuente de energía específica. Es la medida de la potencia de acuerdo con la longitud de onda emitida por la fuente. Así, la intensidad es directamente proporcional a la energía que, a su vez, es directamente proporcional a la frecuencia. Esta última tiene una relación indirectamente proporcional con la longitud de onda. De esta forma, se puede inferir que una fuente con longitud de onda menor tendrá una intensidad mayor. Además, la intensidad de un espectro Raman es generalmente directamente proporcional a la concentración de la especie activa (Sruthi, 2019).

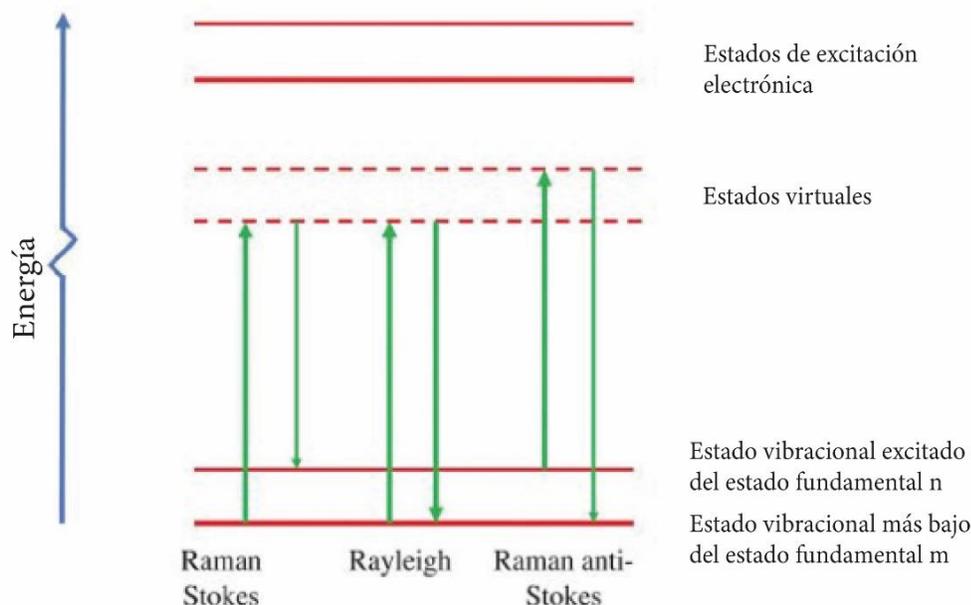


Figura 7. Diagrama de los procesos de dispersión de Rayleigh y Raman. Extraído y modificado de Smith & Dent (2019).

### 3.4.2. Cristalografía y espectros Raman del Olivino

La espectroscopía Raman es una herramienta importante para investigaciones mineralógicas y petrológicas de rocas terrestres y meteoritos. Los atributos asociados a un espectro Raman, como la cantidad de bandas, sus posiciones con respecto al *Raman shift* o cambio de número de onda y su intensidad, son propios de la especie, estructura, fase y composición de un mineral, determinados por los modos vibracionales fundamentales de sus enlaces químicos (Kuebler et al., 2006). Así, esta técnica puede ser aplicada para la identificación y cuantificación de composición de especies minerales (Ishibashi et al., 2008).

El olivino, un mineral importante en la formación de rocas, corresponde a un ortosilicato de estructura ortorrómbica *Pbnm* (forsterita,  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ :  $a = 4.75$ ,  $b = 10.20$ ,  $c = 5.98$  Å; fayalita,  $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ :  $a = 4.82$ ,  $b = 10.48$ ,  $c = 6.09$  Å), con una solución sólida completa entre miembros extremos de Fe y Mg. Según Papike (1987), su estructura consiste en tetraedros aislados de  $\text{SiO}_4$ , en donde cada uno de los oxígenos del tetraedro se comparte con tres cationes octaédricos. Los átomos de oxígeno forman paquetes casi hexagonales, en donde la mitad de los sitios disponibles son ocupados por los cationes  $\text{Mg}^{+2}$  y/o  $\text{Fe}^{+2}$ . Estos octaedros forman cadenas dentadas y capas, perpendiculares al eje  $a$  por una traslación  $b/2$ , a lo largo del eje  $b$  (Papike, 1987). Existen dos tipos distintivos de octaedros en la estructura del olivino: M1, que se ubican en el centro de simetría, y M2 que se ubican en planos especulares ( $m$ ). Los tetraedros de silicato en olivinos se elongan formando pirámides trigonales siguiendo el eje  $a$ , mientras que los bordes compartidos de los octaedros M1 y M2 se acortan en función de sus bordes no compartidos (Papike, 1987; Kuebler et al, 2006). La figura 8 muestra la estructura cristalina de los tetraedros de  $\text{SiO}_4$  unidos por los octaedros M1 y M2, visto por el eje  $a$ , del olivino.

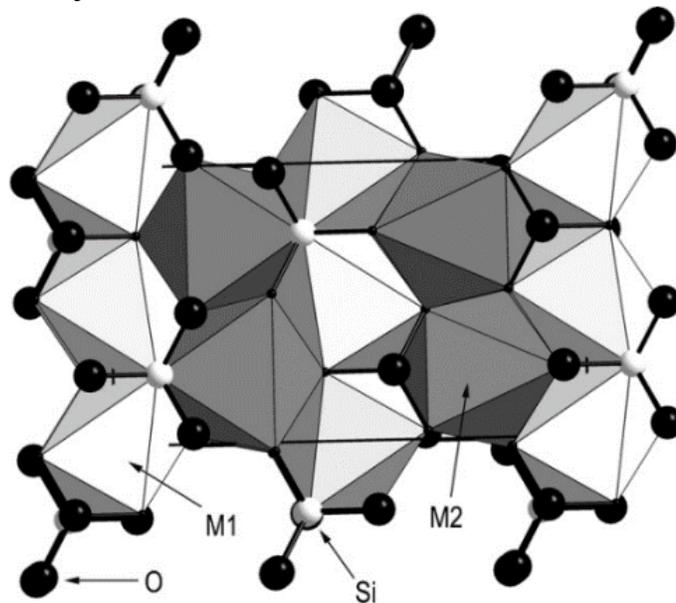


Figura 8. Estructura cristalina del Olivino (*Pbnm*) con tetraedros aislados de  $\text{SiO}_4$  asociados a los cationes octaedrales M1 y M2, visto desde el eje  $a$ . Extraído de Kuebler et al. (2006).

El olivino posee 84 modos normales vibracionales, de los cuales 36 son Raman-activos. El espectro Raman del olivino puede dividirse en tres regiones espectrales (Kuebler et al., 2006; Ishibashi et al., 2008):

1. Bandas menores a  $400\text{ cm}^{-1}$ , principalmente asociados a movimientos rotacionales y traslacionales de tetraedros de  $\text{SiO}_4$  como unidad, y movimientos traslacionales de cationes octaédricos ( $\text{Fe}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$ ) en la red cristalográfica.
2. Bandas entre  $400\text{-}700\text{ cm}^{-1}$ , que resultan de modos vibracionales de flexión interna de los grupos iónicos de los tetraedros de silicato.
3. Bandas entre  $700\text{-}1100\text{ cm}^{-1}$ , que se atribuyen a modos vibracionales de estiramiento interno de los grupos iónicos de tetraedros de  $\text{SiO}_4$ . En este rango, se destaca una característica dominante del espectro del olivino, que corresponde a una pareja de bandas ubicadas cerca de los  $820\text{ cm}^{-1}$  y los  $850\text{ cm}^{-1}$ , donde la altura relativa de estos se encuentra en función de la orientación del mineral. Estos corresponden a las bandas características del olivino y son utilizadas frecuentemente en su identificación.

Es importante destacar que las bandas que se encuentran en los rangos de los primeros dos grupos descritos son, generalmente, mucho más débiles que las que se encuentran en el rango del tercer grupo, y normalmente no se muestran en los espectros (Kuebler et al., 2006). Debido a esto, comúnmente se analizan solo aquellas que se encuentran en el rango de  $700\text{-}1100\text{ cm}^{-1}$ .

### **3.4.2.1 Propiedades de las bandas Raman características del olivino**

Las posiciones de las bandas características del olivino varían de acuerdo a su composición, como se muestra en la figura 9. Esta variación, que implica un cambio hacia números de onda mayores a medida que el contenido de forsterita aumenta, se debe a la disminución de masa atómica y volumen poliédrico en los sitios octaédricos, y al grado de acoplamiento de los modos vibracionales de estiramiento simétricos y asimétricos de los grupos de  $\text{SiO}_4$  (Kuebler et al., 2006).

Otra variable que afecta a las posiciones de las bandas Raman del olivino corresponde al estado de choque inducido por impactos a altas velocidades (Foster et al., 2013; Harriss & Burchell, 2016). Según Foster et al. (2013), para olivinos de composiciones de forsterita 40, 80 y 100, se produce un cambio de posición en las bandas Raman hacia valores más bajos. Además, se observó que este cambio es dependiente de la composición del mineral, con una diferencia mayor obtenida para  $\text{Fo}_{100}$  ( $1\text{ cm}^{-1}$ ) que para  $\text{Fo}_{40}$  ( $0.5\text{ cm}^{-1}$ ). Harriss y Burchell (2016), realizan pruebas similares, pero a velocidades de impacto y presiones de choque variables. Estos autores determinan que el cambio en las bandas características de olivino hacia posiciones más bajas se vuelve permanente sólo a presiones de choque mayores, en un rango entre 65-86 GPa. A presiones más bajas, se observa que cualquier cambio es temporal y éste se pierde luego de la descompresión. Así, se concluye que las variaciones de posición permanentes se deben a un cambio irreversible en la estructura

cristalina del olivino, a causa de acumulación de defectos o de un reordenamiento estructural (Harris & Burchell, 2016).

Por otro lado, también es importante destacar que el estado de choque de las muestras afecta a la forma de la banda Raman (Rull et al., 2010; Zhang et al., 2022), con diferencias principalmente en el ancho de ésta y, de manera secundaria en la intensidad, debido a que los modos internos de minerales silicatados como el olivino muestran un grado de dependencia al estado de choque, puesto que los impactos generan efectos no uniformes en los meteoritos (Rull et al., 2010). Rull et al. (2010) destaca que un desorden cristalino de este tipo observado en olivinos es consistente con condritos ordinarios con estados de choque débiles a moderados. Además, Zhang et al. (2022) determinan que la anchura a media altura de las bandas Raman (FWHM, del inglés *full width at half maximum*) aumenta en minerales de meteoritos que han sufrido choque, específicamente para condritos ordinarios con estados de choque mayores a S4. Según estos autores, el aumento de FWHM se correlaciona con el incremento en el grado de amorfización del material, ya que la fusión en parte de los minerales durante el impacto resulta en una estructura cristalina perturbada y una disminución en la cristalinidad. Así, Zhang et al. (2022) proponen una buena correlación entre FWHM de los espectros Raman y el estado de choque, en donde el FWHM espectral promedio obtenido para olivinos de meteoritos perturbados fue de 14-16  $\text{cm}^{-1}$ , mientras que -en contraste- el FWHM para olivinos terrestres bien cristalizados resultó generalmente igual o bajo los 10  $\text{cm}^{-1}$ . Cabe destacar, también, que para muestras de meteoritos con estados de choque bajos a moderados ( $\leq S3$ ), el FWHM no presenta cambios significativos.

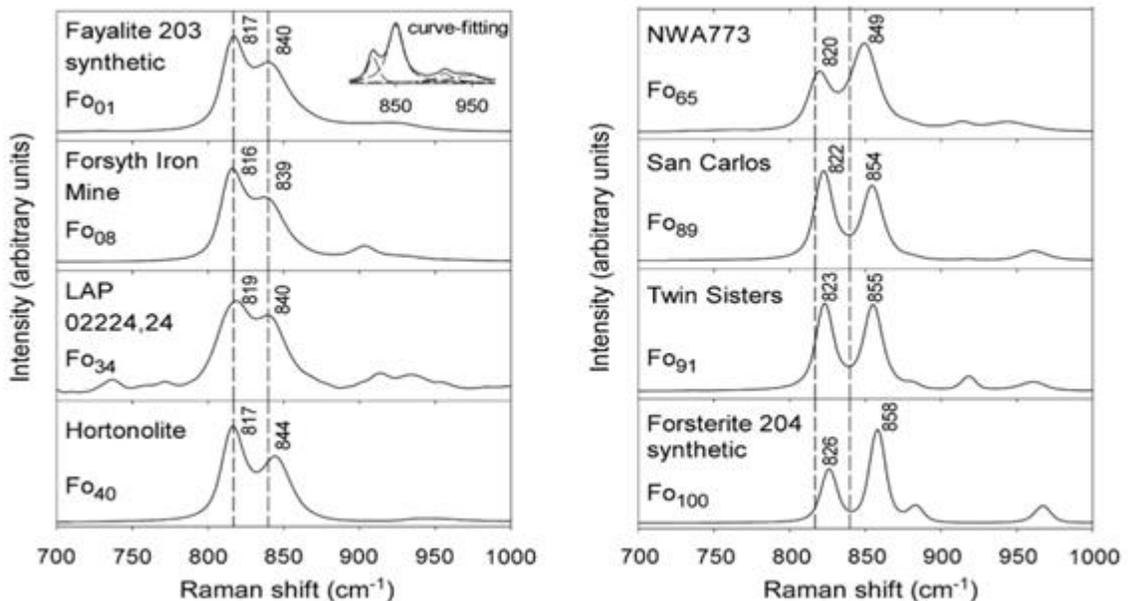


Figura 9. Espectros Raman de olivino en la región 700-1000  $\text{cm}^{-1}$ . Extraído y modificado de Kuebler et al., 2006.

Ishibashi et al. (2008) establece que las intensidades relativas de la pareja de bandas Raman características de este mineral cambian en respuesta a la orientación del cristal, en donde se han observado espectros de olivino con patrones de intensidad variados para granos de composición idéntica, a temperatura y presión ambiente. Este estudio muestra la dependencia de razones de intensidad para bandas a  $822\text{ cm}^{-1}$  ( $I_1$ ) y  $854\text{ cm}^{-1}$  ( $I_2$ ), que implica que la media geométrica de estas razones obtenidas con un desplazamiento de  $90^\circ$  puede cancelar la polarización restante (Figura 10). La figura 14 muestra la diferencia de intensidades para espectros de olivino en tres ejes distintos del cristal: cerca del eje [100] (Fig. 11.a), el eje [010] (Fig. 11.b) y el eje [001] (Fig. 11.c). Este estudio concluye que la razón  $I_1/I_2$  máxima se puede encontrar en el eje [100], y luego decrece de manera monótona hacia los ejes restantes, donde el valor mínimo de esta relación se encuentra en el eje [010] (Ishibashi et al., 2008).

Estas variaciones ocurren debido a que el olivino corresponde a un material de tipo anisótropo, es decir, que sus propiedades dependen de la orientación de la muestra al momento de medirlas (Kocks, 2000). De esta forma, es importante realizar las calibraciones correspondientes durante el análisis de los espectros Raman de este mineral teniendo en cuenta esta característica.

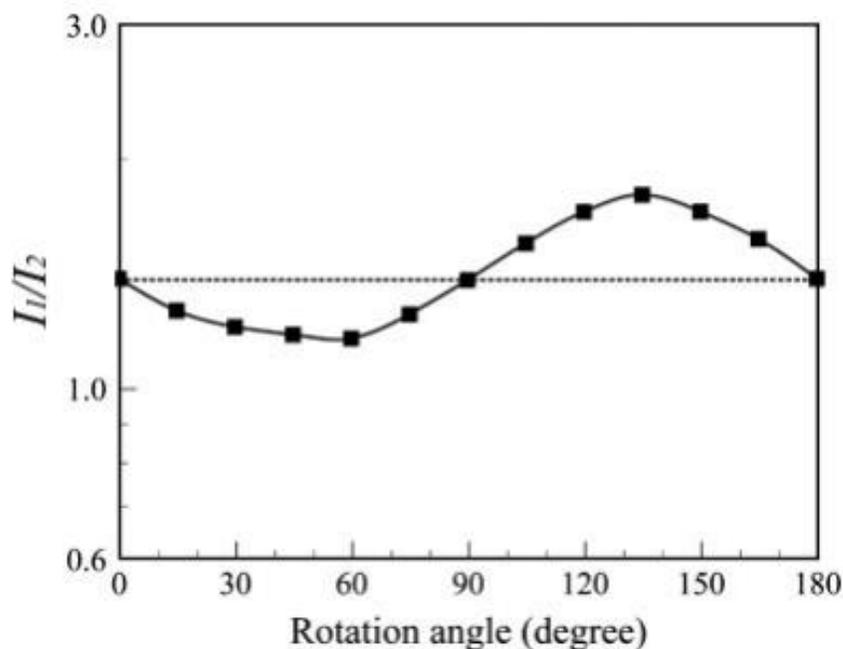


Figura 10. Dependencia del ángulo de las razones de intensidad para dos peaks Raman a  $822\text{ cm}^{-1}$  y  $855\text{ cm}^{-1}$ , a lo largo del láser incidente. Extraído de Ishibashi et al., 2008.

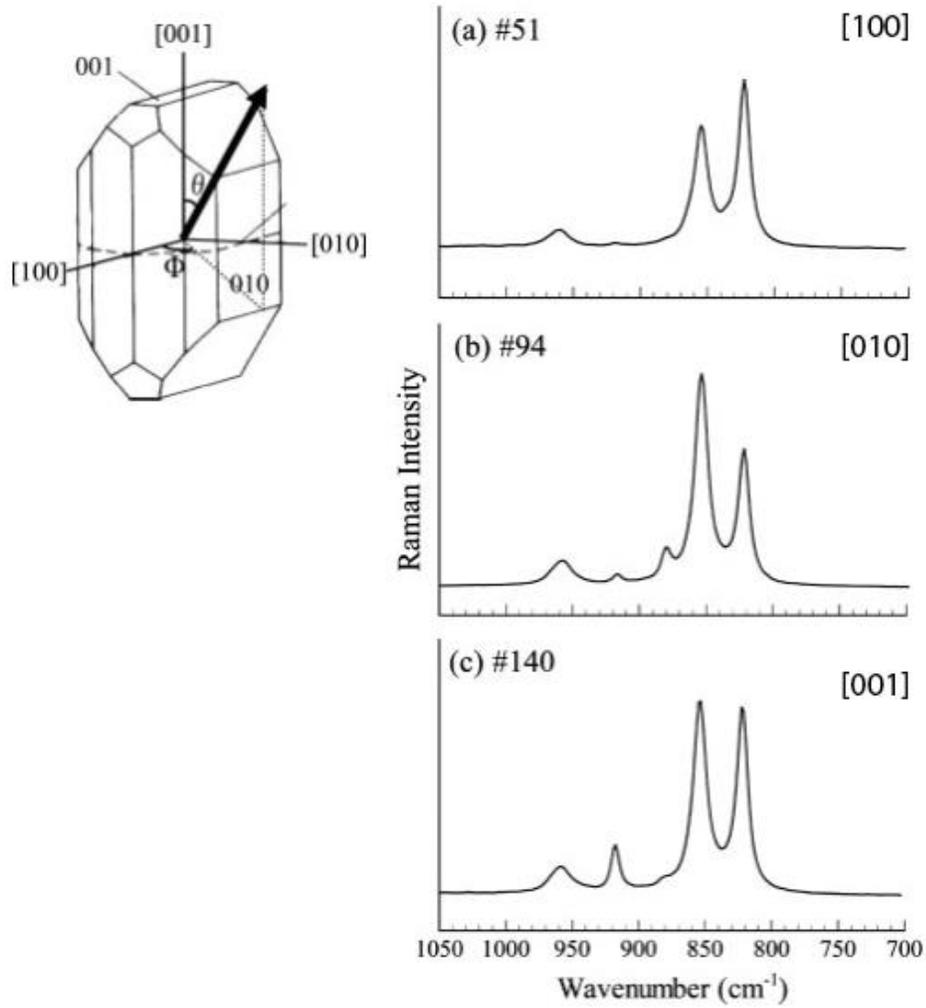


Figura 11. Diagrama de orientación cristalográfica del olivino (la flecha indica la dirección del láser incidente), y espectros Raman representativos cerca de los ejes [100] (a), [010] (b) y [001] (c). Extraído y modificado de Ishibashi et al., 2008.

## IV. Resultados

### 4.1. Calibración del espectrómetro

La figura 12 muestra la curva obtenida para la calibración realizada con respecto a la orientación del cristal de olivino Os164-12, en donde se tomaron espectros Raman en distintas orientaciones ( $0^{\circ}$ - $90^{\circ}$ , con intervalos de  $15^{\circ}$ ). Esta gráfica presenta forma sinusoidal y representa la dependencia de la razón de intensidades para las bandas A y B del olivino ( $I_A$  e  $I_B$ , respectivamente) con respecto a la orientación de la muestra. Esta curva implica que la variación de intensidad depende de la orientación del cristal y que la razón de intensidades obtenidas con un ángulo de desplazamiento de  $45^{\circ}$  puede cancelar la polarización restante. Los detalles de estos resultados se encuentran en el Anexo B.1.

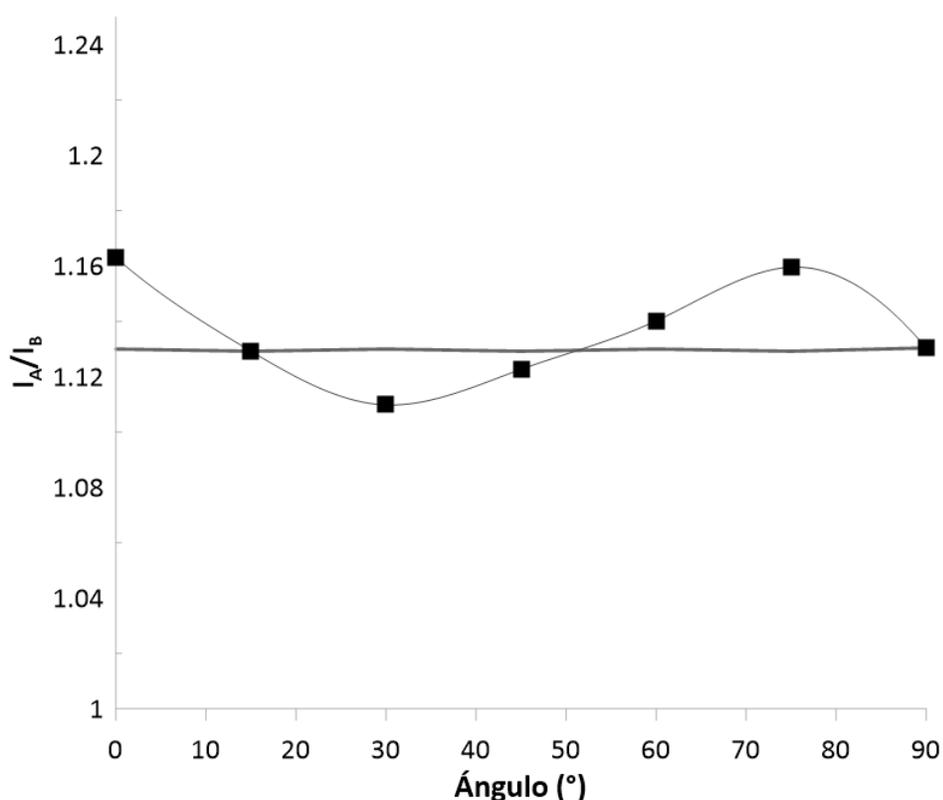


Figura 12. Gráfica que representa la dependencia de la razón de intensidades  $I_A/I_B$  de las bandas representativas del olivino con respecto a la orientación de la muestra, medida en intervalos de  $15^{\circ}$ .

