



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**"Caracterización morfológica y mineralógica de
condros barrados de olivino presentes en la condrita
Allende "**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

P R E S E N T A:

MIGUEL ÁNGEL MONTOYA PÉREZ



**DIRECTORA DE TESIS:
DRA. KARINA ELIZABETH
CERVANTES DE LA CRUZ
2016**

Ciudad Universitaria, Cd.Mx.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

HOJA DE DATOS

1. Datos del alumno

Montoya

Pérez

Miguel Ángel

26 13 11 83

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ciencias

Ciencias de la Tierra

309284002

2. Propietaria tutora

Dra.

Karina Elizabeth

Cervantes

de la Cruz

3. Propietario

Dr.

José Luis

Ruvalcaba

Sil

4. Propietaria

Dra.

María Guadalupe

Cordero

Tercero

5. Suplente

Dra.

Gloria Inmaculada

Delgado

Inglada

6. Suplente

Dra.

María

Colín

García

7. Datos del trabajo escrito

Caracterización morfológica y mineralógica de condros barrados de olivino presentes en la condrita Allende

p.74

2016

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, gracias por todo su amor y por el universo de posibilidades que con él crearon.

A mis hermanas, el mejor equipo de mi vida. Gracias por quererme tanto y estar siempre conmigo, por ser mis maestras y amigas.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, a la Facultad de Ciencias y a todos los profesores que han contribuido en mi formación académica.

A Kari, gracias por permitirme el honor de trabajar contigo, por enseñarme a ver el espacio desde una roca, por todo el tiempo y esfuerzo que dedicaste a este trabajo y sobre todo, por tu amistad.

Al Dr. José Luis, gracias por tu valiosa enseñanza sobre espectroscopía y por el apoyo con las técnicas de análisis empleadas para realizar este trabajo.

A Antígona, gracias por ser tan chida, por adoptarme en mi camino como espacial, por la oportunidad de trabajar contigo y la confianza que me has dado.

A mis sinodales: Lupita Cordero, María Colín y Gloria Delgado, por sus tan acertadas contribuciones a este trabajo.

A Jaqueline Cañetas por el apoyo en el microscopio electrónico de barrido del Laboratorio Central de Microscopia del Instituto de Física. A Cristina Zorrilla por tu apoyo con el equipo microRaman del Laboratorio de Materiales Avanzados del Instituto de Física. A Valentina Aguilar por enseñarme a entender a SANDRA. A Carlos Linares López por tu apoyo con los análisis de los condros en la Microsonda del instituto de Geofísica. A Rufino Lozano Santa Cruz del Laboratorio de Fluorescencia de rayos X del Instituto de Geología por los análisis de olivino. A Fermi por apoyarme en el trabajo realizado en el laboratorio de microscopios “Francisco J. Fabregat” del Instituto de Geología.

A Yahel Sm-Nd, gracias por todos los momentos compartidos, por todo tu apoyo, por estudiar y fiestar conmigo. Por permitirme formar parte de tu vida, así como tú formas parte de la mía.

Gracias al Dr. Avilix por regalarnos una visión 3D del proceso de formación de condros. A todos mis amigos, gracias. Al Dr. Vallejo por su guía y apoyo durante esta etapa de mi vida. A mis hermanitas académicas, por los consejos acertados y los congresos compartidos. Gracias a mis compañeritos espaciales por compartir el aula y a mis profesores, que además son mis amigos. Gracias a mis amigas de la revista Ciencias: Laura y Elisa T, por recibirme de una manera tan linda y porque disfruté y aprendí tanto con ustedes.

Gracias a Santi y Brunito por revivir la mejor etapa de mi vida.

ÍNDICE GENERAL

Resumen	8
Introducción	10
Objetivos	11
Justificación	12

CAPÍTULO I

Marco teórico	13
1.1 Formación de agregados sólidos en el disco protoplanetario	13
1.2 Distribución composicional de asteroides	14
1.3 Clasificación petrogenética de meteoritas	17
1.4 ICAs y Condros: Los principales componentes de las condritas	20
1.5 Relación de condritas y asteroides, sus posibles cuerpos parentales	20
1.6 Clasificación de condros	21
1.6.1 Porfídicos (PO, PP, POP)	22
1.6.2 Condros barrados de olivino (BO)	22
1.7 Meteorita Allende	22
1.8 Técnicas de espectroscopía para el análisis de meteoritas	25
1.8.1 Efecto Raman	25
1.8.1.1 Espectroscopía Raman	26
1.8.2 Rayos X	28
1.8.2.1 Generación de rayos X	28
1.8.2.2 Fluorescencia de rayos X	28

1.8.2.3 Rayos X característicos -----	29
1.8.2.4 Técnicas de fluorescencia de rayos X (FRX) -----	30
1.8.3 Microscopía electrónica de barrido (MEB) -----	31
1.8.3.1 Espectroscopía de dispersión de energía -----	32
1.8.4 Microsonda electrónica de barrido (EMPA) -----	33

CAPÍTULO II

Procedimiento experimental -----	35
2.1 Petrografía -----	36
2.2 Mineralogía -----	37
2.2.1 Microscopía electrónica de barrido (MEB) -----	37
2.2.2 Espectroscopía microRaman -----	38
2.2.3 Fluorescencia de rayos X -----	38
2.2.4 Microsonda electrónica de barrido (EMPA) -----	39

CAPÍTULO III

Resultados -----	40
3.1 Caracterización de condros -----	40
3.1.1 Caracterización morfológica -----	40
3.1.2 Caracterización mineralógica -----	46
3.1.2.1 Resultados de análisis químico por EDS -----	47
3.1.2.2 Resultados de análisis microRaman -----	49
3.1.3 Análisis de condro total por medio de FRX -----	53

3.1.3.1 Cálculo de la composición del condro total como estándar -----	53
3.1.3.2 Composición de los condros con los resultados de SANDRA -----	55
3.2 Identificación rápida de meteoritas -----	61
 CAPÍTULO IV	
Discusión de resultados y conclusiones -----	63
4.1 Discusión -----	63
4.1.1 Caracterización morfológica -----	63
4.1.2 Caracterización mineralógica -----	64
4.1.3 Análisis de condro total -----	64
4.1.4 Identificación de meteoritas -----	65
4.2 Conclusiones -----	66
 REFERENCIAS -----	 68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
Tabla 1. Tipos de crecimiento en barras de olivino y los intervalos de ancho -----	44
Tabla 2. Análisis de la composición química de los olivinos y piroxenos obtenidos en MEB --	48
Tabla 3. Contenido de Fo y Fa en olivinos y frecuencias características -----	51
Tabla 4. Concentraciones de óxidos en el estándar -----	55
Tabla 5. Concentraciones elementales en condro total -----	57
Tabla 6. Concentraciones de FeNi, FeS y FeO en condro total -----	59
Tabla 7. Número de magnesio de condro total -----	60
Tabla 8. Intensidades de Fe y Ni de meteoritas -----	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 1. Distribución composicional de asteroides en el cinturón principal -----	17
Figura 2. Clasificación petrogenética de meteoritas -----	19
Figura 3. Condro barrado de olivino de la meteorita Allende -----	24
Figura 4. Diagrama de niveles de energía -----	26
Figura 5. Regiones de los modos vibracionales -----	27
Figura 6. Formación del espectro de fluorescencia de rayos X -----	29
Figura 7. Diagrama de la metodología seguida -----	35
Figura 8. Fotografías panorámicas de las láminas delgadas -----	36
Figura 9. Mapas de las secciones delgadas de la condrita Allende -----	41
Figura 10. Condro barrado de olivino en distintas luces -----	40
Figura 11. Ejemplos del crecimiento de las barras de cada grupo -----	43
Figura 12. Histograma de frecuencias del ancho de las barras de olivino en los condros --	45
Figura 13. Imagen con electrones retrodispersados de un condro -----	46
Figura 14. Rangos de composición de Ca-Mg-Fe para los minerales analizados -----	47
Figura 15. Zonas de análisis en microRaman -----	49
Figura 16. Espectros obtenidos con microRaman -----	50
Figura 17. Masa ($1/\sqrt{M}$) y frecuencias de los modos vibracionales -----	52
Figura 18. Relaciones Fe/Ni para meteoritas y pseudo meteoritas -----	62

RESUMEN

Desde su descubrimiento, los asteroides han sido vistos como restos de la formación planetaria (DeMeo y Carry, 2014), es por esto que los procesos que formaron al sistema solar están registrados en ellos, de igual modo que podemos leer la historia de la Tierra a partir del registro geológico.

Las condritas se clasifican de acuerdo a su constitución química y a la caracterización petrológica de sus componentes (Van Schmus y Wood, 1967). Los condros son los componentes que caracterizan a las condritas. En particular, los condros barrados de olivino están formados por cristales dendríticos de olivino que forman una textura en enrejado. El trabajo experimental de Cervantes de la Cruz (2009) sugiere que el ancho de las barras de los fundidos tipo condros BO depende de la fusión total o parcial del material precursor y que esto es directamente proporcional a la cantidad de energía bajo la cual se formaron.

El objetivo de este trabajo es caracterizar los condros barrados de olivino de la condrita Allende a partir del estudio morfológico del ancho de sus barras y su composición mineralógica. Los resultados obtenidos muestran que el ancho de las barras presenta un rango de valores entre los $5 \mu m$ y $10 \mu m$; mientras que los análisis químicos y mineralógicos, partiendo de los resultados de SEM y microRaman, indican que las barras de los condros están compuestas por olivino rico en magnesio.

En este trabajo también se presenta la implementación del método de análisis de condro total a partir del análisis por fluorescencia de rayos X (XRF) con el equipo portátil SANDRA en el Laboratorio Nacional de Ciencias para la Investigación y la Conservación del Patrimonio Cultural (LANCIC-IF). Este método permite una clasificación preliminar de meteoritas metálicas a partir del contenido de Fe y Ni presentes.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo comienza por una breve descripción de los procesos de evolución de los cuerpos sólidos en el sistema solar durante la acreción del disco de polvo y gas, su distribución actual reflejada en los asteroides del cinturón principal resultado de la acreción del material en el disco y la migración de los gigantes gaseosos. También se presenta un esquema actual de la clasificación petrogenética de meteoritas, la caracterización de las condritas y los tipos de condros que pueden encontrarse.