De acuerdo con el análisis anterior -que confirma la dependencia entre orientación del cristal e intensidad de las bandas Raman-, se tomaron espectros Raman de la muestra terrestre Os164-12 en tres puntos distintos, tres veces, en un rango de tiempos entre 5 a 60 segundos (Fig. 13), para encontrar el tiempo de adquisición en el cual la variación de orientaciones es mínima. Luego, al relacionar la razón de intensidades con los tiempos y observar una tendencia, se concluye que el tiempo de adquisición es de 50 segundos (Fig.

14). Este último corresponde al tiempo “estándar” con el que se tomaron todos los espectros posteriores, tanto para muestras de composición conocida como estudiadas.

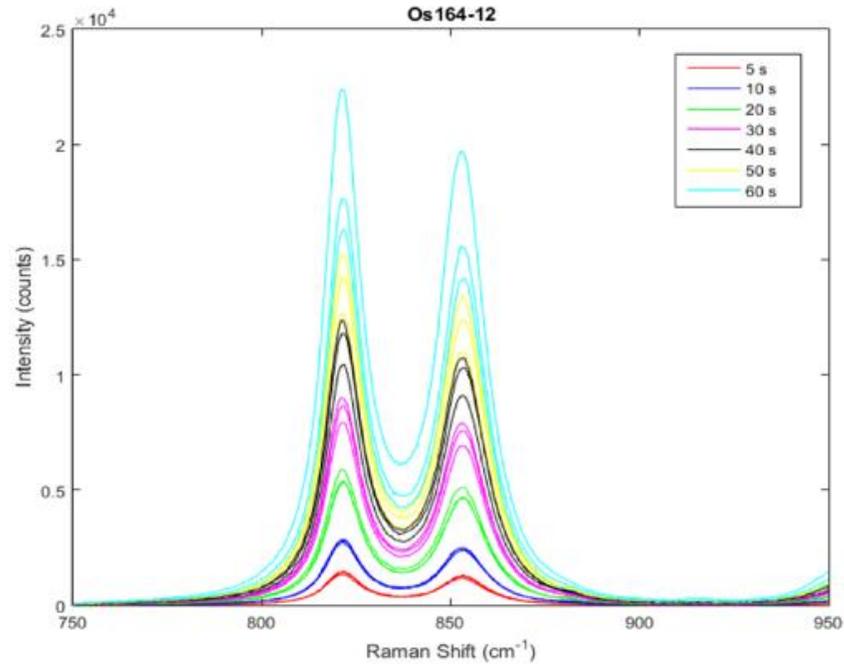


Figura 13. Espectros Raman de la muestra Os164-12, tomados en intervalos de tiempo de 5 a 60 segundos.

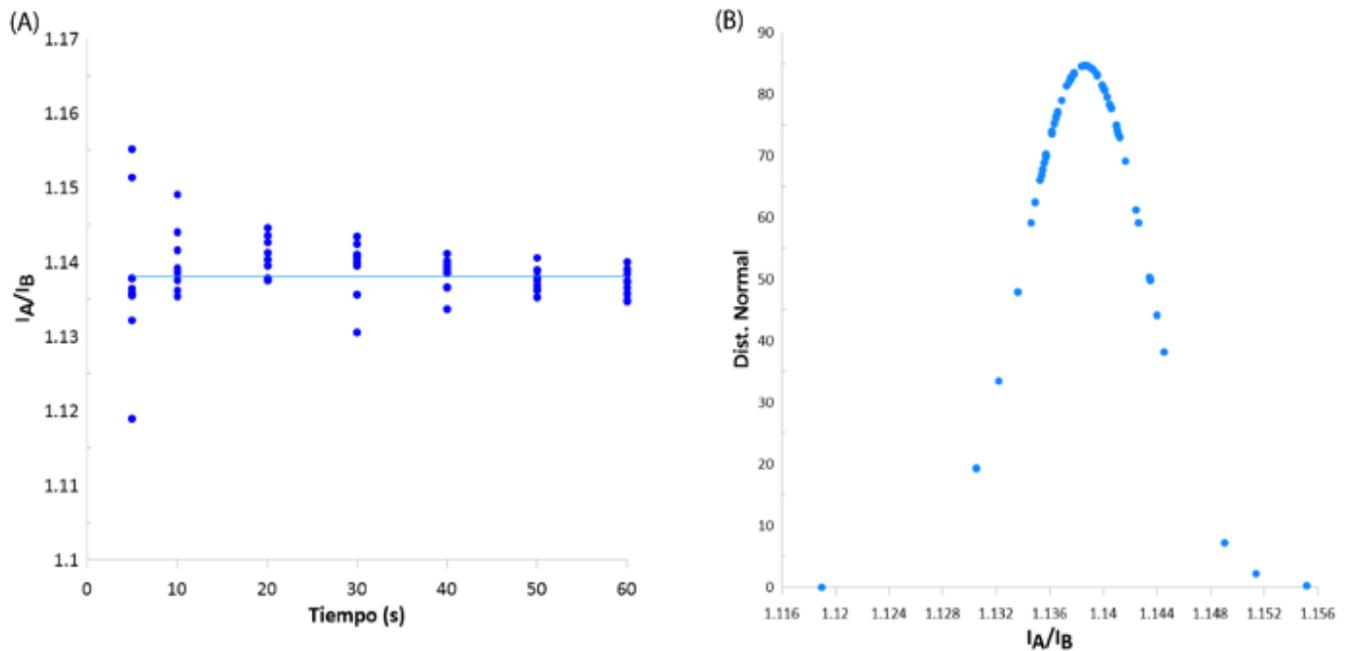


Figura 14. (A) Razón de intensidades  $I_A/I_B$  (para bandas A y B características de olivino, respectivamente) en función del tiempo. (B) Distribución normal calculada para los datos anteriores, en donde se observa un máximo o valor de tendencia en, aproximadamente,  $I_A/I_B = 1.14$ .

## 4.2. Espectroscopía Raman

Para la toma de espectros Raman de todas las muestras y, a su vez, para realizar la calibración mediante esta metodología, se deben escoger olivinos con características óptimas, las cuales corresponden a un grado de alteración bajo o nulo, la ausencia de inclusiones, fracturas y otros minerales que interfieran con los espectros.

### 4.2.1. Muestras de composición conocida

A partir del tiempo de adquisición obtenido, se tomaron espectros de muestras de composición conocida. Las fotografías tomadas al microscopio de estas muestras se encuentran en el anexo A.2. Se tomaron espectros en tres puntos distintos para cada grano de olivino (Figura 15), en un rango de 200-1750  $\text{cm}^{-1}$ , tres veces. Los detalles de estos resultados se encuentran en las tablas 6 y 7, y los espectros para cada una de las muestras se encuentran en el Anexo A.2.

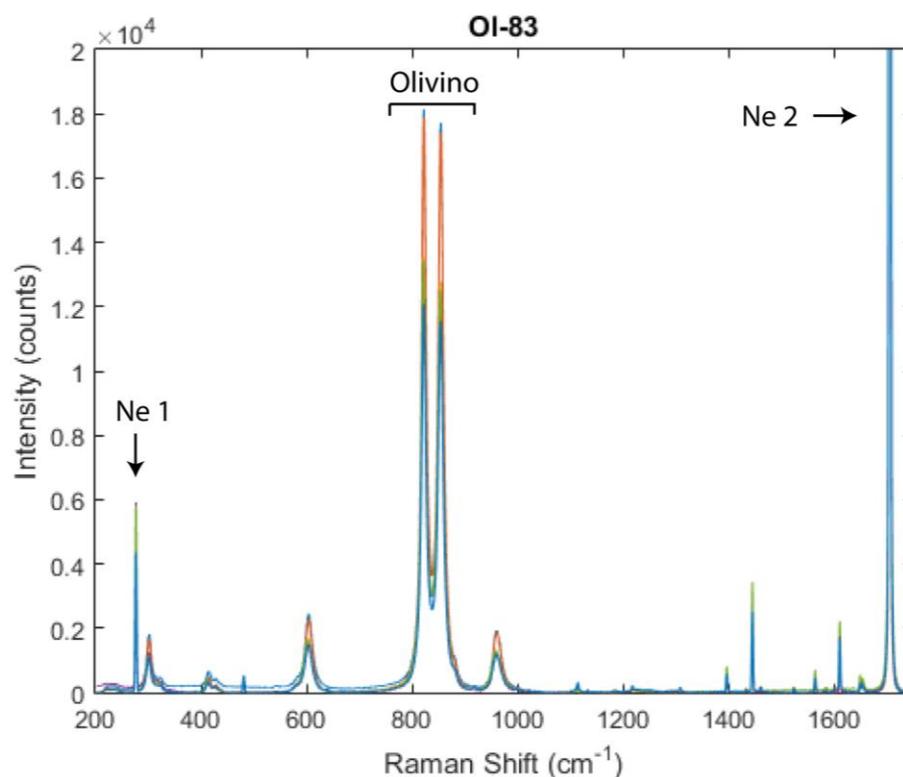


Figura 15. Espectro Raman representativo obtenido para una muestra de cristal de olivino de composición conocida (Olivino 83, composición  $\text{Fa}17\pm0.1$ ), obtenida por EMPA.

Tabla 6. Composición en porcentaje molar de fayalita para muestras de granos de olivino, y su cambio de longitud de onda o Raman shift para bandas A y B de olivino, y para las bandas 1 y 2 de neón.

Muestra	Composición Fa (% mol.)	Punto	Bandas Olivino (cm <sup>-1</sup> )		Bandas Neón (cm <sup>-1</sup> )	
			A	B	1	2
OI-1	17.7±0.1	P1	822.33	853.53	277.87	1706.89
			822.25	853.84	277.94	1707.11
			822.27	853.66	277.91	1707.50
		P2	822.52	853.53	277.10	1707.07
			822.38	853.45	277.60	1707.07
			822.50	853.42	277.11	1707.92
		P3	822.73	853.06	277.86	1707.91
			822.71	853.22	277.11	1707.61
			822.75	853.53	277.77	1707.50
OI-3	22.7±0.5	P1	822.32	853.14	277.60	1707.07
			822.31	853.12	277.63	1707.49
			822.37	853.15	277.59	1707.07
		P2	822.27	853.09	277.60	1707.07
			822.36	853.18	277.60	1707.07
			822.29	853.10	277.59	1707.07
		P3	822.37	853.22	277.13	1707.07
			822.39	853.22	277.66	1707.49
			822.43	853.17	277.10	1707.49
OI-5	18.8±0.2	P1	822.40	853.04	277.09	1707.03
			822.46	853.07	277.17	1706.62
			822.39	853.00	277.17	1707.03
		P2	822.33	853.39	277.11	1706.82
			822.32	853.45	277.59	1706.82
			822.37	853.48	276.98	1706.82
		P3	822.50	853.13	277.08	1706.95
			822.57	853.24	277.17	1707.00
			822.53	853.21	277.42	1706.82
OI-9	8.1±0.2	P1	824.27	856.29	276.62	1707.12
			824.29	856.43	276.63	1706.59
			824.33	856.38	276.62	1707.19
		P2	824.33	856.37	276.62	1707.46
			824.31	856.33	277.07	1707.49
			824.33	856.50	276.68	1707.49
		P3	824.40	856.40	276.13	1706.57
			824.31	856.35	276.60	1707.84
			824.33	856.36	276.60	1707.87

<b>Ol-11</b>	9.7±0.2	P1	823.81	855.84	277.10	1707.41
			823.82	855.82	277.12	1707.46
			823.86	855.85	277.12	1707.46
		P2	823.17	855.09	276.90	1707.03
			823.19	855.07	276.96	1706.64
			823.20	855.07	276.96	1706.64
		P3	823.97	855.99	276.63	1707.43
			823.93	855.98	276.65	1707.00
			823.96	855.98	277.04	1706.61
<b>Ol-83</b>	17±0.1	P1	823.09	855.06	276.87	1706.67
			823.07	855.06	276.88	1707.89
			823.03	855.01	277.00	1707.90
		P2	822.38	854.22	276.79	1708.08
			822.40	854.26	276.74	1708.05
			822.32	854.19	276.88	1708.06
		P3	822.75	854.71	277.02	1708.25
			822.76	854.73	276.98	1708.01
			822.77	854.75	276.98	1708.28

Tabla 7. Composición en porcentaje molar de fayalita para muestras de granos de olivino, y su cambio de longitud de onda o Raman shift para bandas A y B de olivino, y para las bandas 1 y 2 de neón.

Muestra	Composición Fa (% mol.)	Punto	Bandas Olivino (cm <sup>-1</sup> )		Bandas Neón (cm <sup>-1</sup> )	
			A	B	1	2
<b>Ol-84</b>	16±0.2	P1	822.62	854.16	276.90	1707.00
			822.27	854.39	277.18	1707.29
			822.41	854.36	277.00	1708.25
		P2	822.41	853.94	277.05	1706.73
			822.26	853.77	277.07	1707.91
			822.28	853.79	277.06	1707.88
		P3	822.29	853.74	276.76	1707.48
			822.26	853.81	276.57	1707.87
			822.33	853.84	276.65	1707.54
<b>OS164-1</b>	21.75±0.3	P1	822.32	853.52	277.47	1708.09
			822.39	853.57	277.22	1706.65
			822.43	853.65	277.22	1707.70
		P2	822.50	853.68	277.69	1707.67
			822.51	853.70	277.69	1707.67
			822.57	853.77	277.69	1707.67
		P3	822.16	853.60	277.86	1708.51
			822.18	853.51	277.99	1708.09
			822.28	853.50	278.13	1708.09

<b>OS164-6</b>	21.53±0.2	P1	822.51	853.75	277.70	1708.09
			822.50	853.72	277.68	1708.48
			821.51	854.12	277.47	1707.67
		P2	821.98	853.65	277.47	1708.09
			822.55	853.89	277.65	1707.67
			822.61	853.94	277.67	1708.09
		P3	822.55	853.61	277.73	1706.83
			822.57	853.58	277.74	1707.25
			822.55	853.57	277.70	1707.25
<b>OS164-12</b>	21.78±0.2	P1	821.88	853.47	277.18	1707.03
			821.94	853.56	277.20	1707.03
			821.84	853.44	277.18	1707.03
		P2	821.71	853.27	277.69	1707.48
			821.70	853.28	277.69	1707.48
			821.65	853.19	277.65	1707.48
		P3	821.73	853.27	277.95	1707.87
			821.80	853.34	278.30	1707.85
			821.76	853.30	278.59	1707.86
<b>OS164-13</b>	21.41±0.3	P1	822.64	853.65	277.71	1705.99
			822.65	853.65	278.20	1705.99
			822.63	853.63	278.19	1705.99
		P2	822.23	853.25	276.43	1706.41
			822.30	853.27	276.93	1706.41
			822.34	853.28	277.20	1706.41
		P3	822.46	853.46	277.21	1706.82
			822.44	853.43	277.69	1706.82
			822.45	853.44	277.69	1706.82

#### 4.2.3. Muestras estudiadas

Se tomaron espectros de las seis muestras de condritos ordinarios: MV023, MV025, DM053-A1, DM055-A2, JG124 y JG151. Los espectros Raman se obtuvieron de dos cóndrulos por muestra, en tres puntos aleatorios dentro de estos, bajo las mismas condiciones que las muestras anteriores (Fig. 16). Los detalles de estos resultados se encuentran en las tablas 8, 9 y 10, y los espectros se encuentran en el Anexo A.1., para cada muestra respectiva.

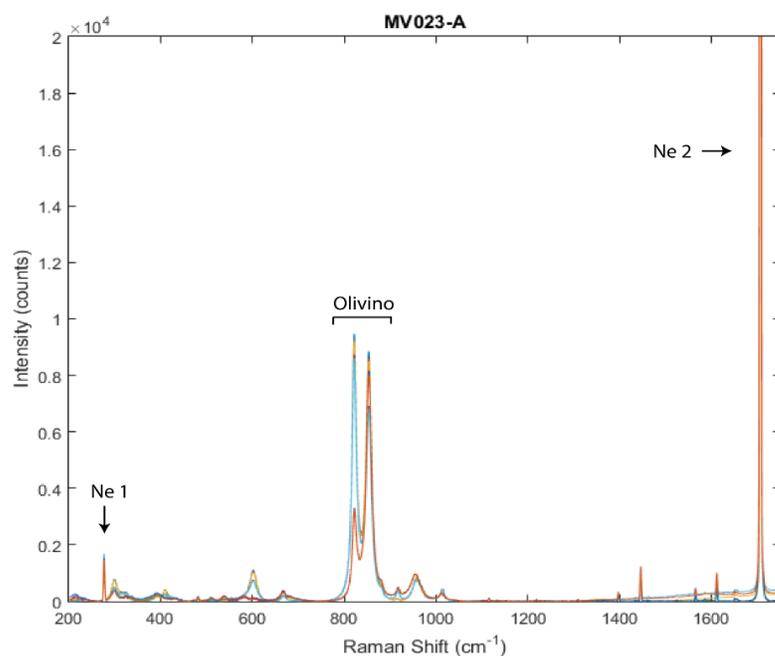


Figura 16. Espectro Raman representativo obtenido para una muestra de cóndrulo (MV023-A).

Tabla 8. Peaks A y B obtenidos para los cóndrulos escogidos de las muestras MV023 y MV025.

Muestra	Bandas Olivino (cm <sup>-1</sup> )		Bandas Neón (cm <sup>-1</sup> )	
	A	B	1	2
MV023 A	822.23	853.81	277.52	1707.16
	822.21	853.77	277.40	1707.45
	822.16	853.73	277.46	1707.39
MV023 A	822.04	853.58	277.07	1707.40
	822.05	853.57	277.07	1707.05
	822.04	853.55	277.07	1706.96
MV023 A	822.62	854.10	277.09	1706.76
	822.63	854.17	277.09	1706.67
	822.61	854.11	277.08	1707.00
MV023 B	822.13	853.68	277.03	1706.66
	822.21	853.66	277.05	1706.66
	821.99	853.44	277.04	1706.64
MV023 B	822.06	853.60	277.02	1706.67
	822.18	853.70	277.05	1706.64
	822.17	853.63	277.05	1706.68
MV023 B	822.18	853.69	277.10	1706.68
	822.26	853.84	277.09	1706.67
	822.22	853.81	277.09	1707.00
MV025 D	822.03	853.34	277.24	1707.08
	822.04	853.35	277.34	1707.09
	822.12	853.34	277.29	1707.07

<b>MV025 D</b>	822.52	853.88	276.81	1707.46
	822.49	853.92	277.58	1707.47
	822.58	853.96	277.76	1707.45
<b>MV025 D</b>	822.36	853.50	277.71	1707.45
	822.35	853.48	277.49	1707.45
	822.33	853.40	277.27	1707.43
<b>MV025 E</b>	822.32	853.46	278.31	1707.47
	822.33	853.46	277.55	1707.47
	822.35	853.46	278.73	1707.48
<b>MV025 E</b>	822.08	853.32	277.61	1707.07
	822.09	853.34	277.32	1707.07
	822.10	853.24	277.39	1707.08
<b>MV025 E</b>	822.87	854.23	278.60	1707.42
	822.84	854.21	277.47	1707.41
	822.85	854.19	277.72	1707.47

Tabla 9. Peaks A y B obtenidos para los cóndrulos escogidos de las muestras DM053-A1 y DM055-A2.

<b>Muestra</b>	<b>Bandas Olivino (cm<sup>-1</sup>)</b>		<b>Bandas Neón (cm<sup>-1</sup>)</b>	
	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
<b>DM053A1 C</b>	822.68	854.08	277.32	1707.44
	822.63	854.08	277.56	1707.50
	822.67	854.08	277.19	1707.86
<b>DM053A1 C</b>	822.71	854.07	277.16	1707.04
	822.73	854.01	277.14	1707.84
	822.72	854.01	277.00	1707.88
<b>DM053A1 C</b>	822.54	853.91	276.88	1707.47
	822.51	853.93	277.00	1707.90
	822.59	853.96	277.10	1707.05
<b>DM053A1 D</b>	821.92	853.01	277.37	1707.05
	821.86	853.16	277.62	1707.90
	821.86	853.03	277.59	1707.43
<b>DM053A1 D</b>	821.96	853.66	277.37	1707.45
	822.06	853.53	276.95	1707.87
	822.14	853.65	276.94	1707.71
<b>DM053A1 D</b>	822.25	853.49	277.37	1707.53
	821.93	853.42	277.37	1707.42
	822.21	853.45	277.64	1707.93
<b>DM055A2 A</b>	822.41	853.96	277.15	1707.45
	822.50	853.99	277.11	1707.07
	822.42	853.99	277.15	1707.07

<b>DM055A2 A</b>	822.95	854.18	277.22	1707.80
	822.78	854.37	277.21	1707.75
	822.91	854.54	277.49	1707.76
<b>DM055A2 A</b>	822.91	854.30	277.70	1707.73
	822.86	854.20	277.67	1707.70
	822.75	854.17	277.54	1707.68
<b>DM055A2 B</b>	822.61	854.21	277.03	1707.25
	822.48	854.08	277.09	1707.29
	822.55	854.15	277.10	1707.35
<b>DM055A2 B</b>	822.78	854.48	277.08	1707.26
	822.96	854.55	277.10	1707.34
	823.12	854.53	277.04	1707.27
<b>DM055A2 B</b>	822.47	853.84	277.50	1707.25
	822.48	853.99	277.46	1707.24
	822.47	854.00	277.35	1707.21

Tabla 10. Peaks A y B obtenidos para los cóndrulos escogidos de las muestras JG124 y JG151.

<b>Muestra</b>	<b>Bandas Olivino (cm<sup>-1</sup>)</b>		<b>Bandas Neón (cm<sup>-1</sup>)</b>	
	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
<b>JG124 C</b>	822.14	853.84	277.58	1707.46
	821.88	853.54	277.67	1707.46
	822.34	853.79	277.78	1707.46
<b>JG124 C</b>	822.39	854.03	277.42	1707.47
	822.40	854.08	277.88	1707.47
	822.42	854.07	277.56	1707.45
<b>JG124 C</b>	822.28	853.74	277.93	1707.88
	822.14	853.67	277.90	1707.88
	822.14	853.79	277.95	1707.88
<b>JG124 J</b>	822.14	853.34	277.26	1707.26
	822.14	853.81	277.20	1707.26
	822.14	853.34	277.30	1707.26
<b>JG124 J</b>	822.14	853.34	277.38	1707.26
	822.14	853.81	277.26	1707.26
	821.67	853.34	277.38	1707.26
<b>JG124 J</b>	821.98	853.65	277.80	1707.88
	821.98	853.65	277.43	1707.88
	821.98	853.65	277.60	1707.88
<b>JG151 A</b>	821.99	852.71	277.47	1707.27
	821.90	852.48	277.47	1707.27
	821.81	852.66	277.47	1707.27
<b>JG151 A</b>	821.86	852.59	277.47	1707.67
	822.06	852.59	277.47	1707.67
	821.86	852.59	277.47	1707.67

<b>JG151 A</b>	821.86	852.58	277.47	1708.33
	821.67	852.78	277.47	1707.26
	821.67	852.78	277.47	1708.51
<b>JG151 C</b>	821.80	852.50	277.60	1708.38
	821.80	852.52	277.58	1708.78
	821.80	852.80	277.61	1707.37
<b>JG151 C</b>	821.74	852.78	277.63	1708.30
	821.72	852.50	277.63	1708.30
	821.73	852.49	277.63	1708.29
<b>JG151 C</b>	821.66	852.71	277.46	1706.84
	821.66	852.71	277.53	1707.04
	821.70	852.68	277.51	1708.30

De acuerdo con los espectros obtenidos para las muestras de condritos ordinarios, se obtuvieron resultados para la anchura a media altura (FWHM) de las bandas A y B características del olivino, para cada cóndrulo. Estos resultados se encuentran en la tabla 11, en donde se observan valores similares para las muestras MV023, MV025, DM053-A1 y DM055-A2, entre 6.15-6.68  $\text{cm}^{-1}$  y 9.62-10.93  $\text{cm}^{-1}$  para las bandas A y B, respectivamente. Las muestras JG124 y JG151 presentan los valores más altos para ambas bandas, con 10.76-13.58  $\text{cm}^{-1}$  para las bandas A y 14.23-18.07  $\text{cm}^{-1}$  para las bandas B de las muestras JG124 y JG151.

Tabla 11. Resultados de FWHM para cada muestra de condrito ordinario.

<b>Muestra</b>	<b>FWHM (<math>\text{cm}^{-1}</math>)</b>	
	<b>A</b>	<b>B</b>
<b>MV023</b>	6.15	9.81
<b>MV025</b>	6.68	10.93
<b>DM053-A1</b>	6.60	9.62
<b>DM055-A2</b>	6.32	10.85
<b>JG124</b>	10.76	14.23
<b>JG151</b>	13.58	18.07

#### 4.3. Análisis de Datos: clasificación de muestras

Según los resultados para las muestras de composición conocida, se obtuvo un gráfico de porcentaje molar de fayalita en función de la calibración calculada a partir de la ecuación (8) (Figura 17). El detalle de estos resultados se encuentra en el anexo B.3. La razón lineal calculada para estos valores da como resultado la ecuación (9), que define el porcentaje molar de fayalita presente de acuerdo con la calibración calculada ( $\Delta_R^{cal}$ ) a partir de las bandas características del olivino y las bandas de Neón, con un error de  $\pm 0.2 \text{ cm}^{-1}$  con respecto al número de onda, y un error de  $\pm 1.5$  de composición de fayalita (% mol.).

$$\Delta_R^{cal} = \Delta_R^{med} \cdot \frac{\Delta_N^{ref}}{\Delta_N^{med}} \quad (8)$$

$$\%Fa = -7.72 \cdot \Delta_R^{cal} + 260.41 \quad (9)$$

Los resultados mostrados en la tabla 12 se obtuvieron a partir de la ecuación anterior, en donde se calculó la composición de cada muestra según el promedio dado para los resultados de calibración. El detalle de los resultados para cada cóndrulo se encuentra en el anexo C. Además, se muestra la clasificación según grupo químico para cada muestra, de acuerdo con los rangos establecidos por Van Schmus & Wood (1967). La figura 18 muestra el gráfico de contenido de fayalita y, además, las zonas de clasificación para cada grupo químico.

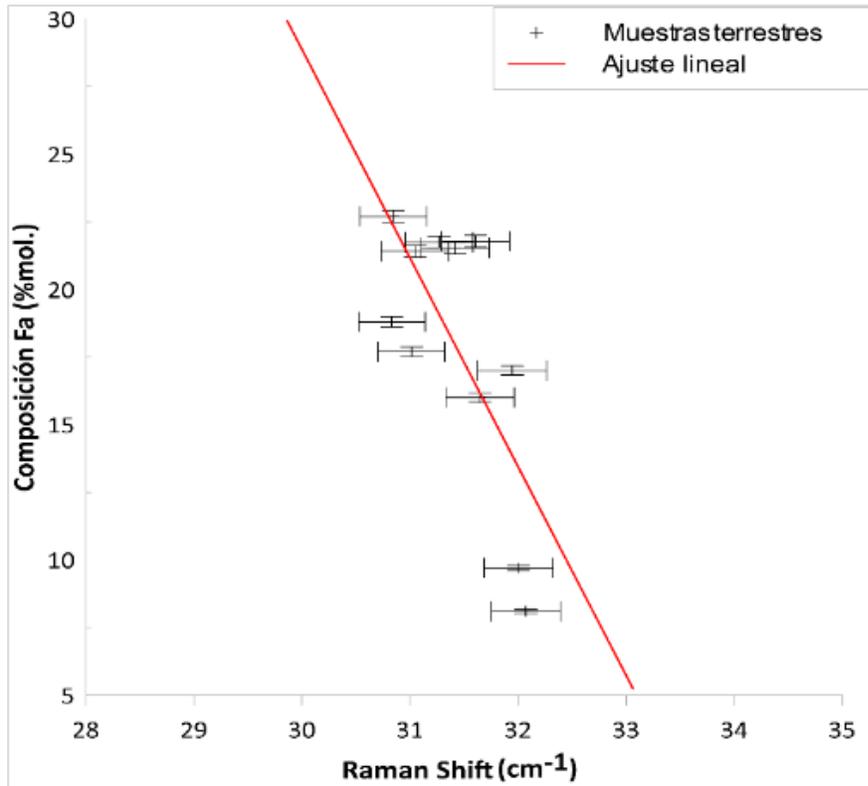


Figura 17. Correlación entre contenido de fayalita y los resultados de calibración para muestras de composición conocida (terrestres) y el ajuste lineal obtenido.

Tabla 12. Contenido promedio de fayalita calculado de acuerdo con los resultados obtenidos mediante la calibración, y su clasificación según grupo químico basado en los rangos establecidos por Van Schmus & Wood (1967).

Muestra	Contenido Fa (% mol.)	Clasificación según grupo químico	Referencia (Amengual, 2019; Luna, 2022)
MV023	18.82	H	H
MV025	18.96	H	H
DM053-A1	18.15	H	H
DM055-A2	17.03	H	L
JG124	16.61	H	H
JG151	22.18	L	L

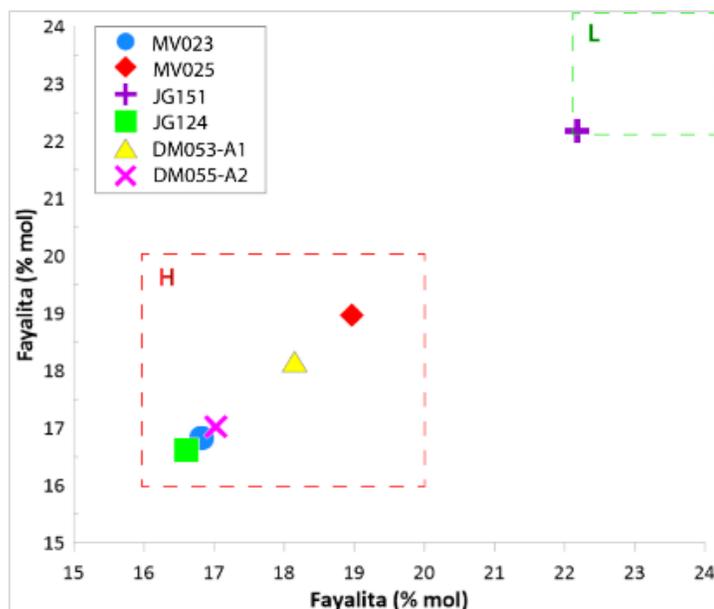


Figura 18. Clasificación de muestras según la cantidad de fayalita calculada de acuerdo a la calibración. El grupo químico LL queda fuera del rango de datos obtenidos.

### 4.3. Petrografía

Se realizó una observación y breve descripción petrológica de las muestras estudiadas, con el fin de encontrar cóndrulos aptos para la toma de espectros Raman. Estos últimos se escogieron según parámetros como buena preservación, buen redondeamiento y bordes definidos, poca presencia de fracturas e inclusiones vítreas/fluidas y metales, y de su composición, la cual debe presentar olivino como mineral predominante. Es decir, cóndrulos principalmente de tipo PO, BO y finalmente, y en caso de que no se encontrara alguno de los tipos anteriores, POP. De esta forma, se confeccionaron mapas petrográficos de las muestras (Anexo A.1) en donde se destacan los cóndrulos seleccionados. Cabe destacar que, por cada muestra, se escogieron por lo menos dos cóndrulos para la medición.

#### 4.1.1. MV023

La matriz muestra evidente recristalización, con textura granoblástica. Posee venillas de impacto observadas en casi toda el área de la sección delgada, rellenas de óxidos. Con respecto a minerales metálicos, se pueden observar principalmente kamacita y troilita, con este último siendo el más abundante. Estos cristales se encuentran bien conservados, con formas predominantemente subhedrales.

Los cóndrulos presentes en esta muestra presentan bordes pobremente definidos y difíciles de reconocer, con gran presencia de venillas rellenas de óxidos y diámetros de máximo 500  $\mu\text{m}$ . Sin embargo, es posible distinguirlos debido a los minerales metálicos que los rodean. Se observan fragmentos con cierto grado de redondeamiento que pueden corresponder a relictos de cóndrulos. En general, se pueden encontrar dos tipos de cóndrulos: POP, que corresponden a la mayor parte de la muestra, que presentan cristales distinguibles de olivino y fracturas

internas. También se observan fragmentos de este tipo de cóndrulo, que pudieron ser parte de un cuerpo anterior. El otro tipo destacado corresponde a cóndrulos PP, abarcando un porcentaje menor, cercano al 10% de la muestra. Para esta muestra se escogieron dos agregados: MV023-A y MV023-B (Figura 19) que parecieran corresponder a un cóndrulo y un fragmento de tipo PO, descritos a continuación.

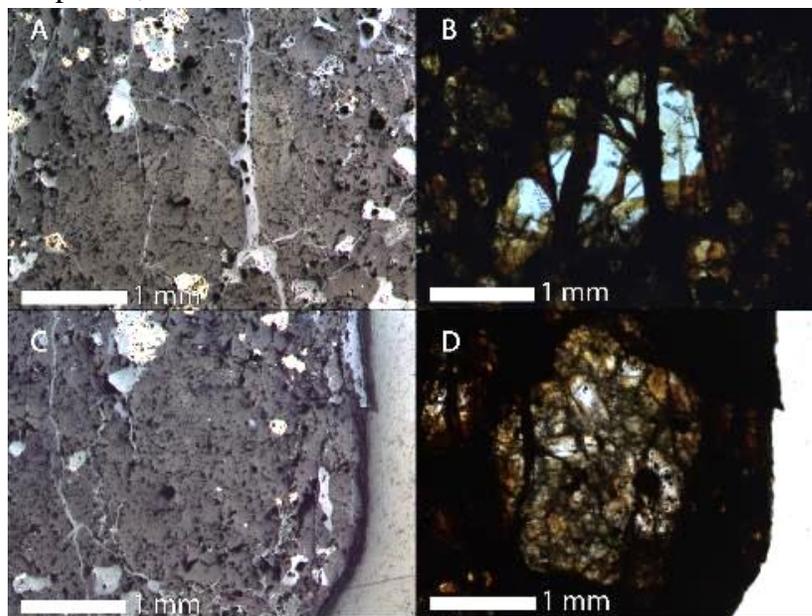


Figura 19. Microfotografía de cóndrulo y fragmento MV023-A (A y B) y MV023-B (C y D), a luz reflejada y luz transmitida respectivamente.

- (a) MV023-A: Cuerpo que podría ser un cóndrulo de tipo POP, que presenta fracturas rellenas de óxidos, además de inclusiones de minerales metálicos. Los bordes han perdido redondez, y posee un diámetro de aproximadamente 0.7 milímetros. Está compuesto principalmente por cristales de olivino.
- (b) MV023-B: Fragmento compuesto principalmente de olivino, que pudo haber sido parte de un cuerpo anterior. Se encuentra muy fracturado, y las venillas presentes están rellenas de óxidos. Se observan sectores puntuales en donde se encuentran familias de inclusiones vítreas.

#### 4.1.2. MV025

La matriz de esta muestra está compuesta mayoritariamente por vidrio, con fragmentos presentes de minerales ferromagnesianos, por lo tanto, correspondiendo a una textura porfidoblástica. Posee una cantidad menor de venillas, las cuales se concentran preferentemente dentro de los cóndrulos. Con respecto a los minerales metálicos, se observa principalmente kamacita, que se presenta con forma subhedral. También hay presencia de troilita subhedral, pero en una cantidad mucho menor.

En su mayoría, los cóndrulos presentes en esta muestra se encuentran bien conservados (aunque con presencia de fracturas), con bordes bien definidos y buen redondeamiento,

distinguidos con más facilidad que la muestra anterior. El tamaño de los cóndrulos es variado, con algunos llegando a medir hasta -aproximadamente- 1.5 mm de diámetro. Se observaron cóndrulos principalmente de tipos PO, PP y RP, escogiendo dos del primer tipo para el análisis posterior, mostrados en la figura 20 y descritos a continuación.

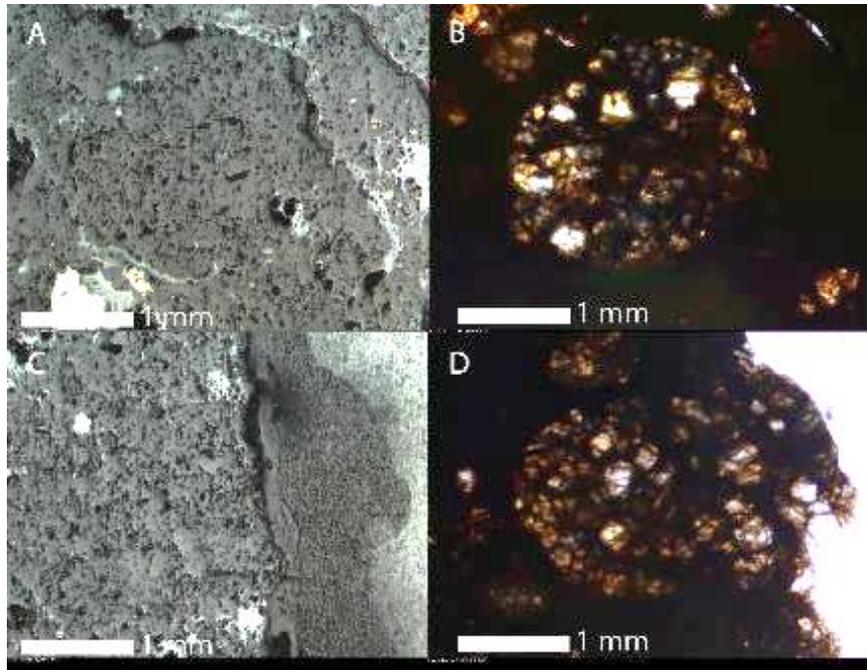


Figura 20. Microfotografías de cóndrulos MV025-D (A y B) y MV025-E (C y D), a luz reflejada y luz transmitida respectivamente.

- (a) MV025-D: Cóndrulo PO, que presenta buen redondeamiento y bordes bien definidos. Compuesto principalmente de olvino. Presenta algunas fracturas rellenas de óxidos.
- (b) MV025-E: Cóndrulo PO, bien redondeado y con bordes definidos. También se encuentra principalmente compuesto por olivino y presenta algunas fracturas rellenas de óxidos.

#### 4.1.3. DM053-A1

La matriz de esta muestra se encuentra en etapas tempranas de recristalización, distinguiéndose cristales silicatados de textura aproximadamente homogénea presentes en esta. La muestra presenta algunas fracturas, con una que se observa predominantemente hacia las orillas y que no se encuentra rellena. Las venillas presentes, aunque pocas, se encuentran rellenas por minerales opacos. De estos, principalmente se observa kamacita, con formas subhedrales a euhedrales. La troilita se presenta en menor cantidad, con formas subhedrales, y concentrada mayoritariamente hacia el centro de la muestra.

La mayoría de los cóndrulos observados en esta muestra se encuentran como relictos o fragmentos que pudieron haber pertenecido a otros cuerpos. Hay muy pocos agregados que conservan su forma circular y se observan muy fracturados. Se encontraron principalmente cóndrulos que podrían ser de tipo PO o POP, no muy bien conservados, debido a la temprana

etapa de recristalización que se observa, la cual implica la pérdida de distinción entre minerales en un mismo cóndrulo, pasando a fragmentos de texturas más homogéneas. Los cóndrulos escogidos se muestran en la figura 21.

- (a) DM053A1-A: Fragmento principalmente compuesto de olivino, muy fracturado. Presenta familias de inclusiones en sectores puntuales, además de minerales metálicos. Las fracturas se encuentran rellenas de óxidos. Posee bordes definidos y forma redondeada.
- (b) DM053A1-C: Se trata de un cóndrulo PO, muy fracturado. Las fracturas se encuentran rellenas, y se observan algunos pequeños fragmentos de minerales metálicos. Tiene buen redondeamiento y bordes definidos. Principalmente compuesto de olivino.
- (c) DM053A1-D: Cóndrulo PO, muy fracturado. Se observan fragmentos de minerales opacos en forma cristalina y como “gotitas”. Compuesto principalmente de olivino.

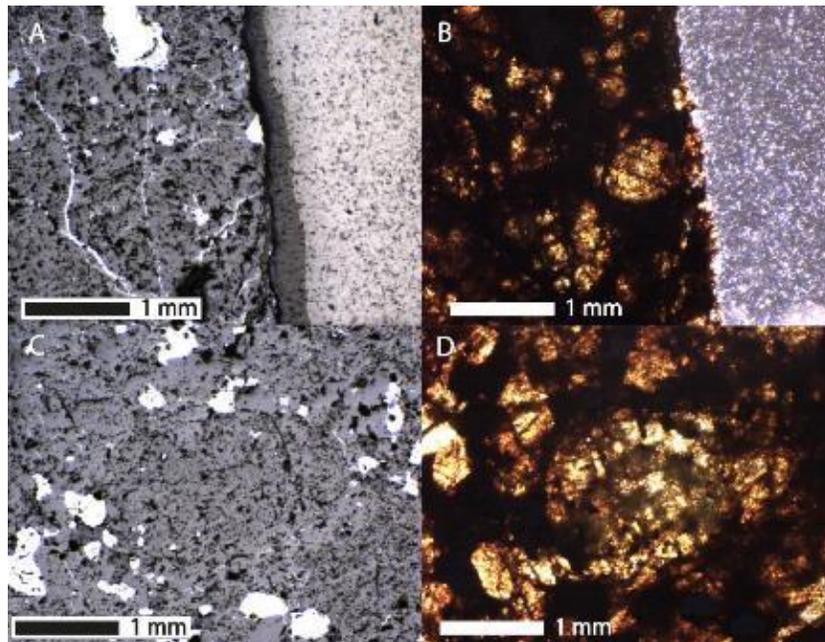


Figura 21. Microfotografías de cóndrulos DM053A1-C (A y B) y DM053A1-D (C y D), a luz reflejada y luz transmitida respectivamente.

#### 4.1.4. DM055-A2

En esta muestra se observa una matriz compuesta en su mayoría por cristales silicatados y minerales opacos, dándole una textura granoblástica. Se observa una gran cantidad venillas rellenas a lo largo de toda la muestra, y algunas fracturas hacia los bordes del corte. Además, esta muestra presenta algunos “huecos” hacia las orillas, asociados a disolución. Los minerales metálicos presentan altos niveles de oxidación y reemplazo, con presencia de troilita principalmente, y de kamacita en cantidades casi nulas.

Con respecto a los cóndrulos, aunque difíciles de identificar, estos agregados se encuentran bien redondeados, con bordes bien definidos. Sin embargo, en la mayor parte de la muestra se observan relictos de cuerpos anteriores, mezclados entre sí, que no presentan formas concretas. La mayoría de los cóndrulos observados presenta fracturas rellenas. En esta muestra se observaron principalmente cóndrulos de tipo PO y BO (Figura 22).