Posteriormente, se describen los fundamentos físicos de las diferentes técnicas de análisis empleadas en este trabajo y se mencionan algunos de los campos en los que han sido utilizadas con éxito. Con esas técnicas fue posible estudiar a las muestras de la meteorita Allende y otras meteoritas sin causarles ningún daño. Tomando en cuenta la valiosa información que contienen las meteoritas y la dificultad de obtener muestras de ellas este trabajo aporta una forma adecuada para el estudio de este tipo de materiales.

Los resultados se encuentran divididos en dos secciones. Primero se muestra la caracterización de los condros barrados de olivino presentes en la meteorita Allende y la eficiencia del análisis de condro total a partir del estudio de cuatro secciones delgadas con el equipo de fluorescencia de rayos X (FRX) SANDRA. En la segunda sección se muestran los resultados de implementar el método de FRX *in situ* en diferentes meteoritas para su rápida identificación y con ello evaluar la colección a la que pertenecen.

OBJETIVOS

Objetivo general

Caracterizar morfológica y mineralógicamente los condros barrados de olivino presentes en la meteorita Allende.

Objetivos particulares

- Utilizar métodos no destructivos de microscopía óptica para lograr la caracterización morfológica de los condros.
- Generar un estándar que permita obtener la composición química total de los condros barrados de olivino.
- Desarrollar la metodología que permita obtener un análisis de la composición química total de un condro utilizando el equipo de rayos X SANDRA.
- Implementar el análisis FRX *in situ* en diferentes meteoritas para su rápida identificación y con ello evaluar la colección a la que pertenecen.

JUSTIFICACIÓN

Las meteoritas contienen el registro de la formación del sistema solar que no se encuentra presente en ninguna roca terrestre. En contraste con la gran importancia que representan, el material con el que contamos es muy escaso. Por esa razón es necesario implementar técnicas de análisis no destructivas para su estudio.

El Laboratorio Nacional de Ciencias para la Investigación y la Conservación del Patrimonio Cultural sede Instituto de Física, UNAM, desarrolla la tecnología y la metodología necesarias para el uso de este tipo de técnicas.

HIPÓTESIS

Los experimentos de fundidos de olivino tipo condros barrados de olivino (BO) realizados por Cervantes de la Cruz (2009) proponen que existe una relación entre la energía requerida para fundir el material y el ancho de las barras de olivino, sin embargo, es necesario comprobar si esta hipótesis es cierta por medio de la medición del ancho de barra de condros BO de meteoritas condriticas. Con la caracterización de los condros barrados de olivino en la meteorita Allende contaremos con un marco de referencia para comparar las características que se buscan recrear en los experimentos de fundidos tipo condros.

CAPÍTULO I

Marco teórico

En este capítulo se presenta una explicación de la formación de los primeros sólidos en el sistema solar para tener un contexto de la formación de los condros. También se aborda la distribución composicional de los asteroides en el cinturón principal y la clasificación de las meteoritas para mostrar la relación que existe entre los cuerpos no diferenciados y las meteoritas condritas. Posteriormente, se hace una descripción de los tipos de condros donde se incluyen los condros barrados de olivino, los cuales representan el objeto de estudio de este trabajo. Finalmente, se explica el funcionamiento de las técnicas de análisis que se utilizaron y la importancia de su implementación como técnicas de análisis no destructivas.

1.1 Formación de agregados sólidos en el disco protoplanetario

Las observaciones astronómicas de los objetos estelares jóvenes (“Young stellar objects”=YSOs) unido a los modelos de formación del sistema solar y los estudios en laboratorio de meteoritas y material proveniente de núcleos cometarios, nos ayudan a comprender la manera en la que se formó el Sol y el sistema solar (Dauphas y Chaussidon, 2011).

De acuerdo al modelo de Goldreich y Ward (1973) el sistema solar nació a partir de una nube molecular compuesta de gas y polvo. Una zona de la nube molecular se colapsó y como resultado de la conservación del momento angular se formó un disco protoplanetario. El material acumulado en el centro del disco originó una protoestrella. En el plano medio del disco, a partir de las partículas de polvo preexistentes en la nube molecular, se formaron agregados que iban de las 0.1 a 10 μm . Es en este periodo cuando se formaron las inclusiones de calcio y aluminio

(ICA). Estos fueron los primeros sólidos y por ser un material refractario se sabe que se formaron en menos de cien mil años (Wood, 2004). Un poco después se comenzaron a formar los condros, en los primeros 3 millones de años, a partir de agregados de cristales presentes en el disco (Connelly *et al.*, 2012). Cuando estos agregados sólidos alcanzaron tamaños dentro del intervalo de 10 y 100 cm experimentaron un proceso de frenado debido a que el gas del disco giraba más lento que los sólidos. De esta forma, las partículas encontraban un viento de frente que las hacía desacelerarse y caer hacia la estrella en periodos de tiempo cortos. Por esa razón, estos sólidos debieron aumentar rápidamente de tamaño, pues de otra manera se hubieran destruido. Uno de los mecanismos de crecimiento propuestos es la inestabilidad gravitacional de un disco turbulento en la que los cuerpos crecerían rápidamente hasta alcanzar varios kilómetros de diámetro. A estos cuerpos se les conoce como planetésimos (Dauphas y Chaussidon, 2011).

Los procesos termodinámicos relacionados con el crecimiento de los planetésimos que son descritos por Herndon y Herndon (1977) muestran que en función del material del que se forman, los planetésimos pueden sufrir un proceso de diferenciación durante el que se separan los minerales metálicos de los silicatos. Los experimentos realizados por Tieloff *et al.*, (2003) ayudaron a estimar que un cuerpo con un diámetro menor a 100 km puede permanecer indiferenciado. De estos cuerpos se derivan las meteoritas condriticas y después de su evolución, los cuerpos planetarios diferenciados.

1.2 Distribución composicional de asteroides

En un modelo "clásico" acerca de la formación del sistema solar se espera que los materiales volátiles sean evaporados cerca del Sol, por lo que en esta zona sólo se conservarían los

materiales refractarios. En zonas del disco protoplanetario más lejanas y, por lo tanto, más frías, se espera que los volátiles se condensen y se conserven.

Los primeros asteroides observados fueron los cuerpos más grandes, un ejemplo es Vesta que fue descubierto en 1807 por Olbers, H. W. en el estado de Bremen en Alemania (Hollis, 1987). De acuerdo a su análisis espectral estos objetos encajaban medianamente bien en el modelo clásico que propone que los materiales refractarios están cerca de la estrella y los volátiles en las zonas lejanas (Gradie y Tedesco, 1982). A partir de un trabajo realizado por Zellner y Tholen (1985), en el que se estudiaron cuerpos más pequeños, surgió la necesidad de proponer mecanismos que explicaran la forma en la que se distribuyen los asteroides en función de su composición, la cual resultó ser más heterogénea y aleatoria de lo que se esperaba. Por tal razón se modificaron las ideas de evolución del sistema solar que se tenían y se formuló un nuevo modelo en el cual el principal factor responsable de la configuración actual es la migración planetaria (Tsiganis *et al.*, 2005).

Un modelo de evolución planetaria debe explicar las características dinámicas (distancia al Sol, excentricidad e inclinación) y la composición de los cuerpos planetarios. El modelo de Niza (Tsiganis *et al.*, 2005) es un modelo en el que a través de simulaciones numéricas se puede estudiar la evolución dinámica temprana del sistema solar. En este modelo se explica la configuración actual de los planetas exteriores del sistema solar, Urano y Neptuno, sin embargo, no resuelve la mezcla masiva de compuestos a lo largo de todo el disco. A raíz de ello, se formuló el modelo de “Grand Tack” que permitió comprender las características del sistema solar interno. En el escenario del Grand Tack Júpiter migró hasta la posición actual de Marte removiendo el material presente en el disco a grandes escalas espaciales. Esta migración provocó un intercambio de materiales entre la zona interna y externa del disco protoplanetario (Walsh *et*

al., 2011). Después de que esto sucedió los planetas gigantes migraron hacia afuera, en particular Urano y Neptuno, como lo describe el modelo de Niza.

Como resultado de los procesos de migración planetaria se espera que el cinturón de asteroides contenga material proveniente de todo el disco. Por esta razón, el cinturón de asteroides contiene el registro de los procesos de formación tanto del disco protoplanetario como de los cuerpos planetarios (Demeo y Carry, 2014). Hoy en día contamos con una buena muestra de los cuerpos que conforman al cinturón principal de asteroides y los troyanos de Júpiter. Por métodos espectroscópicos es posible asociar a los asteroides de acuerdo a su composición, clasificándolos como tipo C= Carbonáceos tipo 253 Mathilde, B= Carbonáceos tipo 2 Pallas, D y P= Carbonáceos primitivos con nulo o muy bajo metamorfismo (Vilas y Smith, 1985), E = Tipo condrita enstatita, S= Tipo condrita ordinaria y M= Metálicos (McSween, 1999). De acuerdo a sus características espectrales la distribución muestra una concentración mayor de los asteroides clase S en la parte más interna del cinturón principal, los clase C en el centro y las clases P y D en la zona externa (Figura 1). En la Figura 1 se tomaron en cuenta los datos espectrales de asteroides con diámetros menores de 100 km los cuales se esperan que sean mayormente de tipo condrítico, ya que hay más probabilidades de que los cuerpos con diámetros mayores de 100 km estén diferenciados. Por lo cual, podemos deducir que los asteroides frecuentes alrededor de la Tierra son de los tipos S, E y C.