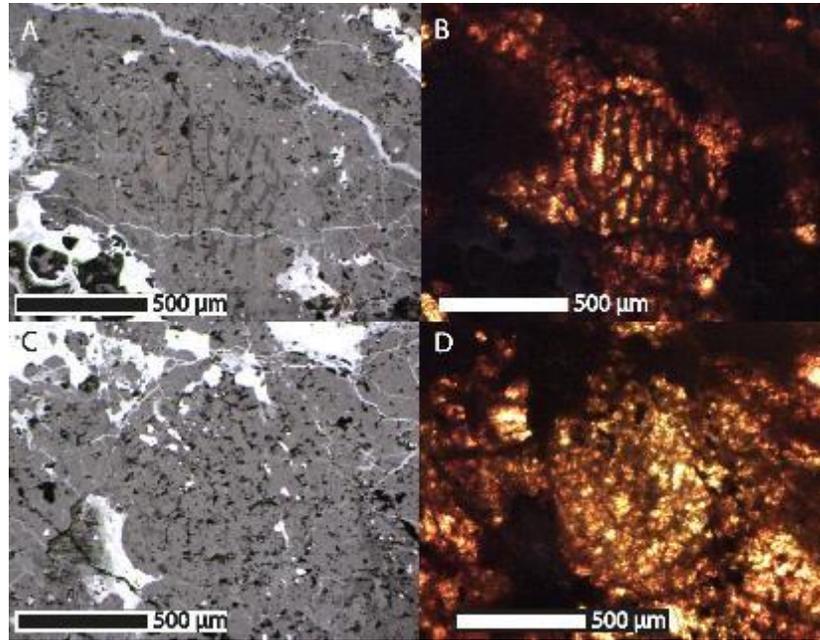


Figura 22. Microfotografías de cóndrulos DM055A2-A (A y B), DM055A2-B (C y D), a luz reflejada y luz transmitida respectivamente.

- (a) DM055A2-A: Cóndrulo de textura bandeada o BO. Presenta un borde definido determinado por un “anillo” que lo rodea. Presenta buen redondeamiento, aunque se encuentra en forma ovalada. Presenta una densidad pequeña de fracturas.
- (b) DM055A2-B: Cóndrulo PO, con bordes definidos por fragmentos de minerales opacos que lo rodean. Estos minerales también se encuentran como agregados en su interior. Está compuesto principalmente de olivino, y presenta fracturas rellenas de óxidos.
- (c) DM055A2-D: Fragmento que podría corresponder a un relicto de otro cuerpo, compuesto de olivino. Sus bordes se observan bien definidos, y presenta buen redondeamiento. Se observan fracturas rellenas de óxidos, con una de ellas que divide al cuerpo por la mitad.

#### 4.1.5. JG124

La matriz de esta muestra es predominantemente vítrea, con fragmentos de silicatos ferromagnesianos y minerales metálicos. Estos últimos se presentan principalmente como kamacita, de formas anhedrales a subhedrales, con un porcentaje menor de reemplazo por óxidos de hierro. Además, se observa troilita con forma subhedral, en la cual también se

observa reemplazo, pero en cantidades mucho menores que el mineral anterior. Se observa presencia de venas de choque y *melt pockets*.

En comparación con todas las otras muestras (a excepción de MV025), JG124 presenta los cóndrulos mejor preservados, con bordes bien definidos y buen redondeamiento, con diámetros de hasta 1 mm. Algunos agregados se observan en grupos, denominados cúmulos, de 2 hasta 4 cóndrulos. En esta muestra se observaron cóndrulos de tipo PO, BO, RP y POP. También se observan fracturas planares y extinción ondulosa en olivinos. Los agregados escogidos para el análisis Raman se muestran en la figura 23, y su descripción se encuentra a continuación.

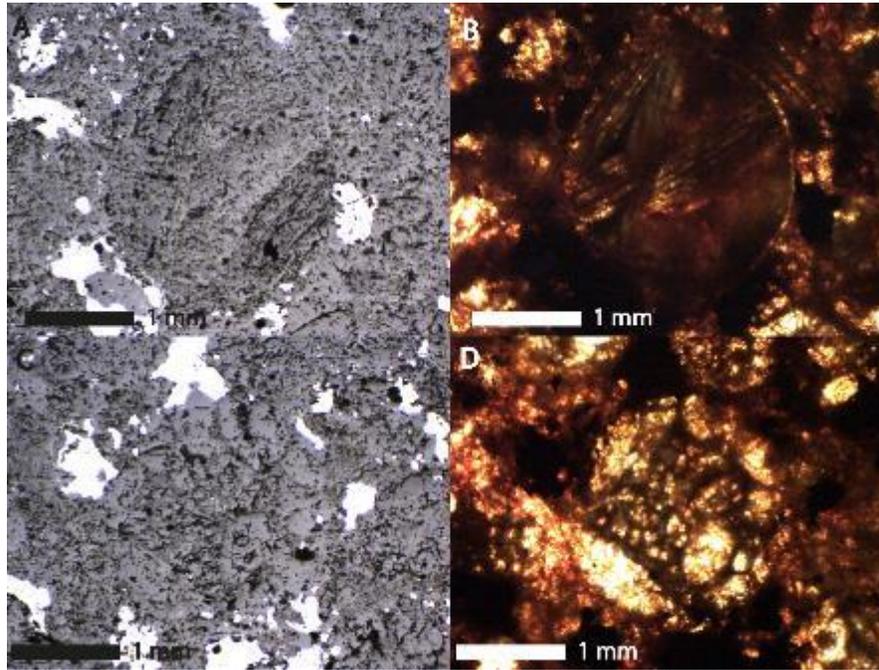


Figura 23. Microfotografías de cóndrulos JG124-C (A y B) y JG124-J (C y D), a luz reflejada y luz transmitida respectivamente.

- (a) JG124-C: Cóndrulo BO de tamaño considerable, muy fácilmente identificable debido a su textura bandeada y un anillo que delimita sus bordes. Presenta buen redondeamiento, y algunas familias de inclusiones vítreas en sectores puntuales.
- (b) JG124-G: Cóndrulo PO, con bordes bien definidos y buen redondeamiento. Presenta algunas fracturas rellenas de óxidos, además de inclusiones en sectores localizados y granos de minerales metálicos.
- (c) JG124-J: Cóndrulo PO, bien redondeado y con bordes bien definidos. Presenta fracturas rellenas y familias de inclusiones vítreas, además de fragmentos de minerales opacos que se encuentran localizados preferentemente hacia los bordes.

#### 4.1.6. JG151

Se observa una matriz compuesta por minerales silicatados, principalmente plagioclasa, con tamaño de cristales aproximadamente homogénea. El vidrio se encuentra en cantidades muy bajas, y en la mayor parte de la muestra se observan venillas de gran tamaño (aproximadamente 2-2.5 mm de ancho) rellenas de óxido y minerales metálicos. Estos últimos corresponden principalmente a kamacita y troilita, que presentan formas subhedrales a euhedrales, con una concentración mayoritaria en la matriz, más que en los fragmentos de cóndrulos.

Con respecto a estos últimos, en esta muestra solo se encontraron relictos o fragmentos pertenecientes a cuerpos anteriores, con avanzada recrystalización evidenciada por texturas homogéneas y poca cantidad de vidrio presente dentro de estos. Estos cuerpos corresponden en su mayoría a cóndrulos de tipo PO y PP. Además, se observaron cóndrulos identificados únicamente debido a que aún conservan sus bordes, pero el centro de estos se encuentra completamente reemplazado. Los cóndrulos seleccionados se muestran en la figura 24.

- (a) JG151-A: Relicto de un posible cóndrulo PO. Se observan fracturas rellenas de óxidos, además de familias de inclusiones, y algunos minerales opacos en forma granular y como “gotitas”, preferentemente ubicados hacia las orillas.
- (b) JG151-C: También corresponde a un fragmento de un posible cóndrulo PO anterior. Muy fracturado, con presencia de inclusiones vítreas y algunos fragmentos de minerales metálicos.

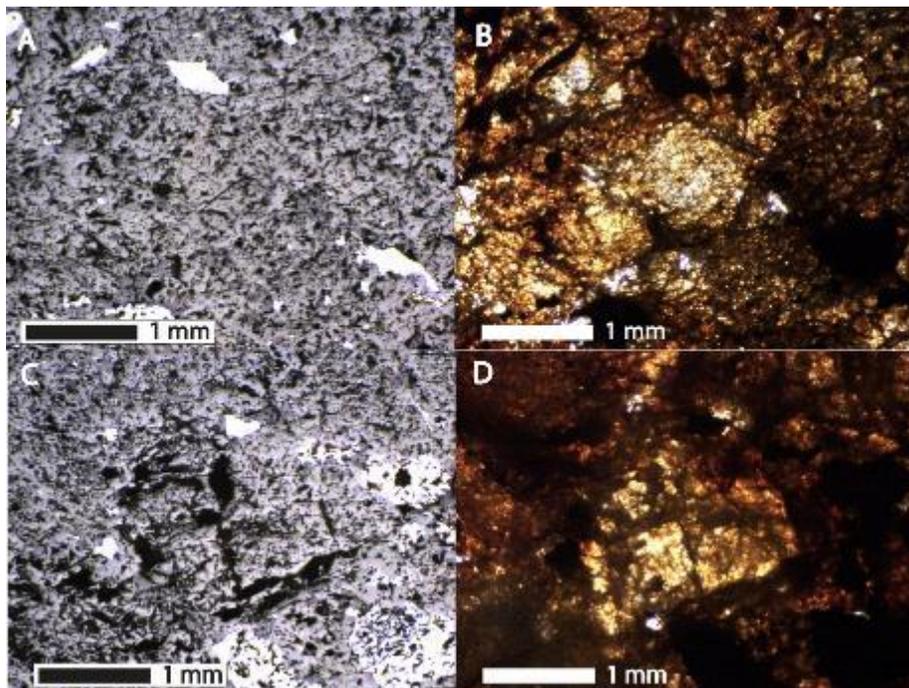


Figura 24. Microfotografías de fragmentos JG151-A (A y B) y JG151-C (C y D), a luz reflejada y luz transmitida respectivamente.

## V. Discusiones

### 5.1. Espectroscopía Raman

Las bandas características de olivino obtenidas para los cristales terrestres presentan forma homogénea, es decir, no se observan diferencias importantes en intensidad o posición entre las bandas A y B para cada una de las muestras. Sin embargo, esto sí se observa en las muestras de condritos ordinarios para los espectros tomados en puntos distintos de un mismo cóndrulo. Debido a que la intensidad depende de la polarizabilidad de una molécula y, en consecuencia, también depende de la concentración de estas, es posible que este cambio ocurra a causa de que la cantidad de moléculas presentes no sea homogénea en toda la muestra. Además, la posición de las bandas de olivino depende de la composición de fayalita presente, lo cual se debe a una disminución tanto de masa atómica como de volumen poliédrico (Kuebler et al., 2006). Así, como un cóndrulo puede estar compuesto por distintos granos de olivino, es posible que estos presenten composiciones ligeramente distintas.

Otro factor que podría estar afectando a estas variables corresponde al estado de choque. De acuerdo a lo establecido por Foster et al. (2013), este parámetro implica un cambio en la posición de las bandas Raman del olivino hacia valores más bajos, para composiciones entre Fo40 y Fo100, rango en el que se encuentran las muestras estudiadas. No obstante, Hariss y Burchell (2016) establecen que este cambio es permanente únicamente para presiones de choque entre 65-80 GPa. En cambio, para presiones menores -y a su vez, estados de choque menores- este cambio es temporal y se pierde luego de la descompresión. Así, como las muestras estudiadas presentan estados de choque entre S2 (5-10 GPa) y S5 (45-60 GPa), alcanzarían presiones máximas de 60 GPa (Stöffler et al., 1991; Fritz et al., 2017) y, por lo tanto, este parámetro no afectaría a la posición de las bandas de olivino.

Por otro lado, según los resultados obtenidos de FWHM para cada meteorito y la correlación establecida por Zhang et al. (2022), el estado de choque podría estar afectando al ancho de las bandas Raman. Según los resultados mostrados en la tabla 13, los valores de FWHM más altos para ambas bandas se encuentran en las muestras JG124 y JG151, lo cual puede correlacionarse con su clasificación de estado de choque mayor (S5) que los demás meteoritos.

La muestra JG124 fue clasificada con un estado de choque S3 según Amengual (2019) y S5 según Luna (2022) (tabla 1). Amengual (2019) destaca solamente la evidencia de troilita pleocroica para la clasificación, sin embargo, tanto en este trabajo como en Luna (2022) se destaca la presencia tanto de venillas de choque como de *melt pockets*, característicos de un estado de choque moderado a alto ( $\geq S4$ ), y de un alto nivel de metamorfismo de impacto de acuerdo con la textura de intercrecimiento (tipo plesita) observada en minerales metálicos (Luna, 2020). Además, algunos de los olivinos presentes muestran fracturas planares y extinción ondulosa. Debido a estas evidencias, se correlacionan los altos valores de FWHM con un estado de choque correspondiente a S5.

Para la muestra JG151, la correlación entre el estado de choque y los valores de FWHM altos es más evidente, de acuerdo con la presencia significativa de venas de impacto de tamaños importantes (de hasta, aproximadamente, 2.5 mm de ancho), y de *melt pockets*.

Tabla 13. Resultados de FWHM para cada muestra de condrito ordinario, y su estado de choque clasificado anteriormente por Amengual (2019) para todas las muestras y Luna (2022) para las muestras MV025 y JG124.

Muestra	FWHM (cm <sup>-1</sup> )		Estado de Choque
	A	B	
<b>MV023</b>	6.15	9.81	S4
<b>MV025</b>	6.68	10.93	S2
<b>DM053-A1</b>	6.60	9.62	S3
<b>DM055-A2</b>	6.32	10.85	S3
<b>JG124</b>	10.76	14.23	S5
<b>JG151</b>	13.58	18.07	S5

## 5.2. Calibración

Las metodologías utilizadas en trabajos anteriores utilizan los ajustes lineales calculados por Pittarello et al. (2015), en donde se definen dos ecuaciones para cada banda de olivino. Al no estar normalizadas las posiciones de las bandas Raman, los resultados para estos ajustes son susceptibles a errores significativos, con un error reportado de  $\pm 0.9$  cm<sup>-1</sup> para la posición de las bandas, lo cual implica a su vez un error de -aproximadamente-  $\pm 5$  %mol. de fayalita. Esto último afecta de forma relevante a la clasificación de condritos ordinarios, debido a que los rangos de porcentaje molar de Fa establecidos por Van Schmus y Wood (1967) para cada grupo químico presentan una diferencia mínima de  $\pm 4$  %mol.

En cambio, el uso del método de calibración definido por las ecuaciones (1), (2) y (3) para las posiciones de las bandas Raman, proporciona una estimación más precisa debido al uso de la luz de neón como referencia (Bakker, 2021), en donde la distancia entre las bandas estudiadas se normaliza a la distancia de referencia entre las bandas del gas, obteniéndose un error de  $\pm 0.2$  cm<sup>-1</sup> para la posición calibrada ( $\Delta_R^{cal}$ ), que se traduce en un error de  $\pm 1.5$  para el porcentaje molar de fayalita. Las referencias para el gas corresponden a la medición, a alta resolución, del espectro de emisión de Ne I (Civis et al., 2020). La figura 25 muestra la comparación entre los resultados de clasificación en grupos químicos para los condritos ordinarios estudiados, calculados mediante las ecuaciones definidas por Pittarello et al. (2015) -en rojo- y el ajuste lineal obtenido en este trabajo -en azul-. De esta comparación se puede apreciar que la composición de fayalita calculada mediante las ecuaciones establecidas por Pittarello et al. (2015) queda fuera del rango de clasificaciones de grupos químicos (>16 %mol.) para algunas muestras. Este error puede observarse notoriamente en los resultados de la ecuación obtenida para la banda B (Fig. 25.b), en donde 5 de 6 muestras quedan por debajo del rango de clasificación para el grupo H.

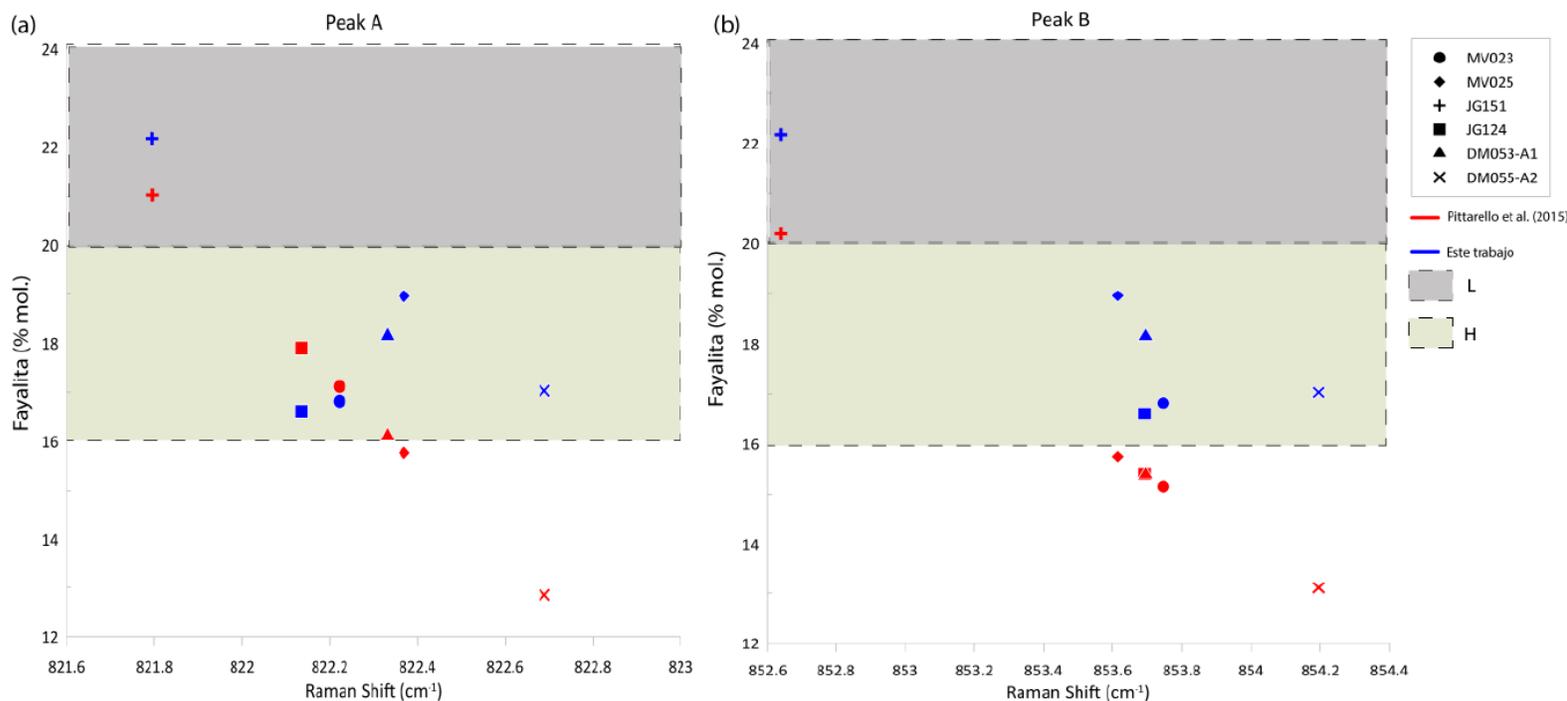


Figura 25. Resultados de composición de fayalita (% mol.) y su clasificación en grupos químicos para condritos ordinarios estudiados de acuerdo con las ecuaciones obtenidas por Pittarello et al. (2015) -en rojo- y el ajuste lineal calculado en este trabajo (azul). (a) Resultados para la banda A, (b) resultados para la banda B.

### 5.3. Análisis de datos: clasificación de muestras

De acuerdo con las clasificaciones previas realizadas por Amengual (2019) y Luna (2022) utilizadas como referencia para los resultados obtenidos en este trabajo, todas las muestras coinciden con la clasificación previa. Además, cabe destacar que la muestra JG124 es la única presente en la base de datos del *Meteoritical Bulletin*, nombrada oficialmente como El Médano 431 y clasificada como H5.

Es importante destacar que la muestra DM055-A2 es la única cuya clasificación no coincide, la cual fue anteriormente clasificada como condrito ordinario del grupo L. Según los resultados obtenidos mediante el ajuste calculado, esta muestra contiene un porcentaje molar de fayalita promedio de  $17.03 \pm 0.2$ . Este resultado implica que la muestra se clasificaría como condrito ordinario del grupo H. No obstante, en un estudio anterior realizado por Soto (2020) se analiza la muestra DM055-A1, proveniente de la misma roca, en el cual ésta es clasificada en el grupo químico H, con una composición de fayalita de  $19.2 \pm 1$ . Ambas clasificaciones previas se realizaron mediante análisis puntuales EDS en SEM. Sin embargo, los datos de Amengual (2019) presentan una desviación estándar importante -de 3.26 para Fa- en comparación con los datos obtenidos por Soto (2020), con una desviación estándar de 1, además de un mayor conjunto de análisis SEM-EDS. De acuerdo con estos resultados, la muestra DM055-A2 queda clasificada como grupo H mediante el método propuesto en este trabajo.

Finalmente, la tabla 14 muestra el resumen de clasificaciones tanto para grupo químico como estado de choque para todas las muestras estudiadas, según la metodología aplicada en este trabajo.

Tabla 14. Resumen de los resultados obtenidos para las clasificaciones de todas las muestras, según la metodología aplicada en este trabajo.

<b>Muestra</b>	<b>Grupo Químico</b>	<b>Estado de Choque</b>
<b>MV023</b>	H	S4
<b>MV025</b>	H	S2
<b>DM053-A1</b>	H	S3
<b>DM055-A2</b>	H	S3
<b>JG124</b>	H	S5
<b>JG151</b>	L	S5

## VI. Conclusiones

La espectroscopía Raman y, en consecuencia, el método formulado en este trabajo, proporciona una herramienta fácil y rápida de aplicar para la clasificación de condritos ordinarios. Esta técnica no requiere una preparación previa de las muestras, si no que solo basta con obtener cortes delgados de estas y realizar observaciones petrológicas para encontrar condritos candidatos para el análisis, lo cual puede realizarse en una misma sesión si el espectrómetro presenta un microscopio petrológico montado.

En comparación con otros métodos de análisis, la espectroscopía Raman proporciona una herramienta de identificación mineral no destructiva y específica, con la cual es posible identificar fases minerales de forma individual, a diferencia de otras técnicas -como SEM y EMPA- que entregan resultados de composición de todas las fases presentes.

Sin embargo, es importante tener en cuenta las características del material con el que se trabaja, como es el caso del olivino, del cual sus espectros tienden a ser sensibles a sus propiedades. En específico, la orientación en que se encuentra el cristal, la composición de éste y los procesos externos que han cambiado su estructura interna (como procesos de impacto) juegan un papel importante en el análisis de sus bandas Raman características, ya que tanto la intensidad como la posición y el ancho de estas dependen de estas variables. Así, realizar una buena calibración que considere estos parámetros es fundamental para obtener resultados coherentes y con errores mínimos.