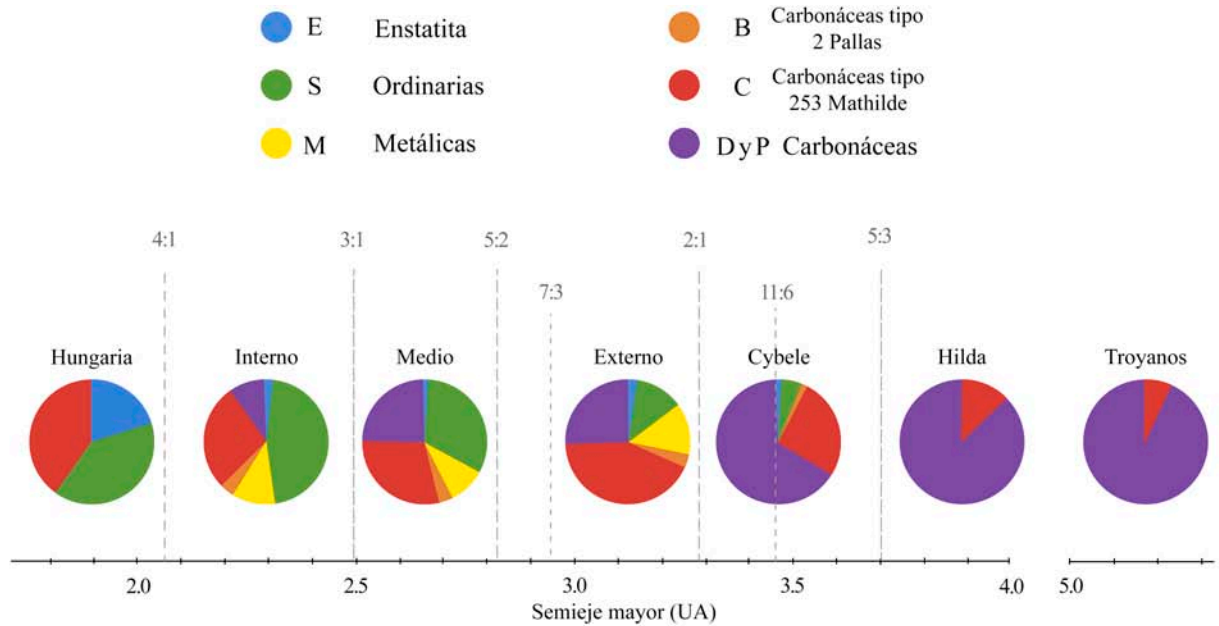


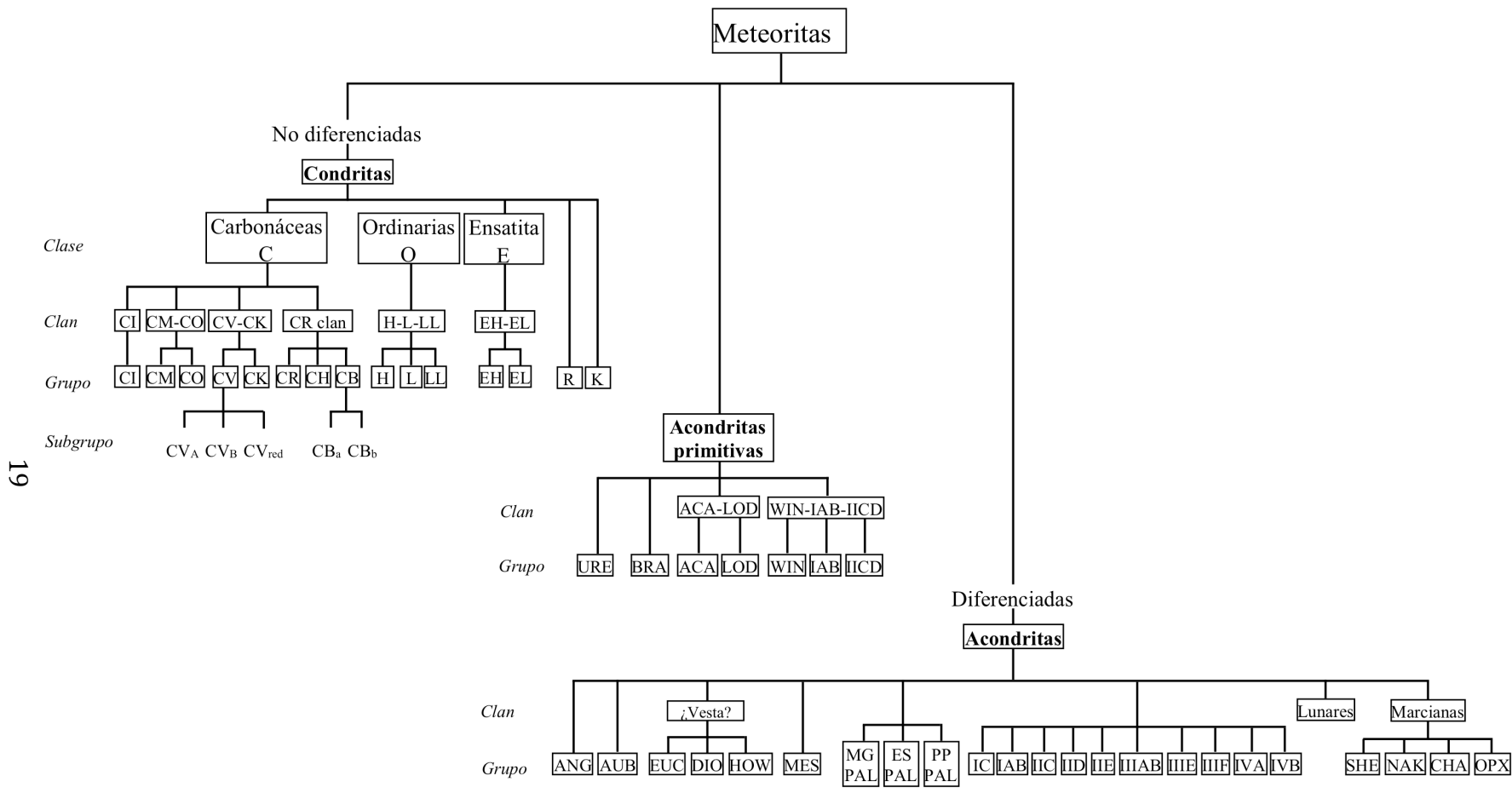
Figura 1. Distribución composicional de asteroides en el cinturón principal. Proporción y distribución de clases espectrales de asteroides con diámetro menores a 100 km en función de su distancia heliocéntrica (modificado de Demeo y Carry, 2014) y su relación con la clase de meteoritas (McSween, 1999).

1.3 Clasificación petrogenética de meteoritas

Toneladas de material proveniente del espacio llegan todos los días a la superficie del planeta, de ese material menos del 1% tiene un tamaño suficiente para ser recolectado y analizado en un laboratorio. Los fragmentos de roca que logran llegar a la superficie del planeta, incluyendo fragmentos pequeños de asteroides, de la Luna y de Marte son conocidos como meteoritas (Bischoff, 2001).

Una primera clasificación centrada en el contenido de metales, clasifica a las meteoritas en tres grandes grupos: pétreas, mixtas y metálicas. Si ahora se considera su origen y evolución puede hacerse una nueva clasificación en tres grupos: meteoritas no diferenciadas, diferenciadas y acondritas primitivas (Weisberg *et al.* 2006). En esa nueva clasificación (Figura 2) todas las

condritas (un grupo de meteoritas pétreas) están dentro de las meteoritas no diferenciadas. Las acondritas forman el grupo de las meteoritas diferenciadas, las cuales se forman como resultado de la fusión total o parcial de su cuerpo parental. Como ejemplo de acondritas están las meteoritas metálicas, las Lunares y Marcianas. Por último, están las acondritas primitivas, las cuales son un grupo de meteoritas que se encuentran diferenciadas pero que tienen una composición química muy similar a la de un cuerpo condritico no diferenciado.



19

Figura 2. Clasificación petrogenética de meteoritas. Modificado de Weisberg *et al.* 2006

1.4 ICAs y Condros: Los principales componentes de las condritas

Las condritas son rocas formadas por la mezcla de los materiales presentes en la nebulosa antes y después de la formación del Sol (Scott, 2007). Presentan dos componentes característicos: los condros y las Inclusiones de Calcio y Aluminio (ICAs). Los condros son estructuras esféricas de unos cuantos milímetros constituidos principalmente de silicatos de olivino y piroxeno, fundidos total o parcialmente en la nebulosa solar a temperaturas entre 1527 y 1027 °C; el proceso de cristalización de los condros se calcula en el orden de horas o minutos. El segundo componente importante son las inclusiones refractarias de silicatos y óxidos ricos en Ca, Al y Ti (ICAs) las cuales se formaron a unos 1727 °C (Davis y Richter, 2003) al menos hace 4567 Ma (Amelin *et al.*, 2002). Además, el estudio en las inclusiones refractarias apuntan que estos agregados de tamaños milimétricos debieron formarse en un periodo de menos de 50 mil años (Dauphas y Chaussidon, 2011). Las ICAs y condros se encuentran embebidos en una matriz de polvo de sólidos amorfos y silicatos, con algunos granos de Fe y Ni. Todos estos componentes se depositaron en el plano medio del disco durante los primeros procesos de formación del sistema solar (Scott, 2007).

1.5 Relación entre condritas y asteroides, sus posibles cuerpos parentales

Gracias a los avances en la espectroscopía ha sido posible catalogar a los asteroides en función de la luz que reflejan del Sol. Con el análisis en laboratorio del espectro que presentan diversos minerales es posible establecer una relación entre las meteoritas y los asteroides del que provienen (McSween, 1999; Figura1). El tamaño máximo que puede alcanzar un cuerpo sin que presente diferenciación es de aproximadamente 100 km de diámetro. Esta característica también delimita cuáles son los cuerpos parentales de las condritas y el resto de las meteoritas (Trieloff

et al., 2003). De esa manera se ha podido asociar a los asteroides de clase espectral C a los cuerpos parentales de las condritas CV (Bell, 1988). Un ejemplo de ello es la meteorita Allende, a la que además de caracterizarla espectralmente, se le han determinado los parámetros orbitales del asteroide del que provino (Kamei y Nakamura, 2002). Estos datos sugieren que el asteroide 253 Mathilde es el cuerpo parental de la condrita Allende.

1.6 Clasificación de condros

Las texturas y propiedades petrológicas de los condros pueden cambiar al pasar por algún proceso de metamorfismo térmico, por lo cual, el grado petrológico de una meteorita es fundamental para evaluar la clasificación textural de un condro. Un metamorfismo térmico de bajo grado puede ser aquel que se encuentre dentro del intervalo de 3 a 4 en la clasificación de Van Schmus y Wood (1967).

La textura y morfología de los condros puede apreciarse por medio de un corte transversal. En sección delgada algunos condros tienen una forma circular y están formados por cristales esqueletales lo cual sugiere un proceso rápido de cristalización (Kieffer, 1975). Sin embargo, también se encuentran los condros que presentan una textura porfídica (Van Schmus, 1969).

A partir del estudio de láminas delgadas bajo luz transmitida y reflejada en microscopio óptico los condros se clasifican según su textura en: porfídicos de olivino y/o piroxeno, barrados de olivino, radiales de piroxeno, granulares, criptocristalinos y metálicos, además de la posibilidad de complementar esa clasificación con la descripción de características que presenten el arreglo espacial de sus cristales, la presencia de una matriz intersticial, granos de sulfuros y metales y la caracterización de su contorno, con lo que se puede tener idea de la corteza del condro (Gooding y Keil, 1981).

1.6.1 Porfídicos (PO, PP, POP)

Los condros porfídicos están formados por fenocristales de olivino, cuyas longitudes llegan a ser mayores que la mitad del diámetro total del condro. El olivino y/o piroxeno contienen bajas cantidades de Mg y cristales accesorios de sulfuros, Fe y Ni embebidos en una mesostasis de criptocristales principalmente de feldespato. Los condros con una razón olivino/piroxeno $> 10/1$ son llamados condros porfídicos de olivino (PO), si tienen una proporción $< 1/10$ son llamados condros porfídicos de piroxeno (PP) y con una proporción intermedia son catalogados como porfídicos de olivino-piroxeno (POP) (Gooding y Keil, 1981).

1.6.2 Condros barrados de olivino (BO)

Pueden ser considerados un caso especial de los condros porfídicos de olivino y piroxeno (POP), puesto que son distintivos sus cristales grandes y prismáticos de olivino dispuestos paralelamente y que presentan extinción homogénea con nícoles cruzados (Figura 3), con una amplia gama de tamaños de las barras y el espacio entre ellos (Gooding y Keil, 1981). Los condros BO forman menos del 5% del total de condros de diferentes texturas presentes en las condritas (Gooding y Keil, 1981). Este tipo de cristales, debido al tamaño que alcanzan, indica que los condros barrados de olivino registraron las temperaturas más altas en el proceso que originó a los condros.

1.7 Meteorita Allende

El objetivo de esta sección es conocer las generalidades de la meteorita Allende, la cual es considerada como una de las condritas mejor estudiadas a nivel mundial.

La mañana del sábado 8 de febrero de 1969, una luz brillante cruzó el cielo del norte de México. Éste fue el fenómeno más espectacular que se ha presenciado en la ciudad de Hidalgo del Parral, al sur del estado de Chihuahua; el cual terminó con un fuerte golpe provocado por la onda de choque y una gran detonación.

Se calcula que cayeron alrededor de dos toneladas de esta meteorita en el área rural del estado. Los fragmentos se encontraron alrededor del Pueblito de Allende, a 35 km al este de Parral, distribuidos en una elipse de alrededor de 10 km de eje mayor (King, 1969).

Por su composición química y sus características mineralógicas, Allende es clasificada como una condrita CV3 (Jarosewich *et al.*, 1987), pues son tres los componentes que pueden ser reconocidos en una proporción aproximada: 60% de matriz, 30% de condros y 10% de inclusiones irregulares de calcio y aluminio (Clarke *et al.*, 1970). La matriz de grano fino, compuesta casi en su totalidad de olivino rico en hierro, tiene un contenido menor de troilita, pentlandita y taenita y un contenido bajo de material opaco carbonoso disperso. La mayoría de los condros están formados por olivino, alrededor de 91% es forsterita (Mg_2SiO_4) y 9% fayalita (Fe_2SiO_4) y contienen cantidades menores de clinoenstatita y algunas zonas de vidrio. Algunos condros ricos en calcio y aluminio se componen en gran parte de anortita, gehlenita, augita y espinela (Clarke *et al.*, 1970).

Las ICAs y condros presentes en Allende son considerados de los más antiguos ya que se ha encontrado que la edad de las ICAs es de entre 4,565 y 4,568 millones de años (Allègre *et al.*, 1995), mientras que los condros son de edad de entre 4,566 y 4,567 millones de años (Connelly *et al.*, 2012).

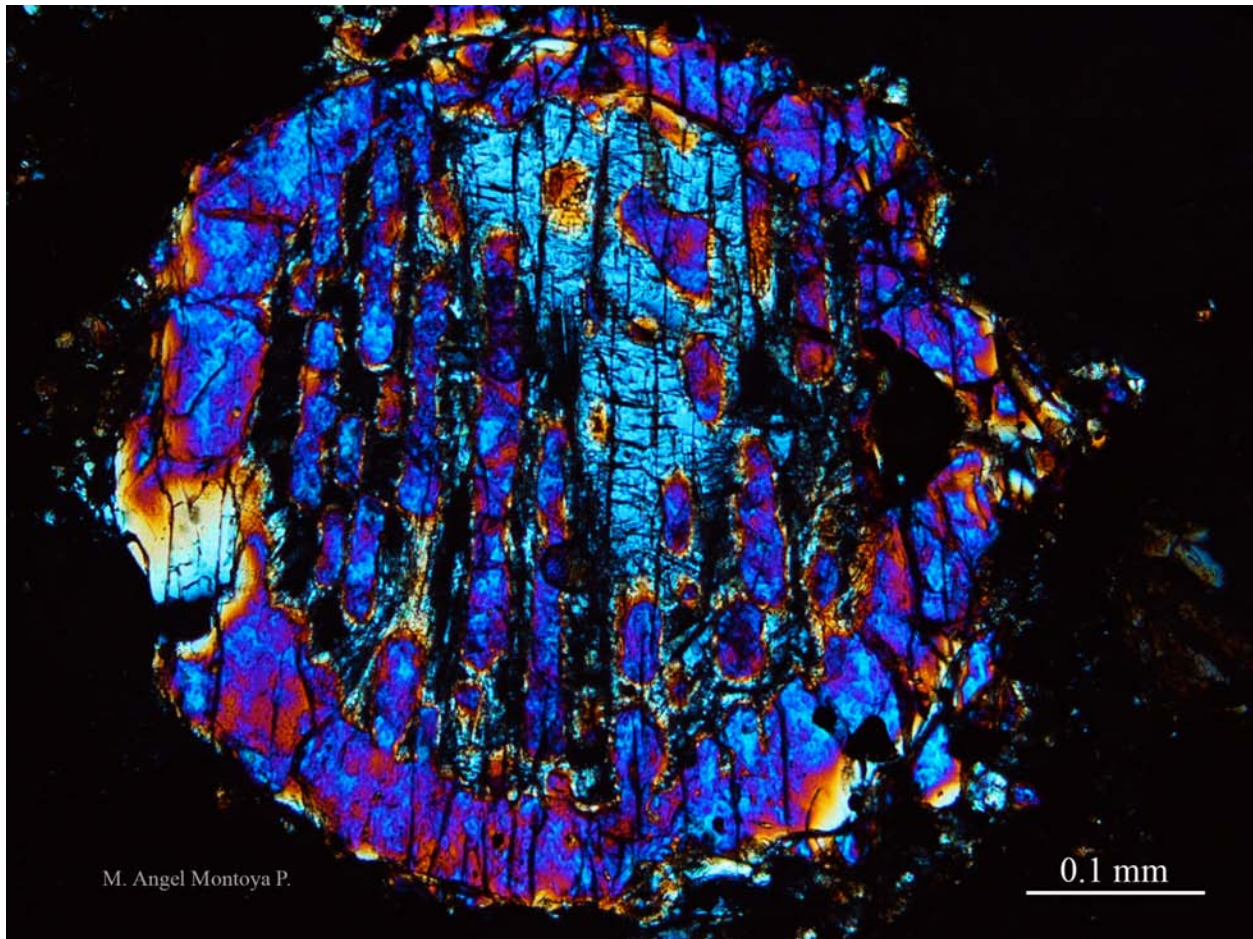


Figura 3. Condro barrado de olivino de la meteorita Allende visto con nícoles cruzados y un objetivo de 10X.

Se han realizado numerosos trabajos en torno a los condros de olivino de la meteorita Allende. En estos trabajos se estudian diversos aspectos como: i) composición de condro total (Simon y Haggerty, 1980), ii) las características mineralógicas y químicas de su matriz (Peck, 1983), iii) las posibles características de sus precursores (Matsuda *et al.*, 1990), iv) y las condiciones en las que cristalizó el olivino para la formación de condros barrados (Lofgren y Lanier, 1990). Sin embargo, la caracterización morfológica de los condros barrados de olivino en la meteorita Allende es un tema que no se ha abordado.

1.8 Técnicas de espectroscopía para el análisis de meteoritas

Las meteoritas contienen el registro de la formación del sistema solar y éste no se encuentra presente en ninguna roca terrestre. Sin embargo, estas rocas llegan a la superficie de la Tierra en eventos aleatorios y con excepción de las rocas lunares, en la actualidad no existe una tecnología que permita traer muestras de rocas extraterrestres. Por esa razón el escaso material con el que contamos requiere la implementación de técnicas de análisis no destructivas para su estudio. El uso de técnicas de espectroscopía no destructivas es una excelente opción para el estudio de las meteoritas, por lo cual han sido empleadas en numerosas ocasiones en el análisis de todos los grupos conocidos.