Con respecto a la calibración realizada, se encontraron errores mínimos que no afectan de forma significativa a la clasificación posterior de condritos ordinarios (en comparación con trabajos anteriores), en donde los resultados obtenidos mediante esta metodología para grupos químicos y estados de choque coinciden con las clasificaciones realizadas previamente mediante petrología y análisis puntual SEM-EDS.

No obstante, es necesario realizar un análisis de esta técnica con un grupo de muestras más variado y en presentaciones distintas (sin cortar la muestra), abarcando todos los grupos químicos (H, L y LL) como estados de choque (S1-S6), con el fin de acreditar la metodología utilizada y reducir errores. En este sentido, también se recomienda realizar una calibración con piroxenos bajos en Ca, para obtener ajustes lineales que representen los tres *peaks* representativos de este mineral, resultando en otra forma de validación para la clasificación de grupos químicos, según los rangos establecidos por Van Schmus y Wood (1967) para piroxenos.

## Bibliografía

- Abreu, N., & Brearley, A. J. (2005). Carbonates in Vigarano: Terrestrial, preterrestrial, or both? *Meteoritics & Planetary Science*, 40(4), 609-625.
- Amengual, N. (2019). Una reconstrucción aproximada de los procesos iniciales que dieron origen a los primeros cuerpos celestes. (Memoria para optar al título de Geólogo, Universidad de Chile).
- Aravena, S. (2023). *Petrologic sub-type and Melt Inclusions Study in Chondrules of Three Carbonaceous Chondrites*. (Tesis de magíster inédita) Universidad de Chile.
- Audétat, A., & Lowenstern, J. (2014). Melt Inclusions. (2da, Ed.) *Treatise on Geochemistry*, 13, 143-173. Oxford: Elsevier.
- Bakker, R. (2021). The perfection of Raman spectroscopic gas densimeters. *Journal of Raman Spectroscopy*, 52, 1923-1948.
- Bland, P., Zolensky, M., Benedix, G., & Sephton, M. (2006). Weathering of Chondritic Meteorites. En *Meteorites and the Early Solar System II* (págs. 853-867). University of Arizona Press.
- Civiš, S., Zanozina, E., Pastorek, A., Kubelík, P., Ferus, M., & Chilukoti, A. (2020). *Atomic Emission Spectra of Neutral Noble Gases in the Infrared Spectral Range* (Vol. 122). Springer Series in Chemical Physics.
- Das, R. S., & Agrawal, Y. K. (2011). Raman spectroscopy: Recent advancements, techniques and applications. *Vibrational Spectroscopy*, 57(2), 163-176.
- do Nascimento-Dias, B. L., Donato, T. P., Zucolotto, M. E., & dos Anjos, V. (2021). Raman spectral peak positions of olivine (Fo-Fa) as fast methodology for classifying chondrites. *Journal of Raman Spectroscopy*, 52(6), 1206– 1211.
- Evatt, G., Smedley, A., Joy, K., Hunter, L., Tey, W., Abrahams, I., & Gerrish, L. (2020). Earth's meteorite falls found via Antarctic data. *Geology*, 48(7), 683-687.
- Feuchtgruber, H., Lutz, D., Beintema, D., Valentijn, E., Bauer, O., Boxhoorn, D., . . . Wieprecht, E. (1997). New Wavelength Determinations of Mid-Infrared Fine-structure Lines by Infrared Space Observatory Short Wavelength Spectrometer. *The Astrophysical Journal*, 487(2), 962-966.
- Foster, N., Wozniakiewicz, P., Price, M., Kearsley, A., & Burchell, M. (2013). Identification by Raman spectroscopy of Mg-Fe content of olivine samples after impact at 6 km s<sup>-1</sup> onto aluminium foil and aerogel: In the laboratory and in Wild-2 cometary samples. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 121, 1-14.
- Fries, M., & Steele, A. (2018). Raman Spectroscopy and Confocal Raman Imaging in Mineralogy and Petrography. *Confocal Raman Microscopy*, 66.

- Fritz, J., Greshake, A., & Fernandes, V. (2017). Revising the shock classification of meteorites. *Meteoritics & Planetary Science*, 52(6), 1216-1232.
- Goldstein, R. H., & Reynolds, T. (1994). *Systematics of Fluid Inclusions in Diagenetic Minerals*. Society of Sedimentary Geology.
- Grier, J. A., & Rivkin, A. S. (2019). Comparing sample and remote-sensing data. Understanding surface composition. *Airless Bodies of the Inner Solar System*, 95-119.
- Harriss, K., & Burchell, M. (2016). A study of the observed shift in the peak position of olivine Raman spectra as a result of shock induced by hypervelocity impacts. *Meteoritics & Planetary Science*, 51(7).
- Harriss, K., & Burchell, M. (2016). A study of the observed shift in the peak position of olivine Raman spectra as a result of shock induced by hypervelocity impacts. *Meteoritics & Planetary Science*, 51(7), 1289-1300.
- Hutchinson, R. (2004). *Meteorites: A petrologic, chemical and isotopic synthesis*. Cambridge University Press: 511 pp. New York.
- Ishibashi, H., Arakawa, M., Ohi, S., Yamamoto, J., Miyake, A., & Kagi, H. (2008). Relationship between Raman spectral pattern and crystallographic orientation of a rock-forming mineral: a case of study of Fo<sub>89</sub>Fa<sub>11</sub> olivine. *Journal of Raman Spectroscopy*, 39(11), 1653-1659.
- Jimenez-Sandoval, S. (2000). Micro-Raman spectroscopy: a powerful technique for materials research. *Microelectronics Journal*, 31(6), 419-427.
- Kallemeyn, G., Rubin, A., Wang, D., & Wasson, J. (1989). Ordinary chondrites: Bulk compositions, classification, lithophile-element fractionations and composition-petrographic type relationships. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(10), 2747-2767.
- Kocks, U. F. (2000). *Texture and anisotropy: preferred orientations in polycrystals and their effect on materials properties*. Cambridge University Press.
- Krot, A. N., Keil, K., Scott, E. D., Goodrich, C. A., & Weisberg, M. K. (2007). Classification of Meteorites. *Treatise on Geochemistry*, 1-52.
- Kuebler, K., Jolliff, B., Wang, A., & Haskin, L. (2006). Extracting olivine (Fo–Fa) compositions from Raman spectral peak positions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70, 6201–6222.
- Kurat, G., Varela, M., Hoppe, P., & Clochiatti, R. (1997b). Glass inclusions in Renazzo olivine: Condensates from the solar nebula? *Meteoritics & Planetary Science*, 32(4), 76.
- Laserna, J. (2001). *An Introduction to Raman Spectroscopy: Introduction to Basic Principles*. Wiley Analytical Science.
- Lee, M., & Bland, P. (2004). Mechanisms of weathering of meteorites recovered from hot and cold deserts and the formation of phyllosilicates. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(4), 893-916.

- Luna, D. (2022). Clasificación y descripción de meteoritos mediante análisis petrográfico. (Memoria para optar al título de Geólogo, Universidad de Chile).
- Nesse, W. (1991). *Introduction to Optical Mineralogy* (Segunda ed.). Oxford University Press.
- Neuville, D., Henderson, G., & de Ligny, D. (2014). Advances in Raman Spectroscopy Applied to Earth and Material Sciences. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 78, 509-541.
- Papike, J. (1987). Chemistry of the Rock-Forming Silicates: Ortho, Ring, and Single-Chain Structures. *Reviews of Geophysics*, 25(7), 1483-1526.
- Pittarello, L., Baert, K., Debaille, V., & Claeys, P. (2015). Screening and classification of ordinary chondrites by Raman spectroscopy. *Meteoritics & Planetary Science*, 50(10), 1718-1732.
- Pourkhorsandi, H., Mirnejad, H., Rochette, P., & Hassanzadeh, J. (2015). Lut 009, an H4 (S2, W4) ordinary chondrite meteorite from Lut Desert of Iran. *Journal of the Earth and Space Physics*, 41(4), 125-130.
- Raith, M., Raase, P., & Reinhardt, J. (2012). *Guía para la microscopía de minerales en lámina delgada*.
- Reed, S. (2005). *Electron Microprobe Analysis and Scanning Electron Microscopy in Geology* (Segunda ed.). Cambridge University Press.
- Ribbe, P. (1982). *Orthosilicates* (Segunda ed.).
- Roedder, E. (1984a). Fluid Inclusions. (P. Ribbe, Ed.) *Reviews in Mineralogy*(Vol. 12), Mineralogical Society of America.
- Roedder, E. (1984b). Occurrence and significance of magmatic inclusions and silicate liquid immiscibility. *Acta Geologica Polonica*, 34(1), 139-178.
- Rostron, P., Gaber, S., & Gaber, D. (2016). Raman Spectroscopy, Review. *International Journal of Engineering and Technical Research*, 6(1).
- Rull, F. (2012). The Raman effect and the vibrational dynamics of molecules and crystalline solids. En *Applications of Raman Spectroscopy to Earth Sciences and cultural heritage* (Vol. 12, págs. 1-60). EMU Notes in Mineralogy.
- Rull, F., Muñoz-Espadas, M., Lunar, R., & Martínez-Frías, J. (2010). Raman spectroscopic study of four Spanish shocked ordinary chondrites: Canellas, Olmedilla de Alarcón, Reliegos and Olivenza. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 368(1922), 3153-3166.
- Russell, S., Connolly Jr., H., & Krot, A. (2018). *Chondrules: Records of Protoplanetary Disk Processes*. Cambridge Planetary Science.
- Saikia, B., Parthasarathy, G., Borah, R. R., Satyanarayanan, M., Borthakur, R., & Chetia, P. (2017). Spectroscopy and Mineralogy of a Fresh Meteorite Fall Kamargaon (L6) Chondrite. *Proceedings of the Indian National Science Academy*, 83, 941-948.

- Scott, E. D., & Krot, A. N. (2014). Chondrites and Their Components. *Treatise on Geochemistry*, 65-137.
- Smith, E., & Dent, G. (2019). *Modern Raman Spectroscopy: A Practical Approach* (2da ed.). Wiley.
- Sruthi, N. (2019). A Review on Raman Rays with Respect to Raman Spectroscopy. *International Journal of Forensic Sciences*, 4(1).
- Stöffler, D., Keil, K., & Scott, E. (1991). Shock metamorphism of ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55, 3845-3867.
- Tagliaferro, A., Rovere, M., Padovano, E., Bartoli, M., & Giorcelli, M. (2020). Introducing the Novel Mixed Gaussian-Lorentzian Lineshape in the Analysis of the Raman Signal of Biochar. *Nanomaterials*, 10(9), 1748.
- Ulloa, B. (2017). Clasificación y caracterización del grado de metamorfismo de choque de tres condritos ordinarios del desierto de Atacama: J3109, J657 y J302. (Memoria para optar al título de Geóloga, Universidad de Concepción).
- Van Schmus, W., & Wood, J. (1967). A chemical-petrologic classification for the chondritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 31(5), 747-765.
- Varela, M., & Zinner, E. (2018). Unraveling the role of liquids during chondrule formation processes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 221, 358-378.
- Varela, M., Kurat, G., & Zinner, E. (2005). A liquid-supported condensation of major minerals in the solar nebula: Evidence from glasses in the Kaba (CV3) chondrite. *Icarus*, 178(2), 553-569.
- Varela, M., Kurat, G., Hoppe, P., & Brandstätter, F. (2002). Chemistry of glass inclusions in olivines of the CR chondrites Renazzo, Acfer 182 and El Djouf 001. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66(9), 1663-1679.
- Vernazza, P., Zanda, B., Nakamura, T., Scott, E., & Russell, S. (2015). *The Formation and Evolution of Ordinary Chondrite Parent Bodies*. (P. D. Michel, Ed.) University of Arizona Press: 617-634. Tucson.
- Wang, A., Jolliff, B., Haskin, L., Kuebler, K., & Viskupic, K. (2001). Characterization and comparison of structural and compositional features of planetary quadrilateral pyroxenes by Raman spectroscopy. *American Mineralogist*, 86(7-8), 790-806.
- Wang, A., Kuebler, K., Jolliff, B., & Haskin, L. (2004). Mineralogy of a Martian meteorite as determined by Raman spectroscopy. *Journal of Raman Spectroscopy*, 35, 504-514.
- Wasson, J. (1972). Formation of Ordinary Chondrites. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 10(3), 711-759.

- Wojdyr, M. (2010). Fityk: a general-purpose peak fitting program. *Journal of Applied Crystallography*, 43, 1126-1128.
- Wood, J. (1967). Chondrites: Their Metallic Minerals, Thermal Histories, and Parent Planets. *Icarus*, 6(1-3), 1-49.
- Yomogida, K., & Matsui, T. (1983). Physical properties of ordinary chondrites. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 88(B11), 9513-9533.
- Yurimoto, H., Itoh, S., Zolensky, M., Kusakabe, M., Karen, A., & Bodnar, R. (2014). Isotopic compositions of asteroidal liquid water trapped in fluid inclusions of chondrites. *Geochemical Journal*, 48(6), 549-560.
- Zhang, Y., Xia, Z., Miao, B., Huang, J., Zhang, C., Chen, Y., & Chen, G. (2022). Raman Spectroscopy Studies of Equilibrated Ordinary Chondrites with H and L Group and Shock Metamorphism Degrees. *Minerals*, 12.
- Zolensky, M., Bodnar, R., & Rubin, A. (1999). Asteroidal Water Within Fluid-Inclusion-bearing Halite in Ordinary Chondrites. *Meteoritics & Planetary Science*, 34, 124.
- Zolensky, M., Bodnar, R., Gibson, E., Nyquist, L., Reese, Y., Shih, C., & Wiesmann, H. (1999). Asteroidal Water Within Fluid Inclusion-Bearing Halite in an H5 Chondrite, Monahans (1998). *Science*, 285(5432), 1377-1379.
- Zolensky, M., Bodnar, R., Yurimoto, H., Itoh, S., Fries, M., Steele, A., & Ito, M. (2017). The search for and analysis of direct samples of early Solar System aqueous fluids. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 375(2094).

## Anexos

### A. Mapas petrográficos y Espectros Raman

#### A.1. Muestras Estudiadas

MV023

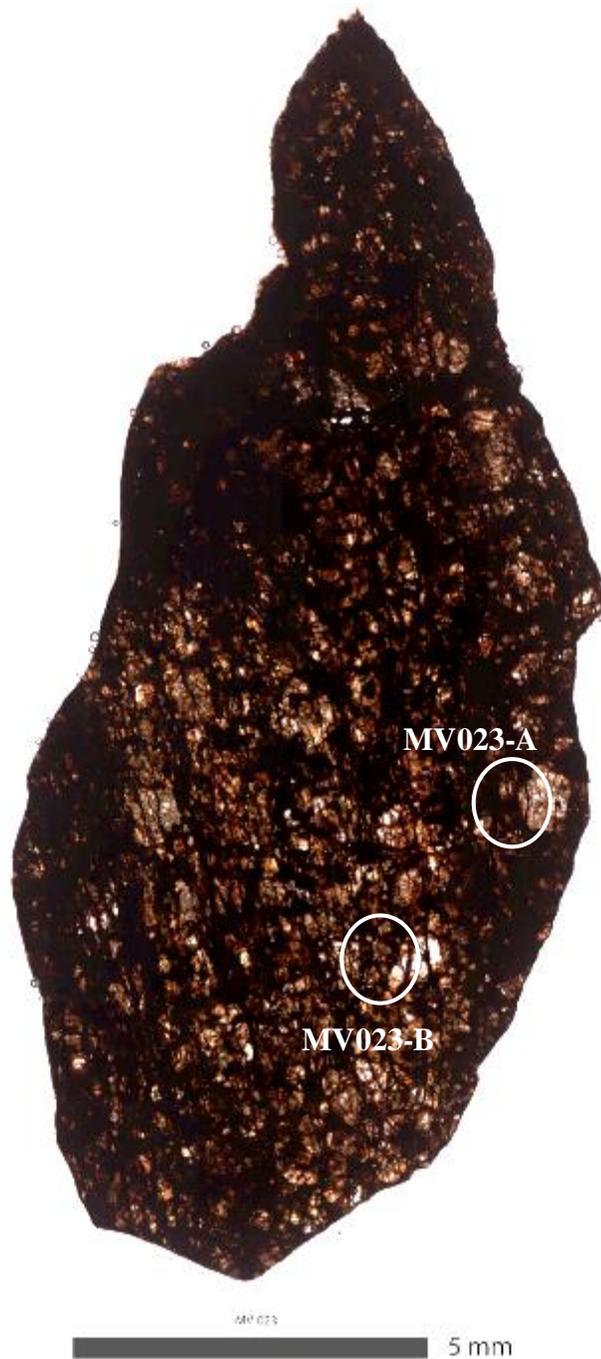


Figura 26. Mapa de corte de la muestra MV023 con microfotografías, aumento 4X.

MV025

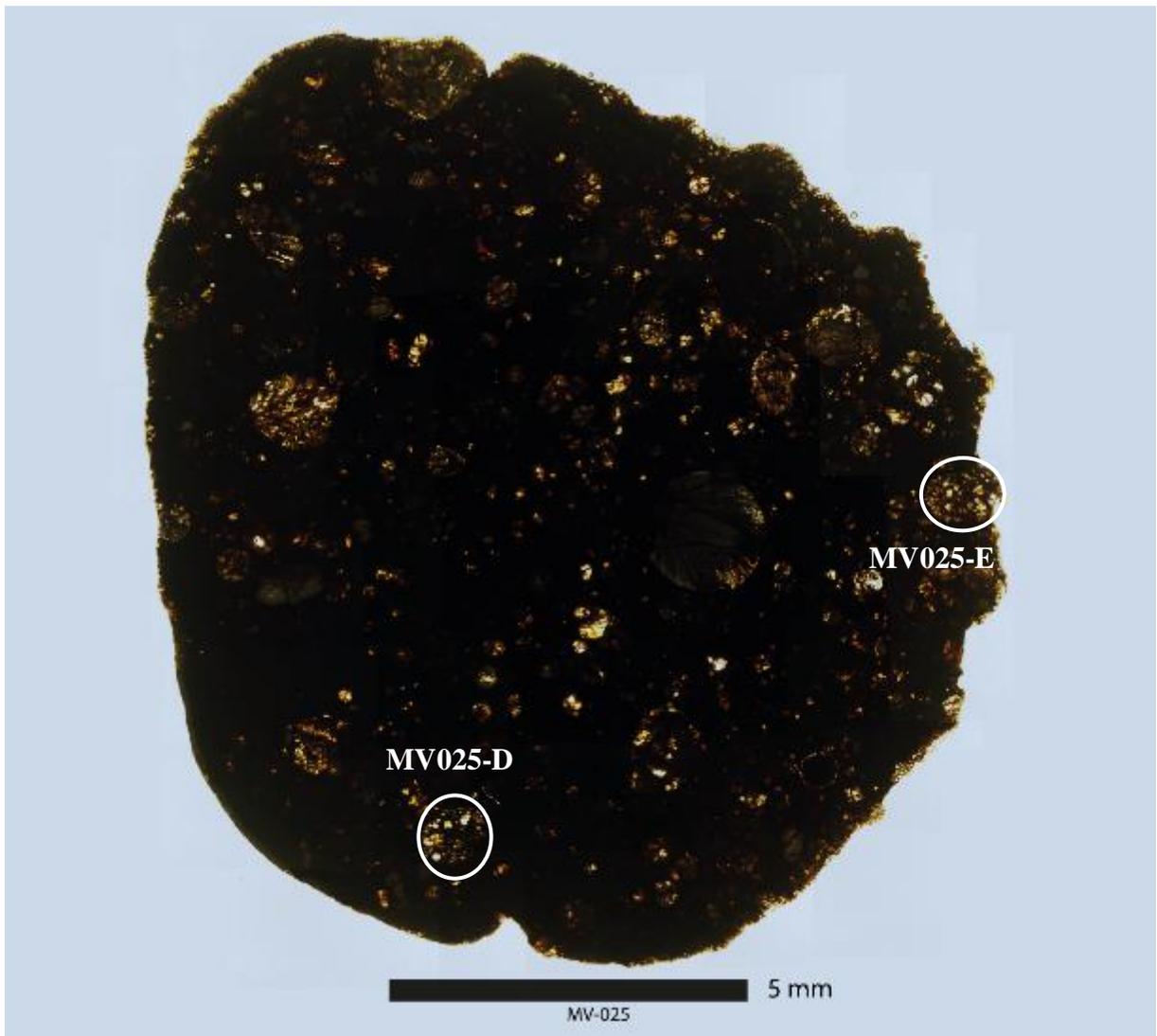


Figura 27. Mapa de la muestra MV025 con microfotografías, aumento 4X.