1.8.1 Efecto Raman

Cuando la luz incide en un material es dispersada por los átomos o moléculas que lo conforman, la mayoría de los fotones son dispersados elásticamente en lo que se conoce como dispersión de Rayleigh. En la dispersión Rayleigh los fotones dispersados tienen la misma frecuencia que los incidentes. Sin embargo, cada vez que la luz se difunde por las moléculas de un medio transparente, la radiación dispersa contiene no sólo los fotones de longitudes de onda presentes en la luz incidente, sino también una segunda radiación de frecuencia modificada. Los físicos Raman y Krishnan (1928) reportaron este fenómeno que, actualmente sabemos, es el resultado de la dispersión inelástica de aproximadamente apenas uno de cada 10^7 fotones incidentes en la molécula. Existen dos posibilidades de dispersar inelásticamente los fotones incidentes: mediante la dispersión de Stokes o la dispersión de Anti-Stokes.

En la dispersión de Stokes la molécula emite un fotón con menor energía que con la que incide. La disminución de la energía inicial ($E_0 = h\nu_0$) del fotón incidente se debe a que una

porción de ella le es cedida a un electrón de la molécula, el cual queda en el primer estado vibracional excitado con una energía $E_v = hv_v$, por lo que la energía del fotón dispersado sería $E = h(\nu_0 - \nu_v)$. La dispersión de Anti-Stokes provoca que el fotón dispersado tenga una energía mayor a la del incidente. Esto sucede cuando el fotón incidente cede su energía inicial ($E_0 = h\nu_0$) a un electrón que se encuentra en su primer estado vibracional excitado con una energía $E_v = hv_v$. Posteriormente, el electrón regresa a un estado base y emite un fotón con energía $E = h(\nu_0 + \nu_v)$ (Figura 4).

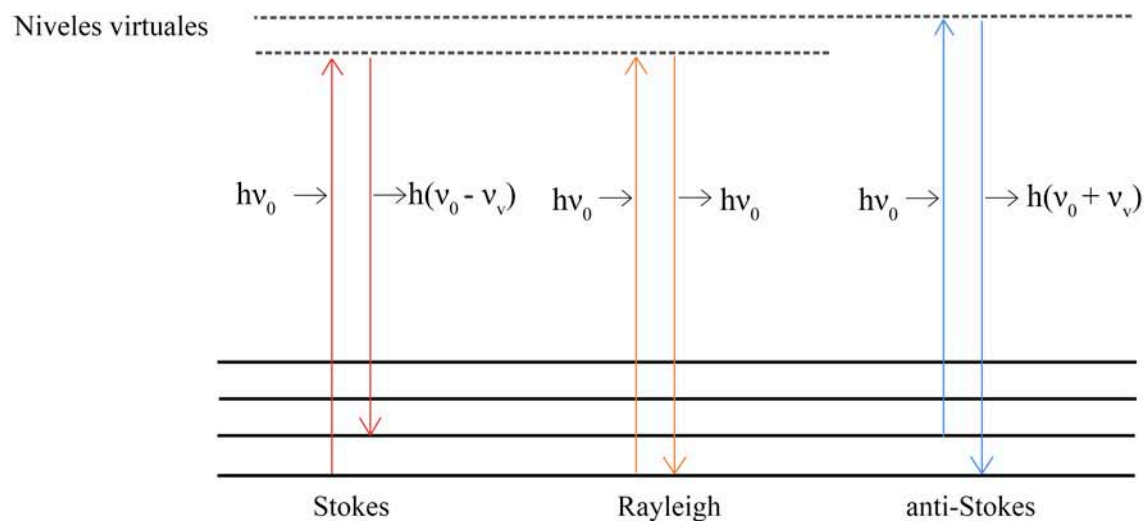


Figura 4. Diagrama de niveles de energía mostrando las tres formas de dispersión de la radiación electromagnética.

1.8.1.1 Espectroscopía Raman

Estos dos tipos de dispersión producen la radiación del espectro Raman. De esta explicación se deduce que con una frecuencia determinada de la radiación incidente, se debe esperar una nueva línea en el espectro Raman por cada una de las frecuencias características de dispersión de la molécula.

Aunque los efectos mencionados anteriormente se estudian más fácilmente con líquidos, otros materiales tales como gases, cristales y sólidos amorfos también presentan esta dispersión modificada. El microanálisis por espectroscopía Raman permite estudiar la composición y microestructura de cristales en zonas muy específicas. Por esa razón, la versatilidad de la espectroscopía Raman ha permitido su empleo en trabajos muy diversos, tales como la detección de biomarcadores para evaluar la posibilidad de hábitat marcianos (Edwards *et al.*, 2003); la identificación de cristales de diferentes minerales (Figura 5) partiendo de los modos vibracionales para los grupos de silicatos, boratos, fosfatos, sulfatos y carbonatos (Frezzotti *et al.*, 2012); la caracterización de las partículas recolectadas de un cometa (Burchell *et al.*, 2004) y la determinación de algunos componentes mineralógicos particulares en meteoritas (Weselucha-Birczyńska y Żmudzka, 2008).

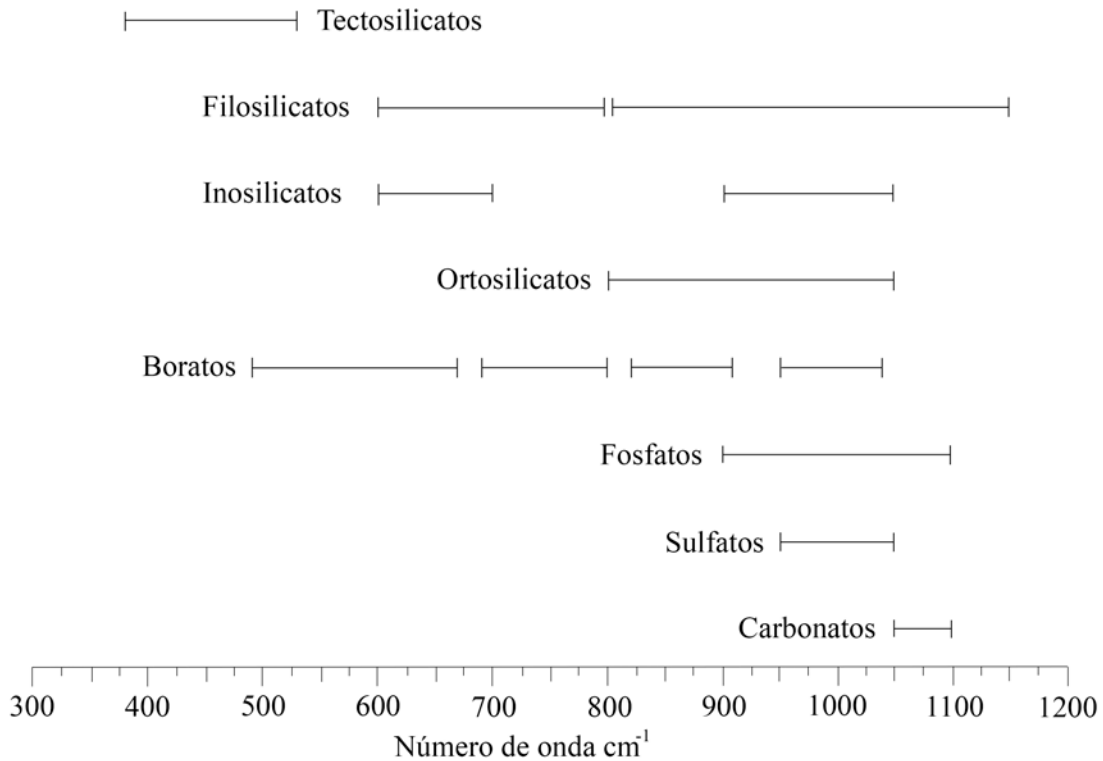


Figura 5. Regiones de los modos vibracionales para los grupos de silicatos, boratos, fosfatos, sulfatos y carbonatos. Modificada de Frezzotti *et al.*, 2012.

1.8.2 Rayos X

En 1895, durante su trabajo de estudiar los rayos catódicos, Wilhelm Röntgen (1986) encontró un tipo de radiación con una longitud de onda entre los 10^{-11} y los 10^{-08} m que actualmente conocemos como rayos X (Als-Nielsen y McMorrow, 2011).

1.8.2.1 Generación de rayos X

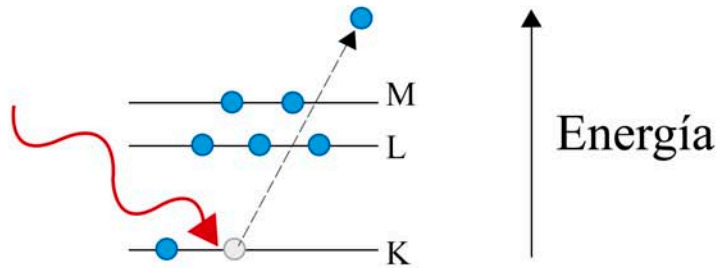
La teoría electrodinámica explica que una partícula cargada eléctricamente irradia energía cuando sufre una aceleración. De acuerdo a lo anterior, cuando inciden electrones en un material y son desacelerados por la influencia de un campo electrostático irradiarán energía electromagnética.

La radiación que se produce al desacelerar una partícula cargada forma un espectro continuo y se le conoce como radiación *Bremsstrahlung*. Los electrones altamente energéticos emiten un espectro de radiación continua en la región de los rayos X, el funcionamiento de la mayoría de las fuentes de rayos X se basa en este principio (Van Grieken y Markowicz, 2001).

1.8.2.2 Fluorescencia de rayos X

Cuando un fotón de rayos X se absorbe y expulsa un electrón del átomo sobre el que incide, el espacio vacante creado en la capa más interna puede ser llenado mediante el proceso de emisión de rayos X, donde uno de los electrones en una capa exterior llena el espacio dejado por el electrón expulsado. Durante este proceso se expulsa un fotón y el conjunto de fotones producidos forman el espectro de fluorescencia de rayos X (Als-Nielsen y McMorrow, 2011). Cuando el electrón pasa de la capa L a la capa K se produce un fotón K_{α} y si la transición es de la capa M a la capa K se produce un fotón K_{β} (Figura 6).

(a) Absorción de un fotón



(b) Emisión de rayos X

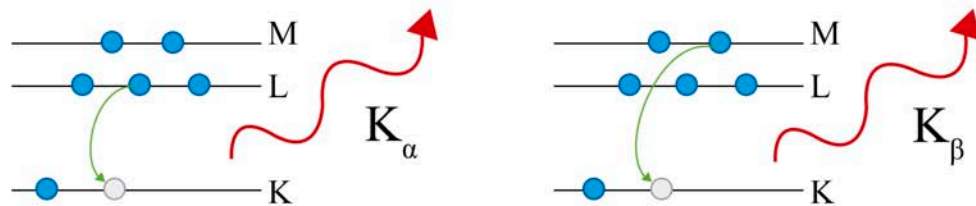


Figura 6. Formación del espectro de fluorescencia de rayos X. a) Cuando un fotón expulsa a un electrón del átomo el espacio vacío resultante puede llenarse con un electrón de los niveles superiores emitiendo un fotón. b) Cuando el electrón proviene de la capa L se produce un fotón K_{α} y cuando viene de la capa M se produce un fotón K_{β} . El conjunto de los fotones producidos por este proceso se conoce como espectro de fluorescencia de rayos X. Modificada de Als-Nielsen y McMorrow (2011).

1.8.2.3 Rayos X característicos

Los átomos de cada elemento consisten en un núcleo (formado por neutrones y protones) y una nube de electrones que lo rodea. El número de protones en el núcleo del átomo define su número atómico Z ; mientras que, en un átomo de carga neutra, el número de protones y de electrones es el mismo.

En la nube, los electrones tienen un conjunto estable de niveles de energía conocidos como capas electrónicas. A la capa más cercana al núcleo se le llama capa K, seguida hacia el exterior por la L y las capas M, N, O, P y Q sucesivamente. El número máximo de electrones en cada capa está determinado por las leyes de la mecánica cuántica, con un máximo de dos electrones en la capa K, ocho en la capa L, 18 en la capa M y así sucesivamente. Cada capa, con excepción de la capa K, se divide en subcapas y los electrones en diferentes subcapas tienen energías ligeramente diferentes. La capa L tiene tres subniveles y la capa M tiene cinco subniveles (Burcham, 2003).

La capa K tiene la energía de ionización más alta, también llamada energía crítica de ionización. Es decir, se necesita más energía para arrancar un electrón de esta capa que del resto de capas y subniveles. En general, cuanto más lejano esté el electrón del núcleo, menor es su energía de ionización. Los rayos X característicos son producidos por transiciones de electrones entre las capas. Los electrones en cada capa y subcapa tienen energías de ionización específicos y estos son diferentes para cada elemento, por ejemplo, la energía de ionización para la capa K del Si (1.84 keV) es diferente de la energía de ionización de la capa K del Pt (78.4 keV). Por lo tanto, cuando se coloca un detector de rayos X, la energía de emisión registrada depende únicamente del elemento del que se trate, mientras que la intensidad depende de la cantidad de átomos que la emiten.

1.8.2.4 Técnicas de fluorescencia de rayos X (FRX)

La fluorescencia de rayos X (XRF) es una técnica rápida y de alta sensibilidad multielemental que puede aplicarse para realizar estudios no destructivos (Janssens y Van Grieken, 2004). Con esta técnica es posible analizar muchas muestras de forma rápida y sencilla, con alta precisión y

reproducibilidad. Sin embargo, hay que prestar especial atención al uso de estándares de calibración, los cuales deben ser similares al material estudiado. También se deben seleccionar las condiciones analíticas adecuadas que permitan la detección de los elementos en la muestra (Goto y Tatsumi, 1994).

El estudio de meteoritas con XRF permite, entre otras cosas, mapear las estructuras y su composición para identificar la distribución global de los componentes. De esta manera, se pueden proponer los procesos bajo los cuales estuvo presente una meteorita (Higgins *et al.*, 2011). Además, la velocidad del análisis permite también crear una biblioteca con los datos del espectro de emisión de fluorescencia de rayos X característico de cada grupo de meteoritas (Daviau *et al.*, 2012).

En las últimas misiones a Marte se han enviado dispositivos pequeños, tales como, el CheMin que es un sistema miniaturizado que combina las técnicas de difracción de rayos X (DRX) y FRX (Sarrazin *et al.*, 2005), éste sistema ha puesto éstas técnicas a disposición para misiones futuras a Venus, la Luna, Europa, cometas, entre otros. Por lo que es importante explotar técnicas que nos permitan entender las necesidades de portabilidad contra una mejora en la adquisición de los datos.

1.8.3 Microscopía electrónica de barrido (MEB)

Una manera de estudiar los detalles de muestras sólidas muy pequeñas es a través del microscopio electrónico de barrido (MEB). Un aspecto muy útil de formación de imágenes MEB es la gran profundidad de campo que se logra. Esto permite observar detalles en distintos planos focales. Cuando la información obtenida de los distintos planos se junta en una misma imagen se obtienen como resultado fotografías de alta definición.

Un equipo MEB consta de una columna óptica, la cual, produce un haz de electrones muy fino que se puede enfocar. Cuando el haz de electrones incide sobre la superficie de la muestra, se producen varios tipos de radiación, como los electrones secundarios, que son registrados por detectores dentro del instrumento.

Las imágenes en un microscopio electrónico de barrido se obtienen al barrer con el haz de electrones la superficie del material que se desea analizar. Se sigue un patrón de líneas paralelas sobre la superficie y se miden los electrones secundarios o retrodispersados que son emitidos desde la superficie de la muestra como resultado de su interacción con el haz de electrones. La corriente de electrones se colecta y amplifica. La variación en la intensidad de la señal, que resulta del barrido del haz a través de la muestra, forma un mapa de intensidades con lo cual se obtiene una imagen (Goldstein *et al.*, 2003).

1.8.3.1 Espectroscopía de dispersión de energía (EDS)

La espectroscopía de dispersión de energía (EDS) es una técnica de microscopía electrónica de barrido que se utiliza comúnmente para analizar materiales cristalinos, tanto en ciencias de los materiales como en ciencias de la Tierra (Nowell y Carpenter, 2007). Esta técnica utiliza los rayos X característicos que se producen por la interacción de los electrones de alta energía que inciden en la muestra. El componente principal de un espectrómetro EDS es un detector de estado sólido que produce, por cada fotón incidente, un pulso de voltaje proporcional a su energía. Cada vez que un fotón de rayos X incide sobre el detector se crea una pequeña corriente producto de la remoción de un electrón del detector. Los rayos X característicos de diferentes elementos se pueden separar en función de la energía que tienen. De forma que, al combinar la información de la energía de los rayos X y la intensidad de la corriente registrada en el detector

se puede formar un espectro de energía para cuantificar el contenido de cada elemento en la muestra.

Esta técnica se ha utilizado con éxito para examinar muchas meteoritas diferentes. Un ejemplo es el trabajo de Ángeles *et al.*, (2010) en el que realizaron la caracterización de la meteorita Pácula por medio de análisis en MEB y espectrometría de energía dispersiva (EDS) para comprobar su clasificación.

1.8.4 Microsonda electrónica de barrido (EMPA)

En 1949 Raimond Castaing presentó por primera vez la idea de utilizar los rayos X secundarios producidos por un haz de electrones focalizado sobre una muestra pulida para realizar un microanálisis (Castaing y Guinier, 1950). La microsonda electrónica (electron microprobe analyzer, EMPA) consiste en un microscopio electrónico de barrido que incluye espectrómetros de dispersión de longitud de onda (WDS, wavelength dispersive spectrometer). Estos dispositivos son unidades que permiten realizar análisis adicionales. Estos analizadores permiten hacer un análisis cuantitativo, lo cual representa la principal diferencia entre la microsonda y un microscopio electrónico de barrido, el cual está diseñado para obtener imágenes de alta resolución de la muestra.

Los espectrómetros WDS separan los rayos X característicos en función de su energía, posteriormente se compara la intensidad de los rayos X de la muestra con los patrones emitidos por un estándar de composición conocida.

Para poder obtener un análisis por microsonda, la muestra debe estar muy bien pulida, seca, limpia y debe ser eléctricamente conductora. Cuando la muestra es un mal conductor se suele aplicar un recubrimiento fino regularmente de grafito, aluminio u oro.

La microsonda electrónica permite analizar volúmenes muy pequeños (alrededor de $1 \mu\text{m}^3$), lo que permite un análisis químico puntual de cristales pequeños. Los elementos que podemos detectar con la microsonda van desde el berilio hasta el uranio. Por otra parte, dependiendo del elemento y las condiciones de análisis, pueden detectarse concentraciones de aproximadamente 0.001%.

Al ser una técnica puntual, la microsonda permite estudiar por separado los componentes de las condritas ordinarias (Keil y Fredriksson, 1964). Una de sus aplicaciones es la clasificación de condritas ordinarias a partir del contenido de Fe, Mg y Ca en olivinos y piroxenos, lo cual ayuda a separar los grupos H, L y LL.

CAPÍTULO II

Procedimiento experimental

En esta sección se muestran las técnicas de análisis que empleamos para obtener la información necesaria para realizar el trabajo de caracterizar a los condros BO de la meteorita Allende. En la Figura 7 se muestra un resumen de las técnicas utilizadas y el trabajo realizado con cada una de ellas. También se mencionan los alcances de cada técnica y las limitaciones que presenta. Haciendo uso de esta información, logramos que todas las técnicas se complementaran.