DM053-A1

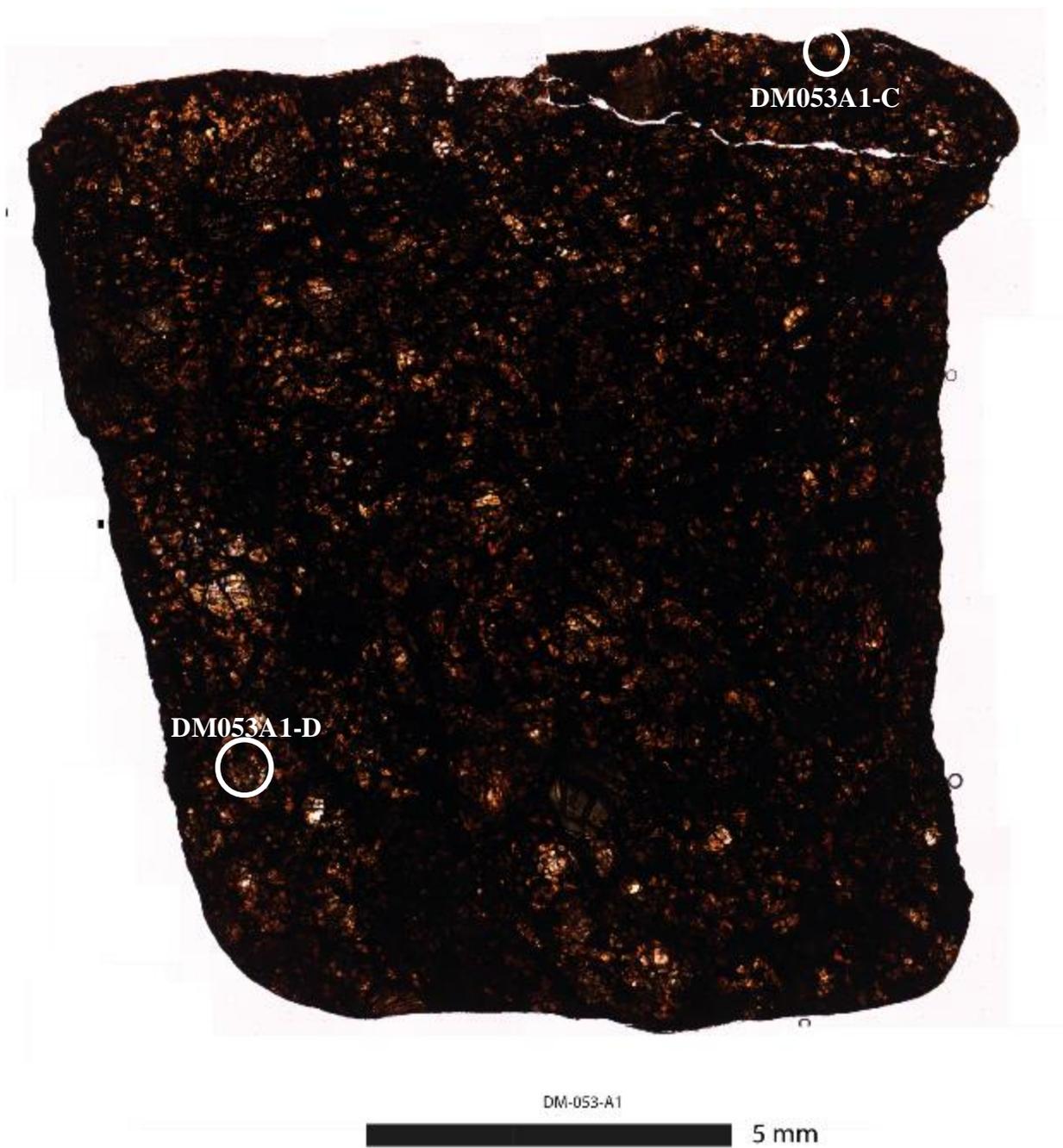


Figura 28. Mapa de la muestra DM053-A1 con microfotografías, aumento 4X

DM055-A2

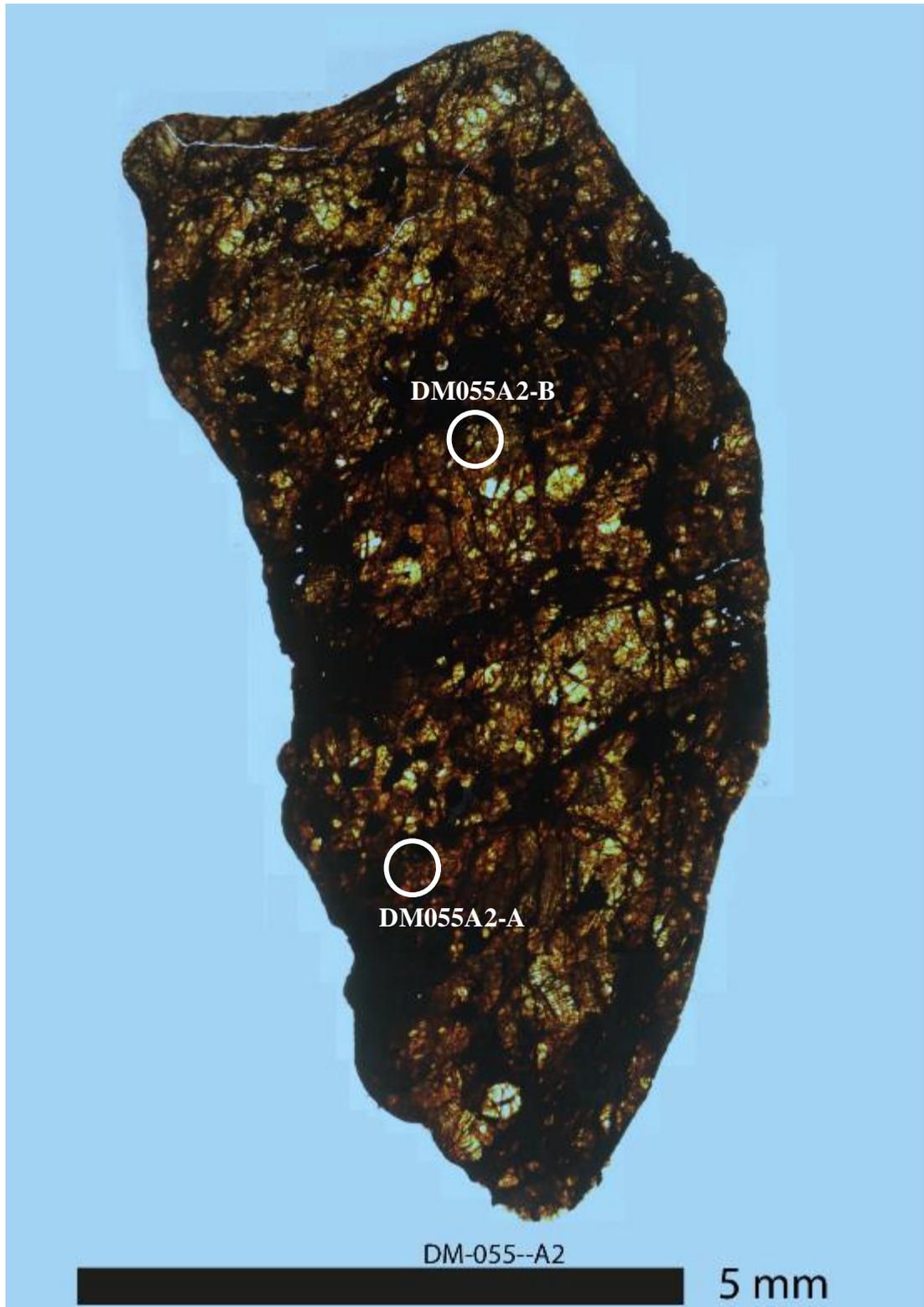


Figura 29. Mapa de la muestra DM055-A2 con microfotografías, aumento 4X.

JG124



Figura 30. Mapa de la muestra JG124 con microfotografías, aumento 4X.

JG151

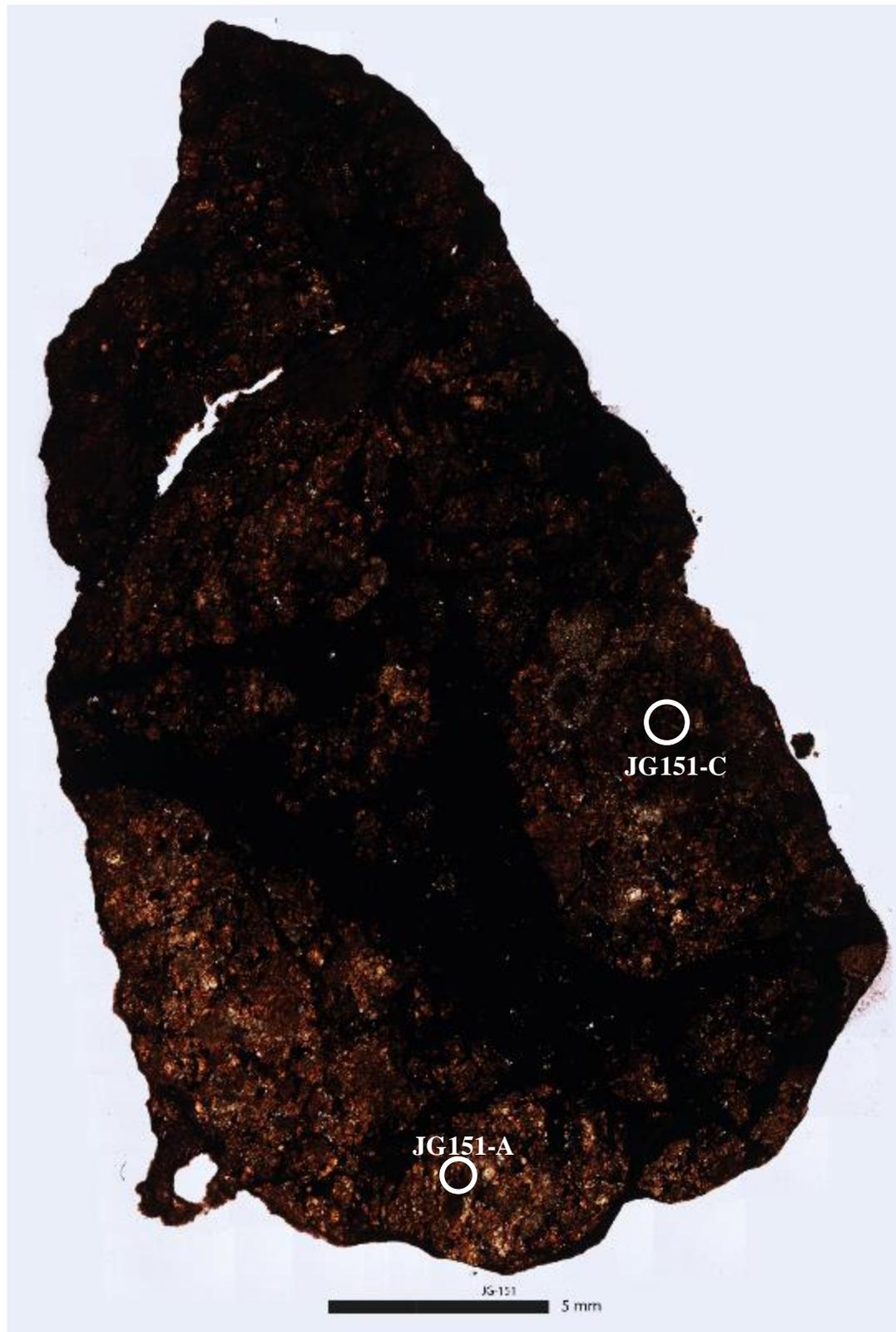


Figura 31. Mapa de la muestra JG151 con microfotografías, aumento 4X.

Los espectros Raman obtenidos para cada uno de estos cóndrulos se muestran en las figuras 32-37.

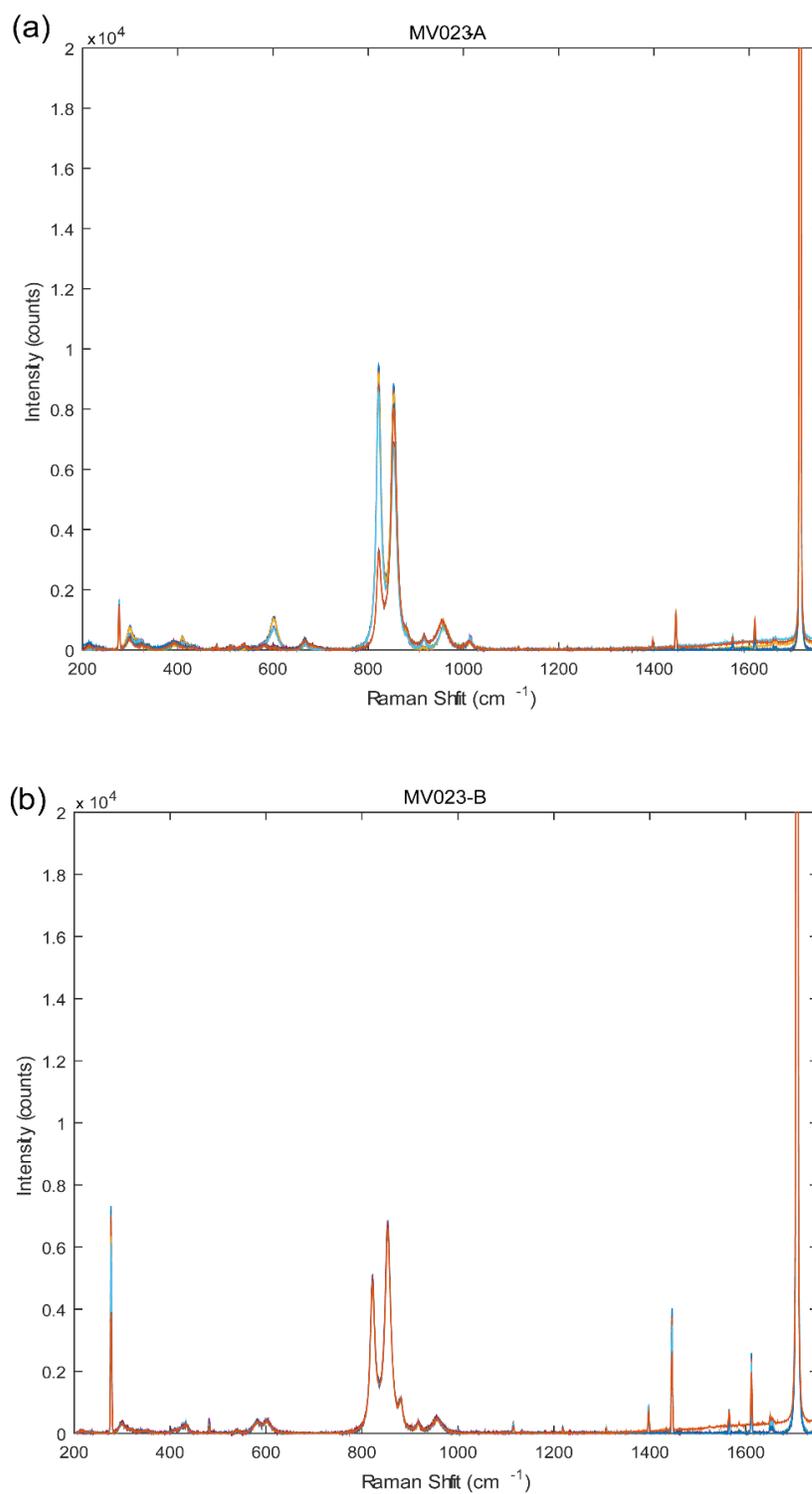


Figura 32. Espectros Raman para la muestra MV023. (a) Cóndrulo A, (b) Cóndrulo B.

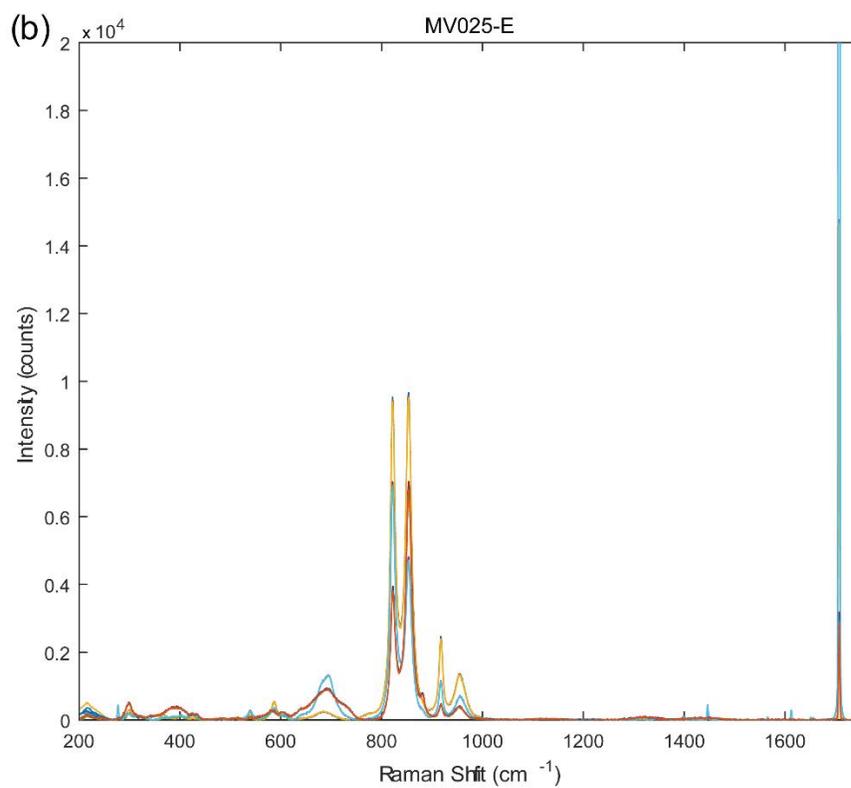
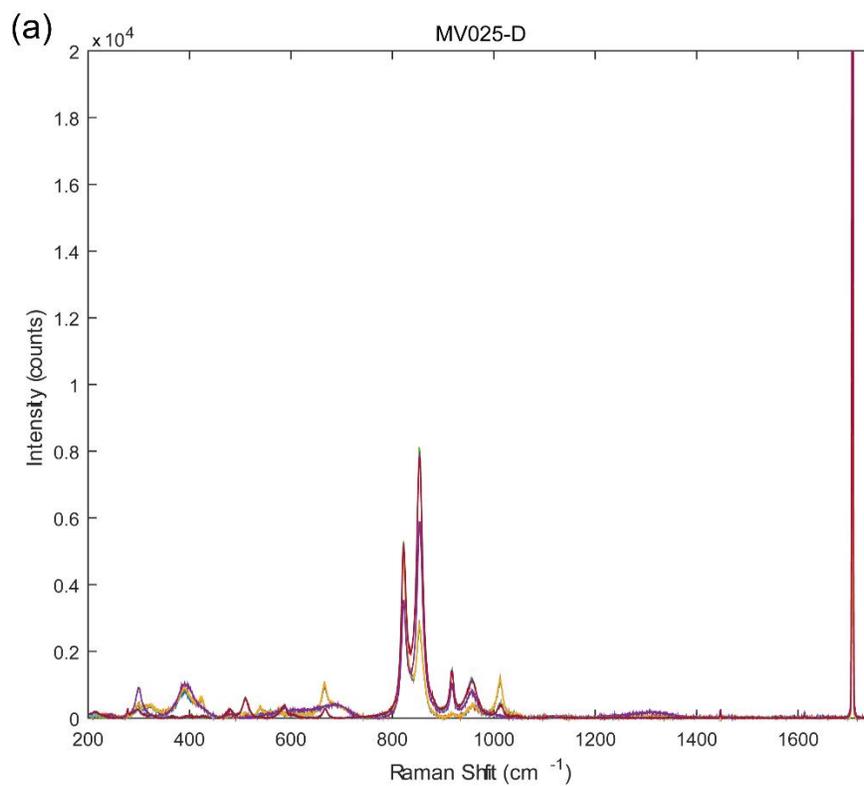


Figura 33. Espectros Raman para la muestra MV025. (a) Cóndrulo D y (b) Cóndrulo E.

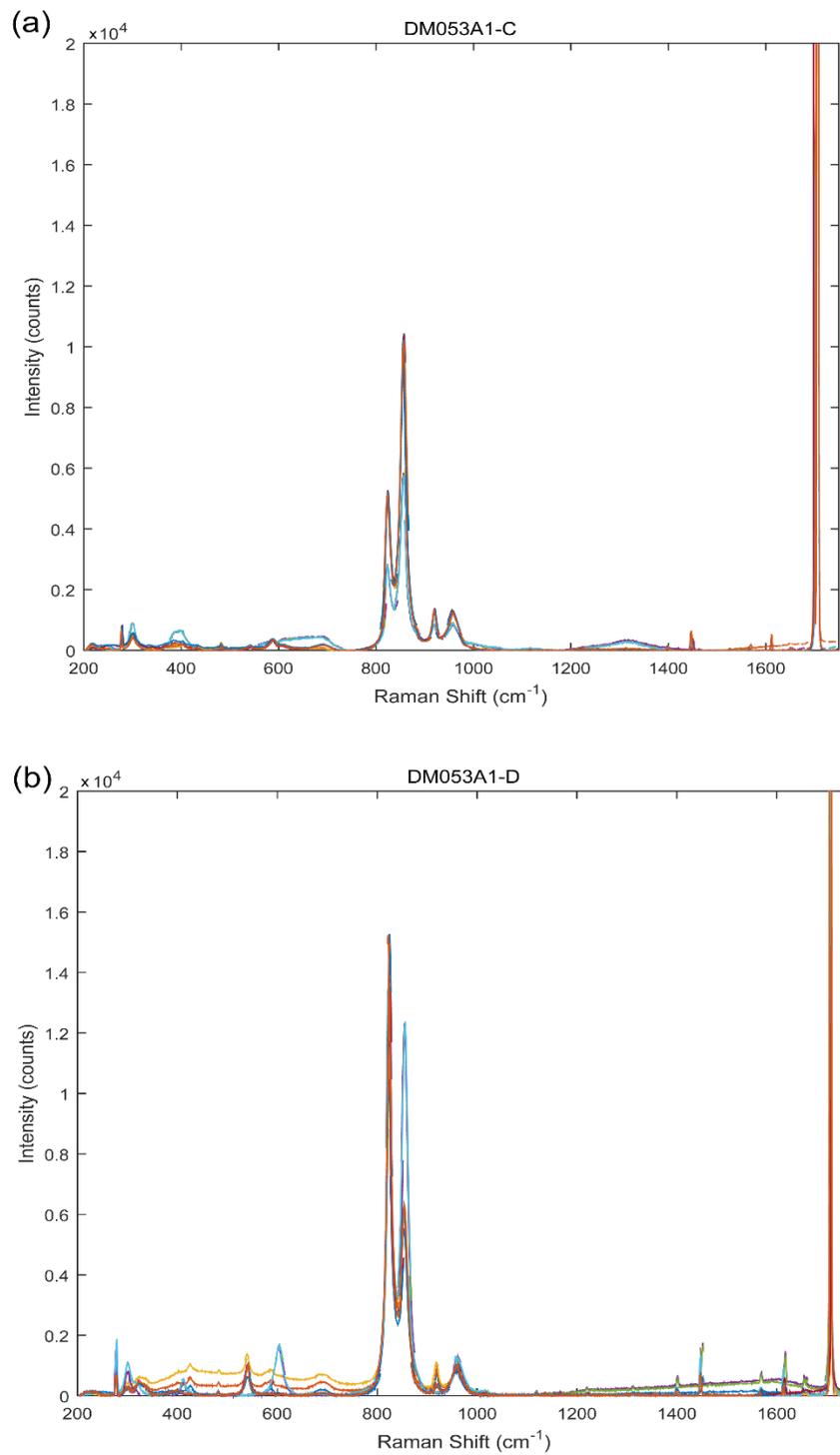


Figura 34. Espectros Raman para la muestra DM053-A1. (a) Cóndrulo C y (b) Cóndrulo D.

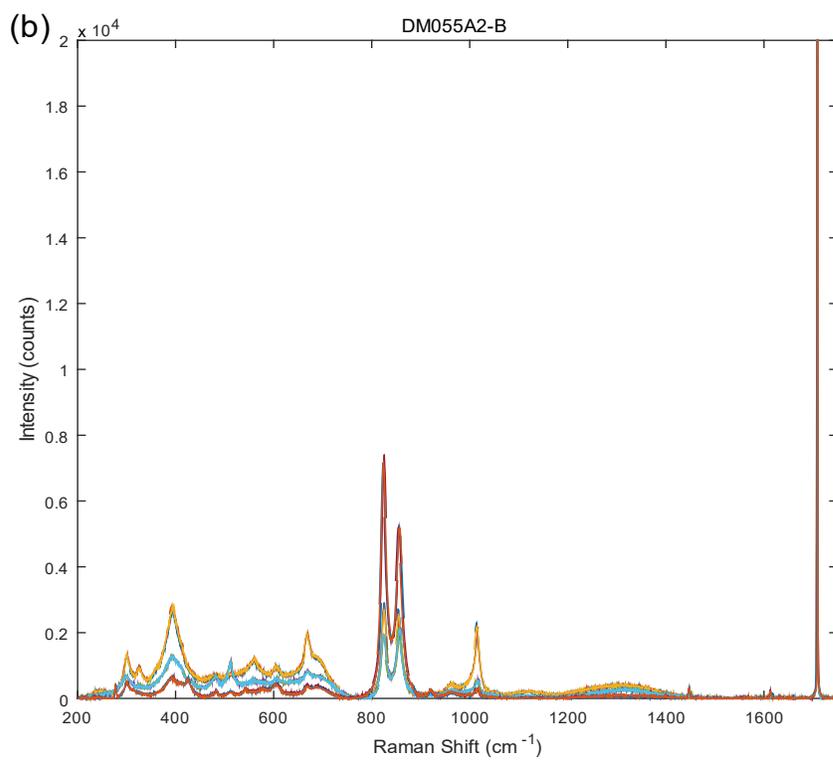
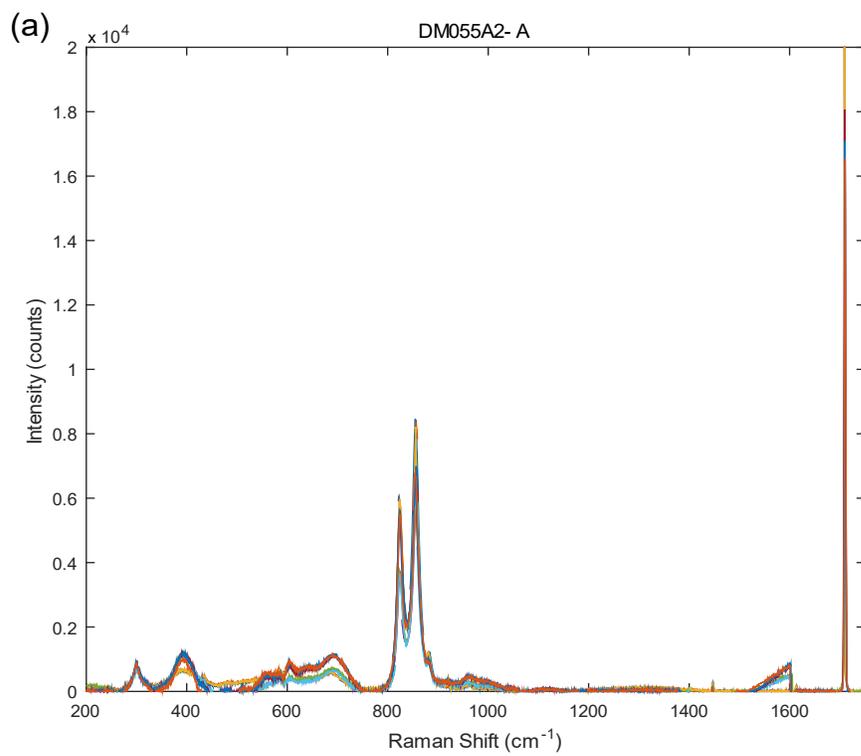


Figura 35. Espectros Raman para la muestra DM055-A2. (a) Cóndrulo A, y (b) Cóndrulo B.

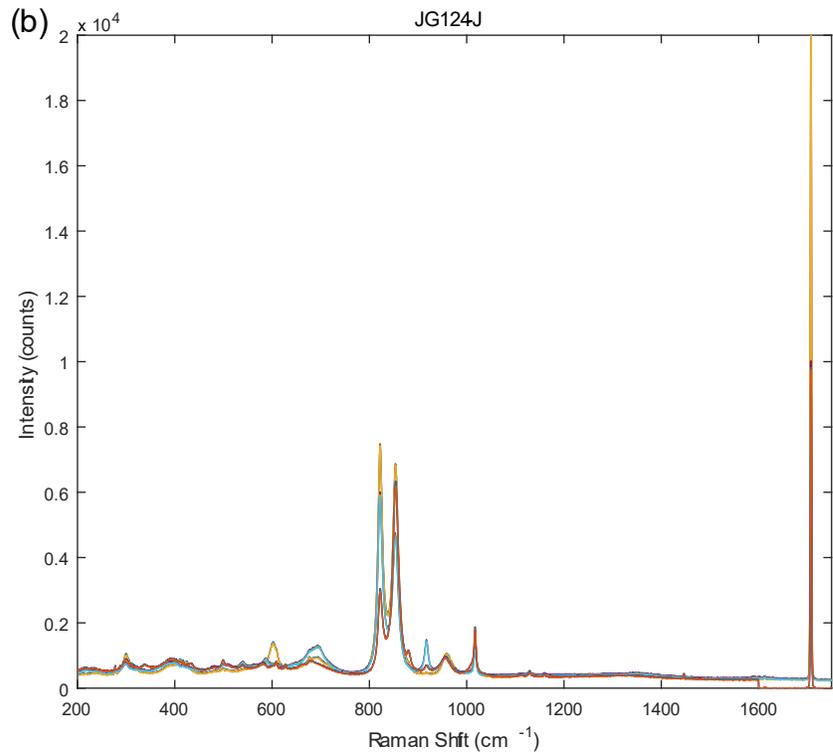
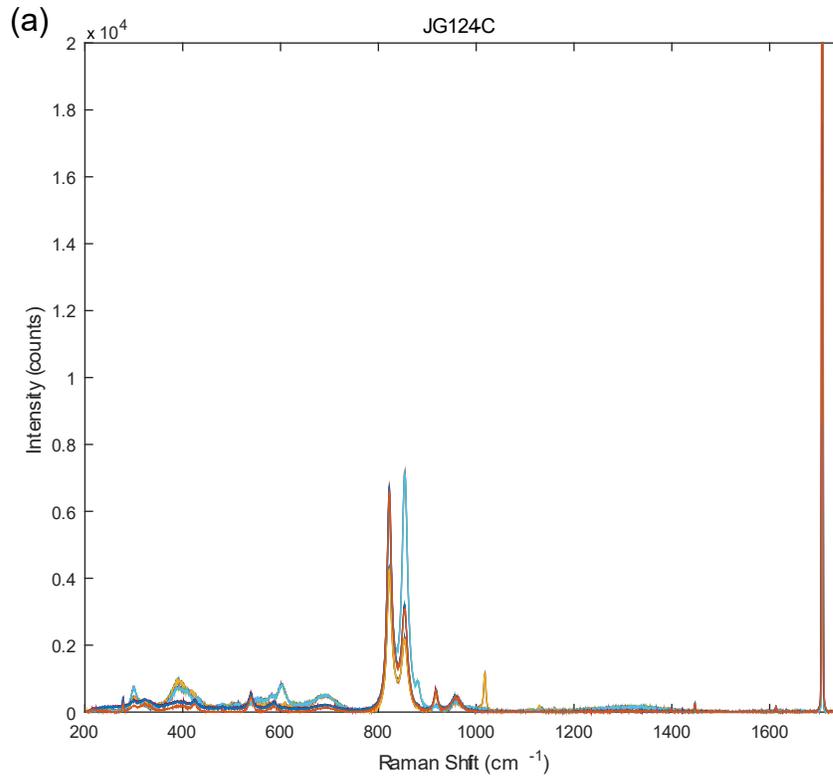


Figura 36. Espectros Raman para la muestra JG124. (a) Cóndrulo C, (b) Cóndrulo J.

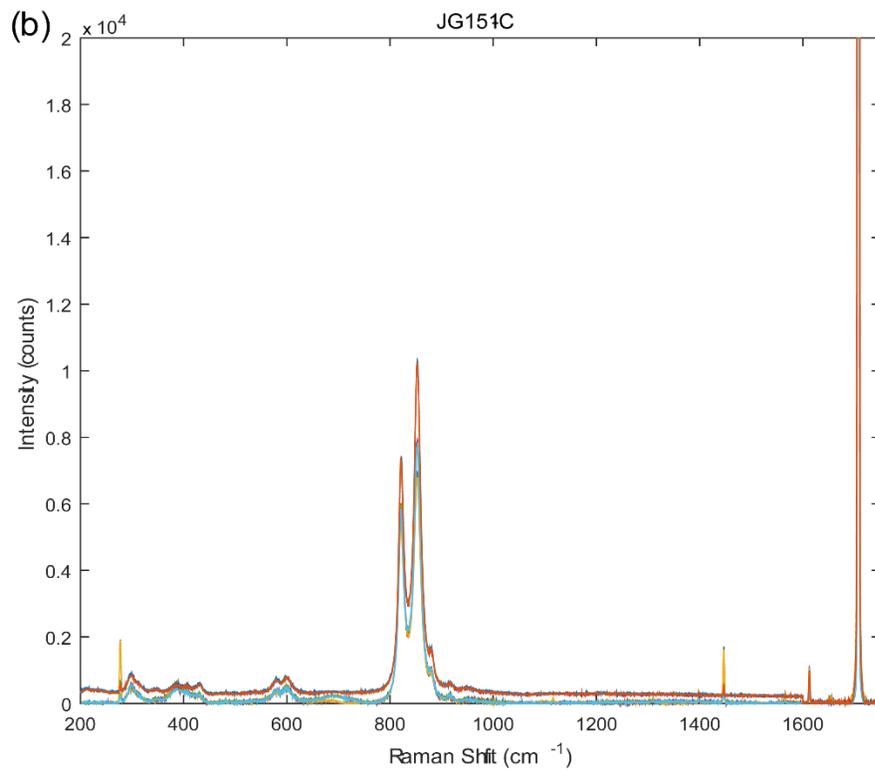
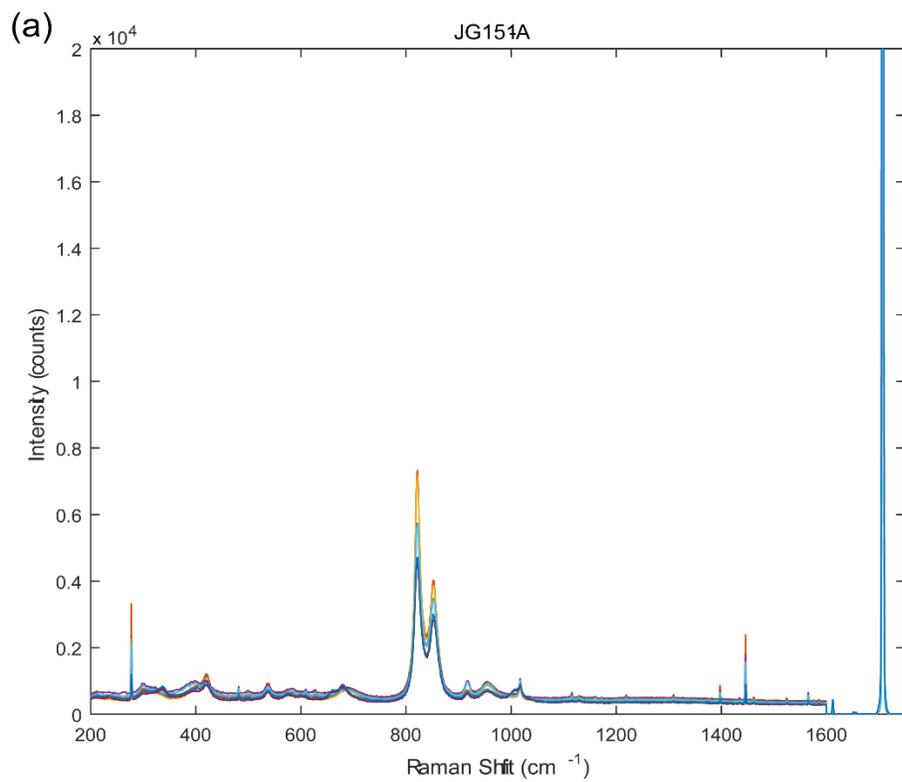


Figura 37. Espectros Raman para la muestra JG151. (a) Cóndrulo A y (b) Cóndrulo C.

## A.2. Muestras de composición conocida

Las muestras de composición conocida corresponden a 11 cristales de olivino terrestres, que cubren un rango de composiciones de fayalita de  $8.1 \pm 0.2$  –  $22.7 \pm 0.5$  (Figuras 38-41).

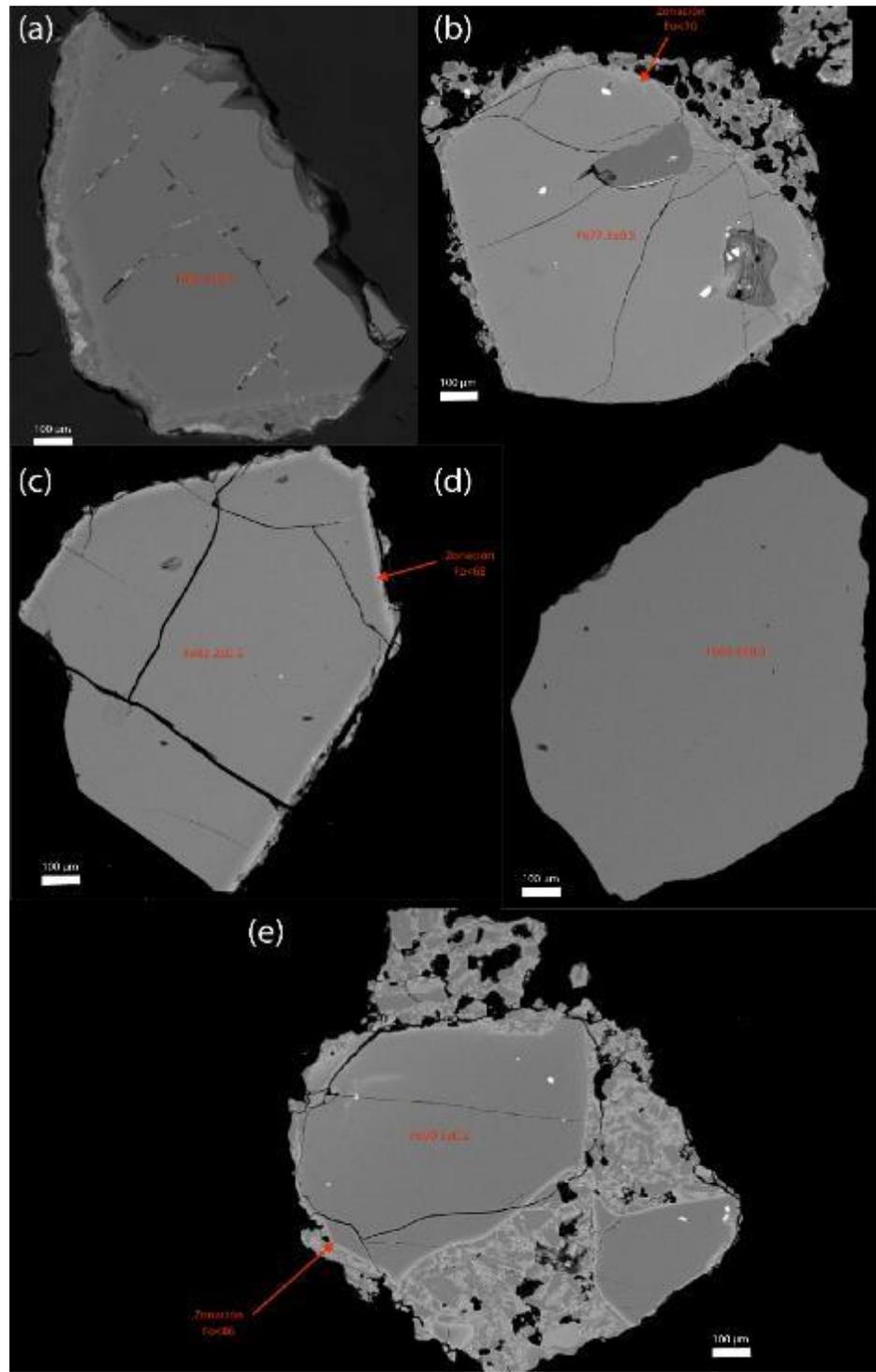


Figura 38. Cristales de olivino de composición conocida. (a) Ol-1, Fa $17.7 \pm 0.1$ , (b) Ol-3, Fa $22.7 \pm 0.5$ , (c) Ol-5, Fa $18.8 \pm 0.2$ , (d) Ol-9, Fa $8.1 \pm 0.2$ , (e) Ol-11, Fa $9.7 \pm 0.2$ .

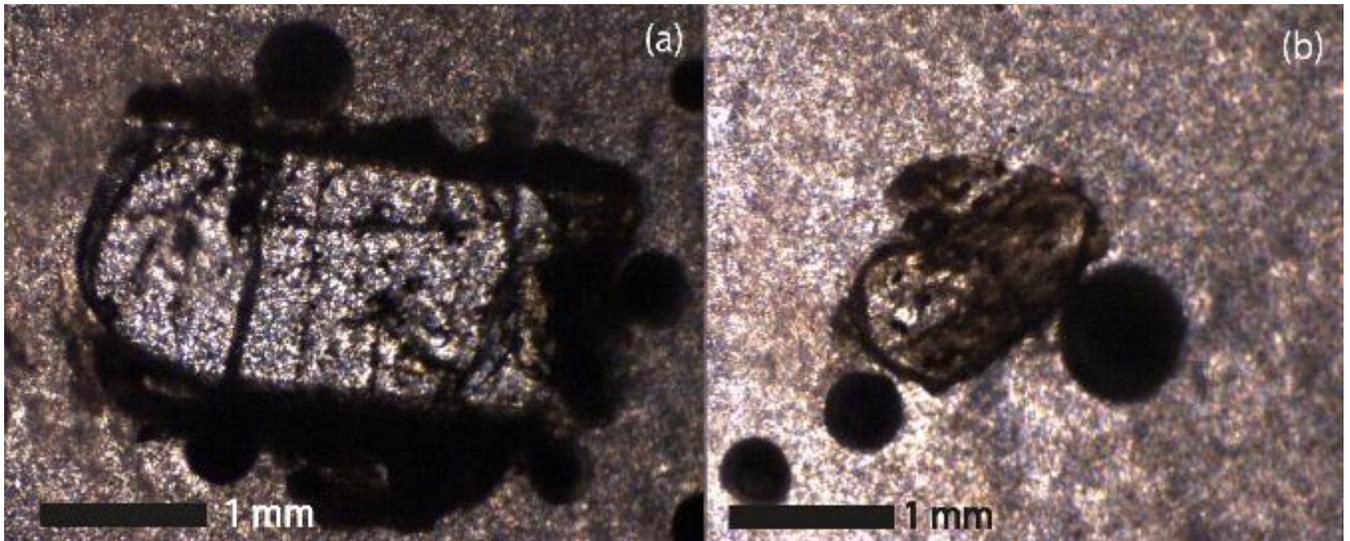


Figura 39. Cristales de olivino (a) MV83, composición  $Fa_{17\pm 0.1}$ , y (c) MV84, composición  $Fa_{16\pm 0.2}$ .

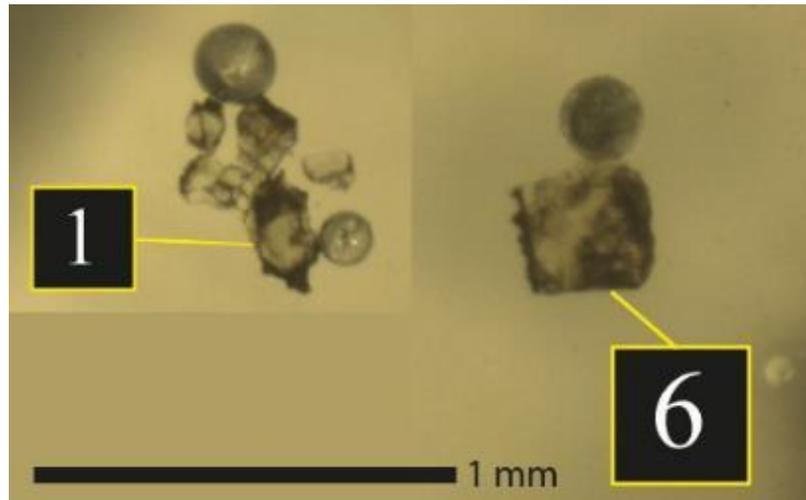


Figura 40. Cristales de olivino 1 ( $Fa_{21.75\pm 0.3}$ ) y 6 ( $Fa_{21.53\pm 0.2}$ ) de la muestra Os-164 1 mm.

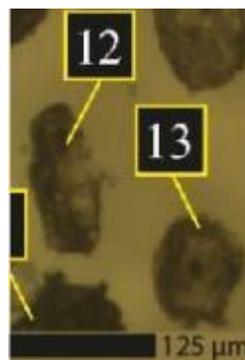


Figura 41. Cristales de olivino 12 ( $Fa_{21.78\pm 0.2}$ ) y 13 ( $Fa_{21.41\pm 0.3}$ ) de la muestra Os-164 0.5 mm.

Los espectros Raman obtenidos para cada uno de estos cristales se muestran en las figuras 42 y 43.