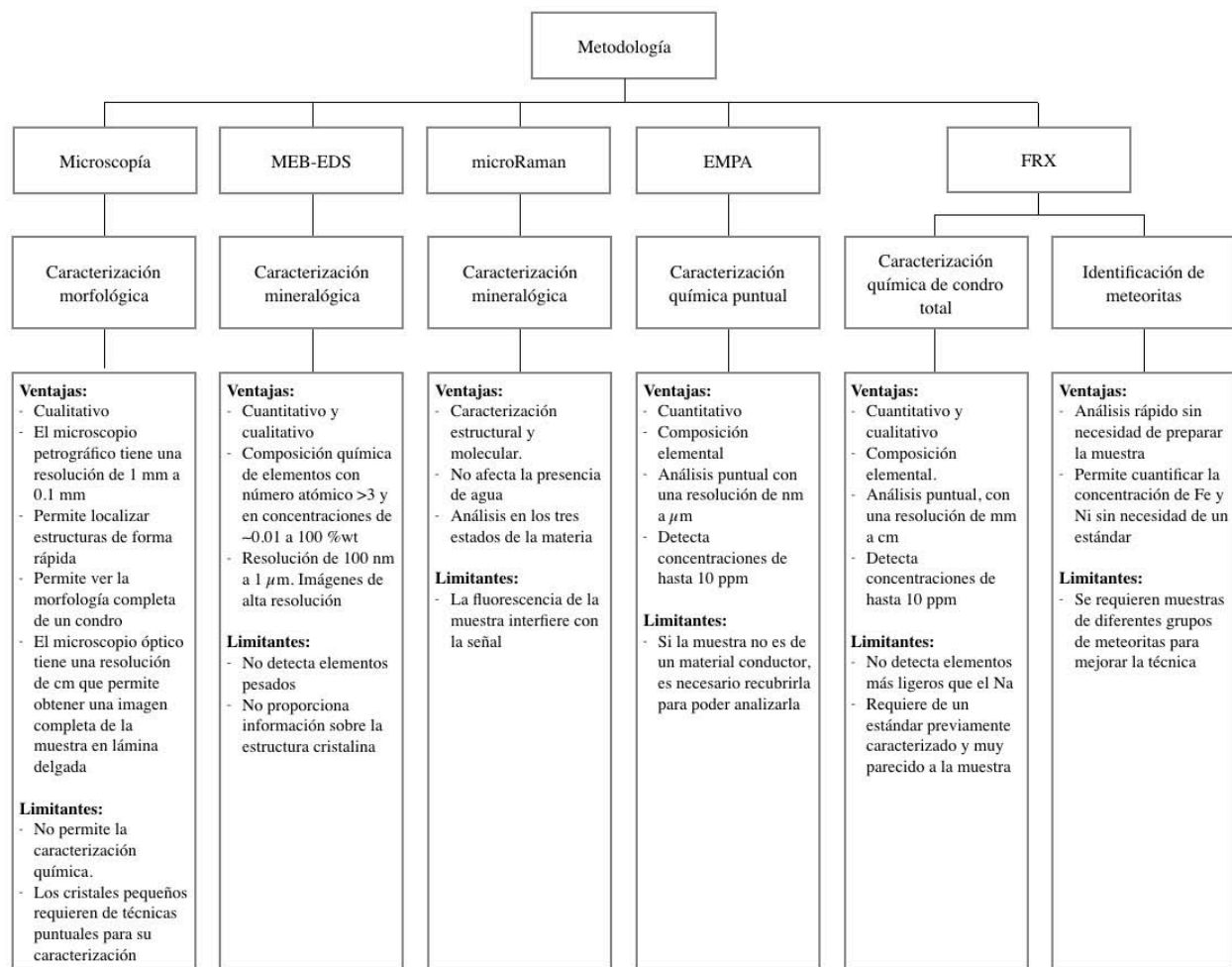


Figura 7. Diagrama de la metodología seguida. Se muestran las técnicas utilizadas, el trabajo que se realizó con cada una, las ventajas que ofrecen y las limitantes que presentan.

2.1 Petrografía

Para realizar este trabajo se utilizaron cuatro secciones delgadas pulidas de la meteorita Allende; una de ellas con espesor de 30 μm y las otras tres de 60 μm . El trabajo de microscopía fue realizado en el laboratorio de microscopios “Francisco J. Fabregat” del Instituto de Geología (UNAM) y en el Taller de Mineralogía y Petrología de la Facultad de Ciencias (UNAM).

Se hicieron fotografías de cuatro láminas delgadas con luz paralela. Se identificaron cuatro muestras con sus respectivas fotografías para tener una imagen panorámica de la muestra y utilizarla como mapa de cada sección delgada (Figura 8).

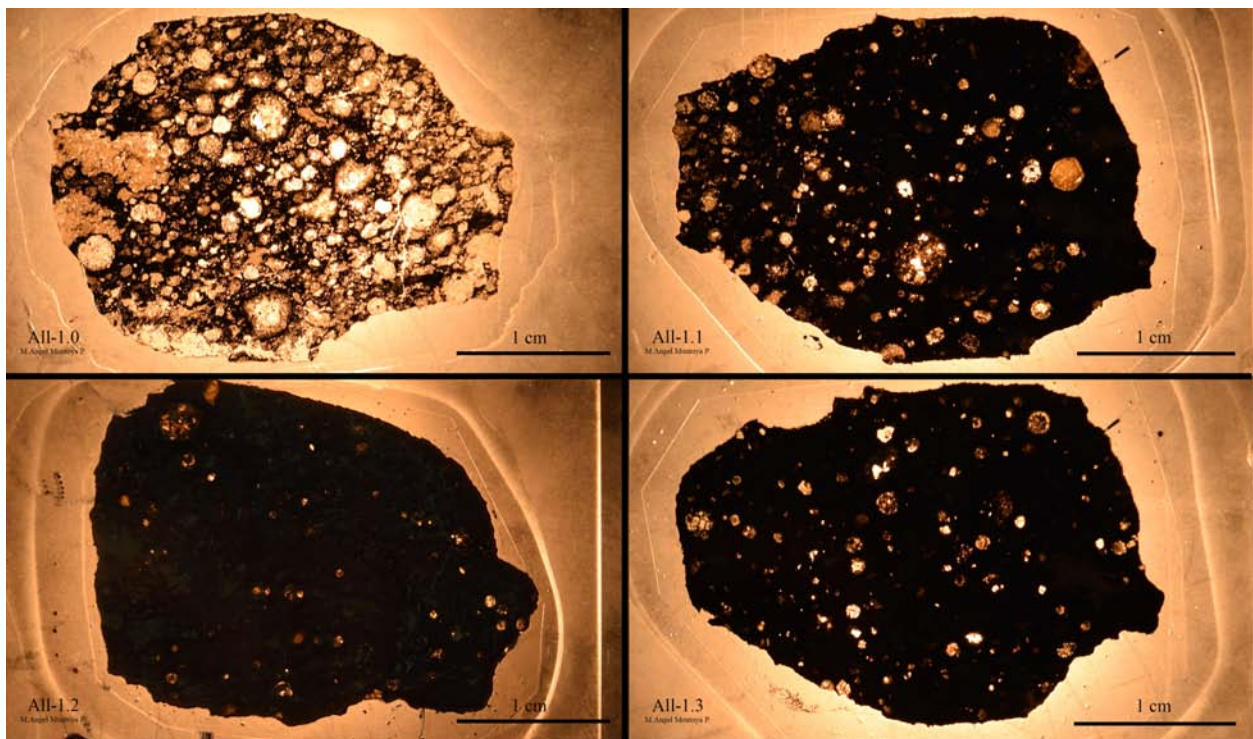


Figura 8. Fotografías panorámicas de las láminas delgadas de la meteorita Allende.

En un microscopio petrográfico Olympus BX60 buscamos los condros barrados que contenía cada sección. Al encontrar un condro barrado se ubicó en el mapa de la sección delgada

correspondiente. En las cuatro láminas delgadas se localizaron 20 condros barrados de olivino. Cada uno de los condros encontrados se fotografió con una cámara Olympus DP12 con luz polarizada, nícoles cruzados y luz reflejada con objetivos de 4X y 10X. Cada una de las fotos se clasificó y nombró de acuerdo al número de condro encontrado, la muestra en la que se localizó, el tipo de luz y objetivo empleados.

Con el programa Image Pro se midió el diámetro mayor y menor, ancho de cada barra y el ancho del borde de cada uno de los condros a partir de las fotografías tomadas con los objetivos 10X y 4X. Este procedimiento se utilizó para caracterizar la morfología de los condros.

2.2 Mineralogía

Se seleccionaron los condros BO con cristales pequeños que no se identificaron con en el microscopio petrográfico, para ser analizados por diferentes técnicas de espectroscopía. También se realizó el análisis con fluorescencia de rayos X para la clasificación de algunos fragmentos de meteoritas y así probar una nueva técnica para obtener las composiciones globales de los condros.

2.2.1 Microscopía electrónica de barrido (MEB)

Para identificar la composición cualitativa y obtener imágenes de electrones retrodispersados de los minerales en los condros BO se utilizó un microscopio electrónico de barrido. El equipo que se empleó fue un MEB marca JOEL JSM-5600LV de bajo vacío con un sistema acoplado de EDS, empleando un voltaje de aceleración de 20 kV. Este equipo se localiza en el Laboratorio Central de Microscopía (LCM) del Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México (IFUNAM).