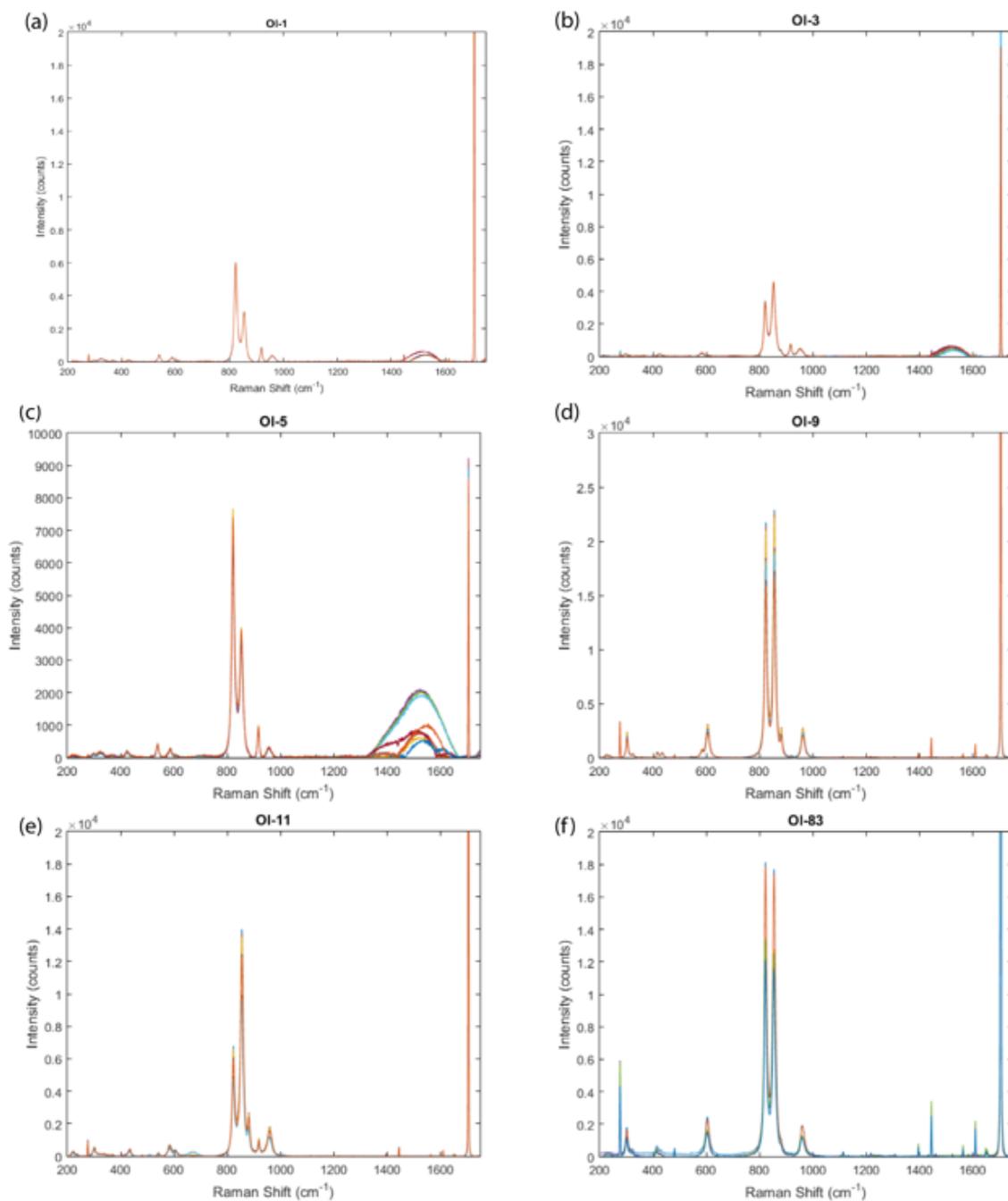


Figura 42. Espectros Raman obtenidos para muestras de cristales de olivino de composiciones conocidas, obtenidas por EMPA. (a) Olivino 1, composición  $\text{Fa}17.7 \pm 0.1$ . (b) Olivino 3, composición  $\text{Fa}22.7 \pm 0.5$ , (c) Olivino 5, composición  $\text{Fa}18.8 \pm 0.2$ , (d) Olivino 9, composición  $\text{Fa}8.1 \pm 0.2$ , (e) Olivino 11, composición  $\text{Fa}9.7 \pm 0.2$  y (f) Olivino 83, composición  $\text{Fa}17 \pm 0.1$ .

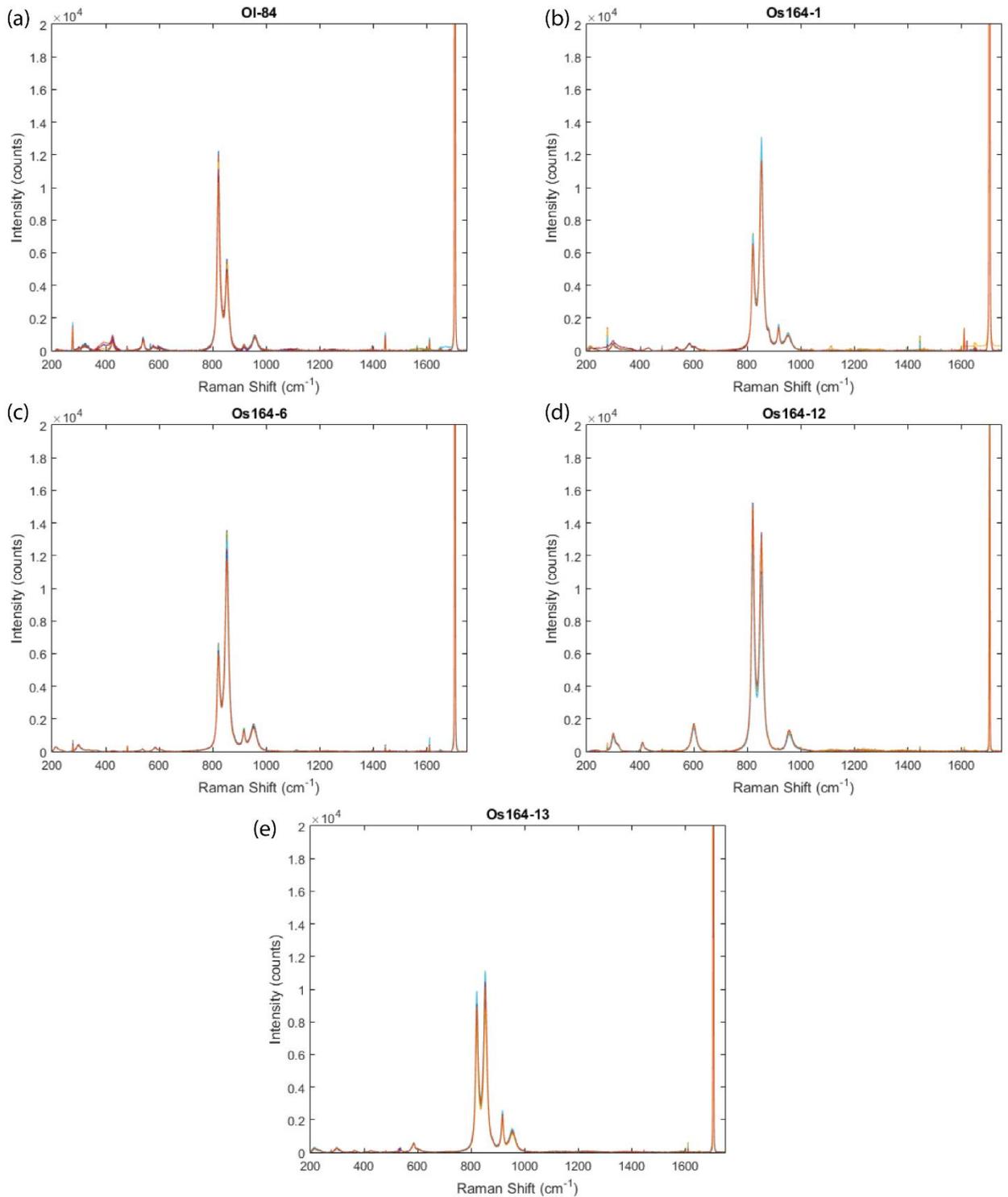


Figura 43. Espectros Raman obtenidos para muestras de cristales de olivino de composiciones conocidas, obtenidas por EMPA. (a) Olivino 84, composición  $\text{Fa}16 \pm 0.2$ , (b) Olivino Os164-1, composición  $\text{Fa}21.75 \pm 0.3$ , (c) Olivino Os164-6, composición  $\text{Fa}21.53 \pm 0.2$ , (d) Olivino Os164-12, composición  $\text{Fa}21.78 \pm 0.2$ , (e) Olivino Os164-13, composición  $\text{Fa}21.41 \pm 0.3$ .

## B. Calibraciones

### B.1. Dependencia de razón de intensidades con respecto a la orientación del cristal

Tabla 15. Razón de intensidades obtenidas para las bandas A y B representativas del olivino, y su variación con respecto a la orientación de la muestra medida en intervalos de 15°.

Ángulo (°)	I <sub>A</sub>	I <sub>B</sub>	I <sub>A</sub> /I <sub>B</sub>
0	745.49	640.99	1.16
15	678.04	600.45	1.13
30	482.54	434.80	1.11
45	349.30	311.14	1.12
60	404.69	354.94	1.14
75	621.38	535.87	1.16
90	751.13	664.48	1.13

### B.2. Tiempo de adquisición

Tabla 16. Intensidades I<sub>A</sub> e I<sub>B</sub> para bandas A y B característicos del olivino, para los puntos P1, P2 y P3 de la muestra Os164-12, de acuerdo a los tiempos de adquisición en un rango de 5 a 60 segundos.

Tiempo (s)	Punto 1			Punto 2			Punto 3		
	I <sub>A</sub>	I <sub>B</sub>	I <sub>A</sub> /I <sub>B</sub>	I <sub>A</sub>	I <sub>B</sub>	I <sub>A</sub> /I <sub>B</sub>	I <sub>A</sub>	I <sub>B</sub>	I <sub>A</sub> /I <sub>B</sub>
5	1483.76	1284.49	1.16	1367.78	1204.37	1.14	1185.86	1044.16	1.14
5	1427.84	1240.10	1.15	1377.37	1210.57	1.14	1207.04	1062.13	1.14
5	1403.18	1235.78	1.14	1372.50	1212.26	1.13	1228.96	1098.31	1.12
10	2609.58	2290.83	1.14	2732.54	2402.13	1.14	2514.81	2208.56	1.14
10	2637.58	2305.60	1.14	2708.77	2384.15	1.14	2566.21	2247.89	1.14
10	2617.73	2299.44	1.14	2677.30	2358.07	1.14	2593.22	2256.80	1.15
20	5181.50	4527.06	1.14	5112.44	4493.49	1.14	5230.28	4597.79	1.14
20	5161.82	4514.19	1.14	5072.19	4444.70	1.14	5307.17	4654.32	1.14
20	5115.62	4477.16	1.14	5027.95	4419.97	1.14	5352.91	4697.78	1.14
30	7507.75	6565.99	1.14	8332.27	7337.46	1.14	8692.84	7689.42	1.13
30	7587.68	6656.46	1.14	8316.48	7291.58	1.14	8853.61	7769.70	1.14
30	7673.31	6725.50	1.14	8296.30	7270.90	1.14	8909.52	7798.87	1.14
40	11417.00	10045.06	1.14	10048.33	8820.54	1.14	11868.53	10424.11	1.14
40	11232.95	9852.96	1.14	9924.87	8733.06	1.14	11844.08	10448.39	1.13
40	11098.40	9739.34	1.14	9816.34	8602.53	1.14	11821.57	10384.20	1.14
50	13732.97	12058.47	1.14	12154.72	10673.59	1.14	14694.48	12933.90	1.14
50	13516.29	11878.96	1.14	12021.94	10568.20	1.14	14568.60	12814.81	1.14
50	13379.74	11731.71	1.14	11882.80	10457.31	1.14	14387.26	12672.83	1.14
60	15780.30	13854.37	1.14	21255.70	18645.72	1.14	17082.86	15051.93	1.13
60	15523.74	13637.17	1.14	21277.48	18706.86	1.14	16840.95	14842.96	1.13
60	15292.19	13446.32	1.14	21143.31	18603.20	1.14	16581.41	14599.72	1.14
<b>Promedio</b>	1.14	<b>Desv. Est.</b>	4.72·10 <sup>-3</sup>						

Tabla 17. Distribución normal calculada de acuerdo a los resultados mostrados en la tabla 16.

<b>Tiempo (s)</b>	<b>Distribución Normal</b>		
	<b>Punto 1</b>	<b>Punto 2</b>	<b>Punto 3</b>
5	0.18	69.76	70.00
5	2.15	83.30	76.04
5	67.69	33.44	0.01
10	84.04	82.47	84.57
10	44.14	73.89	69.10
10	84.51	66.89	7.23
20	38.14	83.17	82.53
20	49.78	72.93	79.51
20	59.09	82.49	83.23
30	50.17	68.82	19.25
30	81.48	77.65	83.07
30	74.95	74.16	61.11
40	77.10	83.92	84.57
40	80.68	76.32	47.90
40	82.93	73.57	84.51
50	84.45	84.53	73.60
50	83.45	82.50	78.94
50	78.20	75.15	65.97
60	84.27	81.09	62.38
60	84.44	81.92	59.03
60	81.27	76.83	70.25

### B.3. Cálculo de ajuste lineal

El cálculo del ajuste lineal se realizó a partir de las ecuaciones (1), (2) y (3), de acuerdo con los valores obtenidos de longitud de onda para las bandas de olivino y neón de las muestras de cristales de olivino terrestres, utilizando los valores  $277.67 \text{ cm}^{-1}$  y  $1709.18 \text{ cm}^{-1}$  como referencia para las bandas de neón. Los resultados para cada una de estas muestras se encuentran en la tabla 18.

Tabla 18. Resultados de calibración calculada a partir de las ecuaciones definidas por Bakker (2021) para las muestras de composición conocida.

Muestra	Calibración	Promedio	Composición Fa (% mol.)	Muestra	Calibración	Promedio	Composición Fa (% mol.)
<b>Ol-1</b>	31.25	31.01	17.7±0.1	<b>Ol-3</b>	30.86	30.85	22.7±0.5
	31.64				30.85		
	31.43				30.82		
	31.04				30.87		
	31.11				30.86		
	30.94				30.85		
	30.37				30.89		
	30.52				30.87		
	30.82				30.77		
<b>Ol-5</b>	30.68	30.83	18.8±0.2	<b>Ol-9</b>	32.04	32.07	8.1±0.2
	30.66				32.17		
	30.64				32.07		
	31.09				32.05		
	31.18				32.05		
	31.15				32.18		
	30.67				32.03		
	30.70				32.04		
	30.73				32.04		
<b>Ol-11</b>	32.05	32.00	9.7±0.2	<b>Ol-83</b>	32.00	31.95	17±0.1
	32.02				32.00		
	32.02				32.00		
	31.95				31.84		
	31.91				31.87		
	31.92				31.87		
	32.03				31.96		
	32.07				31.99		
	32.07				31.99		
<b>Ol-84</b>	31.58	31.65	16±0.2	<b>Os164-1</b>	31.22	31.27	21.75±0.3
	32.16				31.23		
	31.95				31.25		
	31.57				31.21		
	31.53				31.22		
	31.53				31.24		
	31.47				31.46		
	31.55				31.36		
	31.52				31.25		

<b>Os164-6</b>	31.27	31.42	21.53±0.2	<b>Os164-12</b>	31.63	31.61	21.78±0.2
	31.24				31.66		
	32.65				31.63		
	31.69				31.59		
	31.37				31.62		
	31.36				31.58		
	31.11				31.58		
	31.06				31.59		
	31.07				31.59		
	<b>Os164-13</b>				31.08		
31.08							
31.08							
31.06							
31.01							
30.99							
31.04							
31.04							
31.05							

### C. Cálculo de composición de Fa para cada cóndrulo

El cálculo de porcentaje molar de fayalita para cada cóndrulo se realizó de acuerdo a la ecuación (8) presentada en la sección 4.3 del capítulo de Resultados. Para clasificar las muestras en cada grupo químico respectivo se utilizaron los rangos establecidos por Van Schmus & Wood (1967), mostrados en la tabla 5 de la sección 3.3. El resultado final para cada muestra se obtuvo de acuerdo al promedio para cada calibración. Las siguientes tablas (19-24) muestran el detalle de estos resultados para cada condrito respectivo.

#### MV023

Tabla 19. Resultados de composición de Fayalita para los cóndrulos de la muestra MV023

Muestra	Calibración (cm <sup>-1</sup> )	Contenido de Fa (%mol.) calculado	Grupo Químico	Referencia (Amengual, 2019)
<b>MV023 A</b>	31.62	16.37	H	H
	31.59	16.58	H	
	31.61	16.49	H	
	31.56	16.81	H	
	31.54	16.97	H	
	31.54	16.96	H	
	31.52	17.14	H	
	31.58	16.68	H	
	31.53	17.04	H	
<b>MV023 B</b>	31.59	16.60	H	H
	31.50	17.31	H	
	31.50	17.34	H	
	31.58	16.65	H	
	31.56	16.82	H	
	31.50	17.31	H	
	31.56	16.87	H	
	31.61	16.43	H	
31.62	16.37	H		
<b>Promedio</b>	31.56	16.82	H	
<b>Desviación Estándar</b>	0.04			

MV025

Tabla 20. Resultados de composición de Fayalita para los cóndrulos de la muestra MV025.

<b>Muestra</b>	<b>Calibración (cm<sup>-1</sup>)</b>	<b>Contenido de Fa (%mol.) calculado</b>	<b>Grupo Químico</b>	<b>Referencia (Amengual, 2019; Luna, 2022)</b>
<b>MV025 D</b>	31.34	18.56	H	H
	31.35	18.48	H	
	31.26	19.13	H	
	31.38	18.22	H	
	31.47	17.52	H	
	31.42	17.94	H	
	31.18	19.81	H	
	31.16	19.92	H	
	31.10	20.43	H	
<b>MV025 E</b>	31.18	19.75	H	H
	31.16	19.91	H	
	31.17	19.86	H	
	31.28	18.99	H	
	31.30	18.87	H	
	31.18	19.75	H	
	31.42	17.91	H	
	31.40	18.05	H	
	31.38	18.22	H	
<b>Promedio</b>	31.29	18.96	H	
<b>Desviación Estándar</b>	0.11			

DM053-A1

Tabla 21. Resultados de composición de Fayalita para los cóndrulos de la muestra DM053-A1

<b>Muestra</b>	<b>Calibración (cm<sup>-1</sup>)</b>	<b>Contenido de Fa (%mol.) calculado</b>	<b>Grupo Químico</b>	<b>Referencia (Amengual, 2019)</b>
<b>DM053A1 C</b>	31.43	17.82	H	H
	31.49	17.40	H	
	31.42	17.92	H	
	31.39	18.13	H	
	31.30	18.85	H	
	31.31	18.79	H	
	31.39	18.16	H	
	31.43	17.82	H	
	31.40	18.06	H	
<b>DM053A1 D</b>	31.14	20.12	H	H
	31.33	18.65	H	
	31.21	19.58	H	
	31.73	15.52	H	
	31.49	17.38	H	
	31.53	17.09	H	
	31.26	19.14	H	
	31.52	17.18	H	
	31.27	19.12	H	
<b>Promedio</b>	31.39	18.15	H	
<b>Desviación Estándar</b>	0.13			

DM055-A2

Tabla 22. Resultados de composición de Fayalita para los cóndrulos de la muestra MV023

<b>Muestra</b>	<b>Calibración (cm<sup>-1</sup>)</b>	<b>Contenido de Fa (%mol.) calculado</b>	<b>Grupo Químico</b>	<b>Referencia (Amengual, 2019)</b>
<b>DM055A2 A</b>	31.57	16.77	H	H
	31.52	17.17	H	
	31.60	16.55	H	
	31.25	19.26	H	
	31.61	16.46	H	
	31.65	16.13	H	
	31.42	17.92	H	
	31.38	18.25	H	
	31.45	17.68	H	
<b>DM055A2 B</b>	31.63	16.33	H	H
	31.63	16.30	H	
	31.63	16.27	H	
	31.74	15.49	H	
	31.62	16.39	H	
	31.44	17.74	H	
	31.40	18.05	H	
	31.55	16.95	H	
31.57	16.80	H		
<b>Promedio</b>	31.54	17.03	H	
<b>Desviación Estándar</b>	0.12			

JG124

Tabla 23. Resultados de composición de Fayalita para los cóndrulos de la muestra JG124

<b>Muestra</b>	<b>Calibración (cm<sup>-1</sup>)</b>	<b>Contenido de Fa (%mol.) calculado</b>	<b>Grupo Químico</b>	<b>Referencia (Amengual, 2019; Luna, 2022)</b>
<b>JG124 C</b>	31.73	15.50	H	H
	31.70	15.78	H	
	31.48	17.46	H	
	31.67	15.97	H	
	31.72	15.62	H	
	31.69	15.85	H	
	31.49	17.37	H	
	31.56	16.83	H	
	31.68	15.95	H	
<b>JG124 J</b>	31.23	19.39	H	H
	31.70	15.76	H	
	31.23	19.38	H	
	31.23	19.37	H	
	31.70	15.75	H	
	31.71	15.71	H	
	31.70	15.76	H	
	31.69	15.83	H	
31.70	15.80	H		
<b>Promedio</b>	31.59	16.61	H	
<b>Desviación Estándar</b>	0.18			

JG151

Tabla 24. Resultados de composición de Fayalita para los cóndrulos de la muestra JG151

<b>Muestra</b>	<b>Calibración (cm<sup>-1</sup>)</b>	<b>Contenido de Fa (%mol.) calculado</b>	<b>Grupo Químico</b>	<b>Referencia (Amengual, 2019)</b>
<b>JG151 A</b>	30.76	23.00	L	L
	30.62	24.13	L	
	30.89	22.04	L	
	30.76	23.04	L	
	30.56	24.58	L	
	30.76	23.04	L	
	30.73	23.22	L	
	31.15	20.03	L	
	31.12	20.24	L	
<b>JG151 C</b>	30.72	23.36	L	L
	30.73	23.28	L	
	31.04	20.88	L	
	31.06	20.70	L	
	30.80	22.72	L	
	30.78	22.89	L	
	31.09	20.44	L	
	31.09	20.46	L	
	31.00	21.18	L	
<b>Promedio</b>	30.87	22.18		
<b>Desviación Estándar</b>	0.18			