2.2.2 Espectroscopía microRaman

Los análisis en microRaman se utilizaron para determinar la presencia de vidrio y/o plagioclasa dentro de los condros. El trabajo se realizó en el laboratorio de Materiales Avanzados en el IFUNAM. Se utilizó un equipo DXR MicroRaman Confocal de Thermo Scientific y se empleó un objetivo Olympus x50. Se utilizó una rejilla de 900 líneas/mm para resolver la radiación dispersada. La apertura se fijó en $50\ \mu\text{m}$. El espectro Raman se acumuló en periodos de 10 y 14 segundos para los condros 11 y 17 respectivamente en el rango de 49.9 a $3382.3\ \text{cm}^{-1}$ con una resolución de $\sim 1.9\ \text{cm}^{-1}$. La fuente de excitación fue una radiación de $532\ \text{nm}$ funcionando con una potencia de $\sim 10\ \text{nW}$.

2.2.3 Fluorescencia de rayos X

Se utilizó la fluorescencia de rayos X para realizar los análisis químicos de condro total sobre cada uno de los condros. Los espectros fueron procesados en el programa AXIL para obtener el área bajo la curva de los picos de las señales de cada elemento. El análisis se repitió tres veces sobre cada condro, se usó el promedio de las mediciones obtenidas para realizar el resto de los cálculos. La asignación del hierro a cada fase mineral fue realizada de acuerdo a la concentración de Ni y S, siguiendo la metodología de Jones y Scott (1989). Para esta parte del trabajo se escogieron aquellos condros con diámetros mayores a $500\ \mu\text{m}$. Con la restricción del tamaño intentamos asegurar que los condros fueran lo suficientemente grandes para que el haz de $500\ \mu\text{m}$ de diámetro, solamente tomara análisis del material dentro del condro.

Esta misma técnica se utilizó en los fragmentos de meteoritas metálicas Catorce, Cañon Diablo, Shikote, Campo cielo, condrita Aldama y una sección pulida de la pallasita Brenham y dos fragmentos desconocidos que debían evaluarse. Obtuvimos una composición general de cada

muestra colocando el haz sobre una sección limpia de óxido y lo más plana posible. Realizamos los análisis en el Laboratorio Nacional de Ciencias para la Investigación y la Conservación del Patrimonio Cultural (LANCIC-IF). Trabajamos con el equipo portable de rayos X SANDRA (Sistema de Análisis No Destructivo por Rayos X) desarrollado por el Instituto de Física de la UNAM (Ruvalcaba *et al.*, 2010) operando a 0.3 mA y 35 kV con un tiempo de adquisición de datos de 120 segundos. El equipo cuenta con un tubo de molibdeno de operación máxima de 50 watts y detector AMPTEK SDD 1-2-3. Como estándar se utilizó un polvo homogéneo de olivino de la peridotita Honorato de Abajo para obtener las concentraciones en los análisis de condro total. Comparado con los equipos tradicionales de FRX, SANDRA ofrece una gran portabilidad.

2.2.4 Microsonda electrónica de barrido (EMPA)

Partiendo de las imágenes de electrones retrodispersados se hicieron mapas de los condros. En esos mapas se localizaron los puntos de donde se obtuvieron los análisis cuantitativos. Esto es importante para poder identificar el condro que se está analizando y además separar los análisis hechos en las barras de olivino y el vidrio de la mesostasis de los condros.

Los análisis se hicieron en una microsonda Jeol JXA 8900R del LUP perteneciente a los Institutos de Geofísica y Geología con cinco espectrómetros independientes. Para el olivino con este equipo se determinó la concentración de Si, Al, Ti, Cr, Fe, Mn, Mg, Ca y Na. En el caso de los vidrios además de los elementos antes mencionados se incluyeron el K, P y S. Las condiciones instrumentales utilizadas fueron: voltaje de aceleración de 20 keV, corriente del haz de 15 nA, tiempo de conteo de 40 s en el pico y de 10 s en la posición de background para cada estándar. Para este análisis se ocuparon estándares naturales. Para la corrección de matriz se utilizó el programa ZAF de Jeol.

CAPÍTULO III

Resultados

3.1 Caracterización de condros

3.1.1 Caracterización morfológica

Sobre los mapas de las secciones delgadas (Figura 9) se puede ver la localización de cada uno de los condros barrados de olivino encontrados.

Usando luz polarizada y nícoles cruzados, algunas propiedades ópticas de los minerales, tales como los colores de interferencia y el índice de refracción entre otros, nos permitieron identificar que los condros están compuestos por cristales de olivino. Por otro lado la morfología de las barras y la localización de granos metálicos son más evidentes usando luz reflejada (Figura 10).

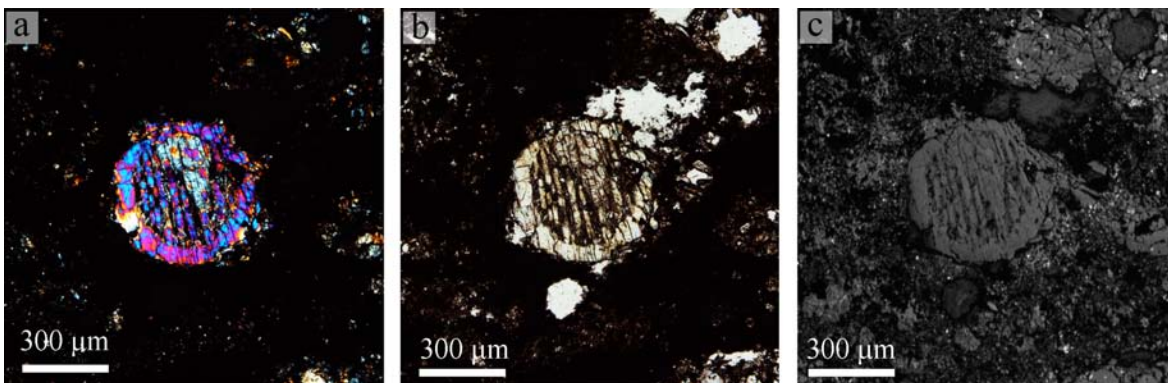


Figura 10. Fotomicrografía de un condro barrado de olivino en donde se muestran las barras discontinuas vistas con: a) nícoles cruzados, b) luz polarizada y c) luz natural reflejada.

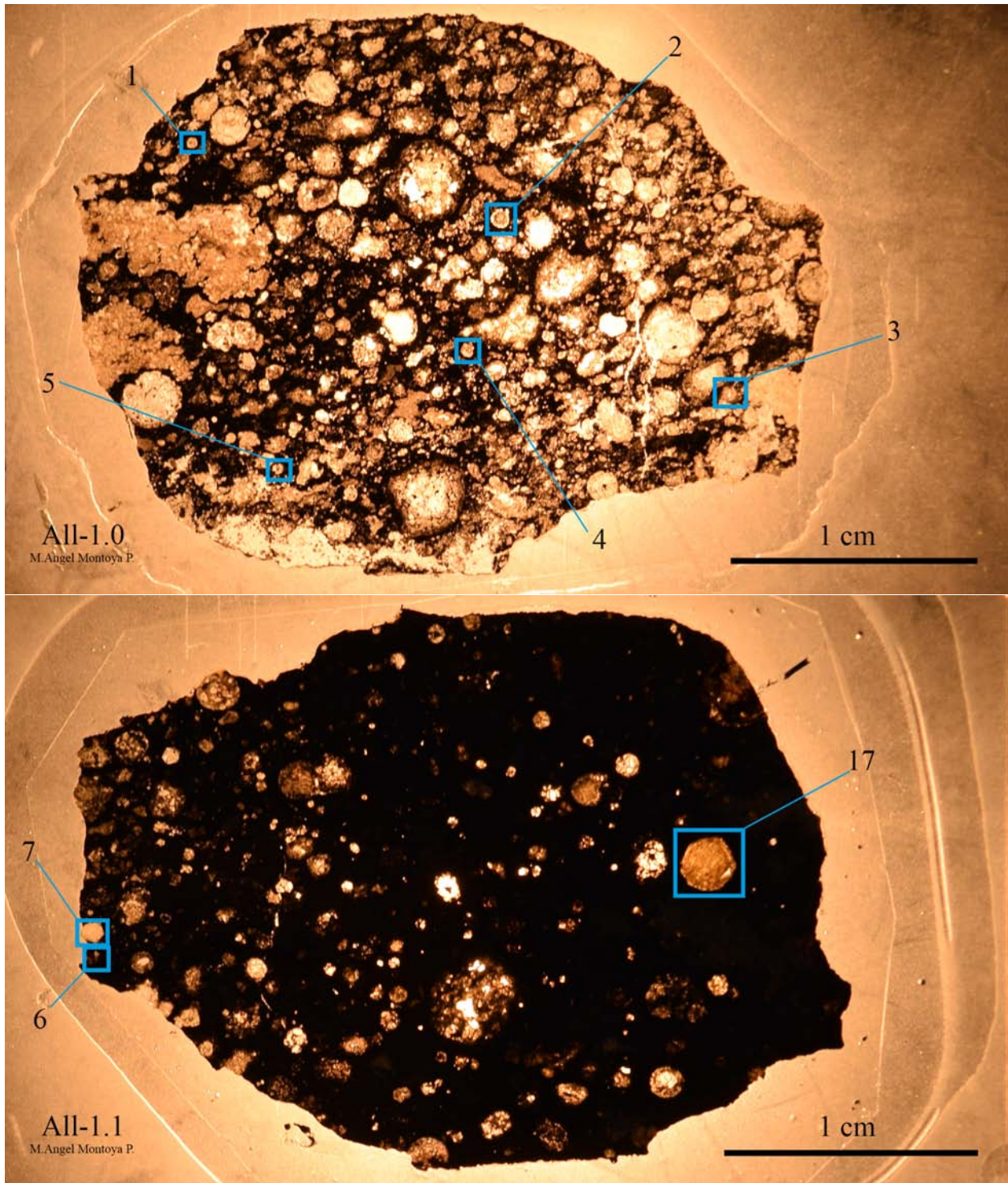


Figura 9. Mapas de las secciones delgadas de la condrita Allende con la localización de cada uno de los condros barrados de olivino encontrados.

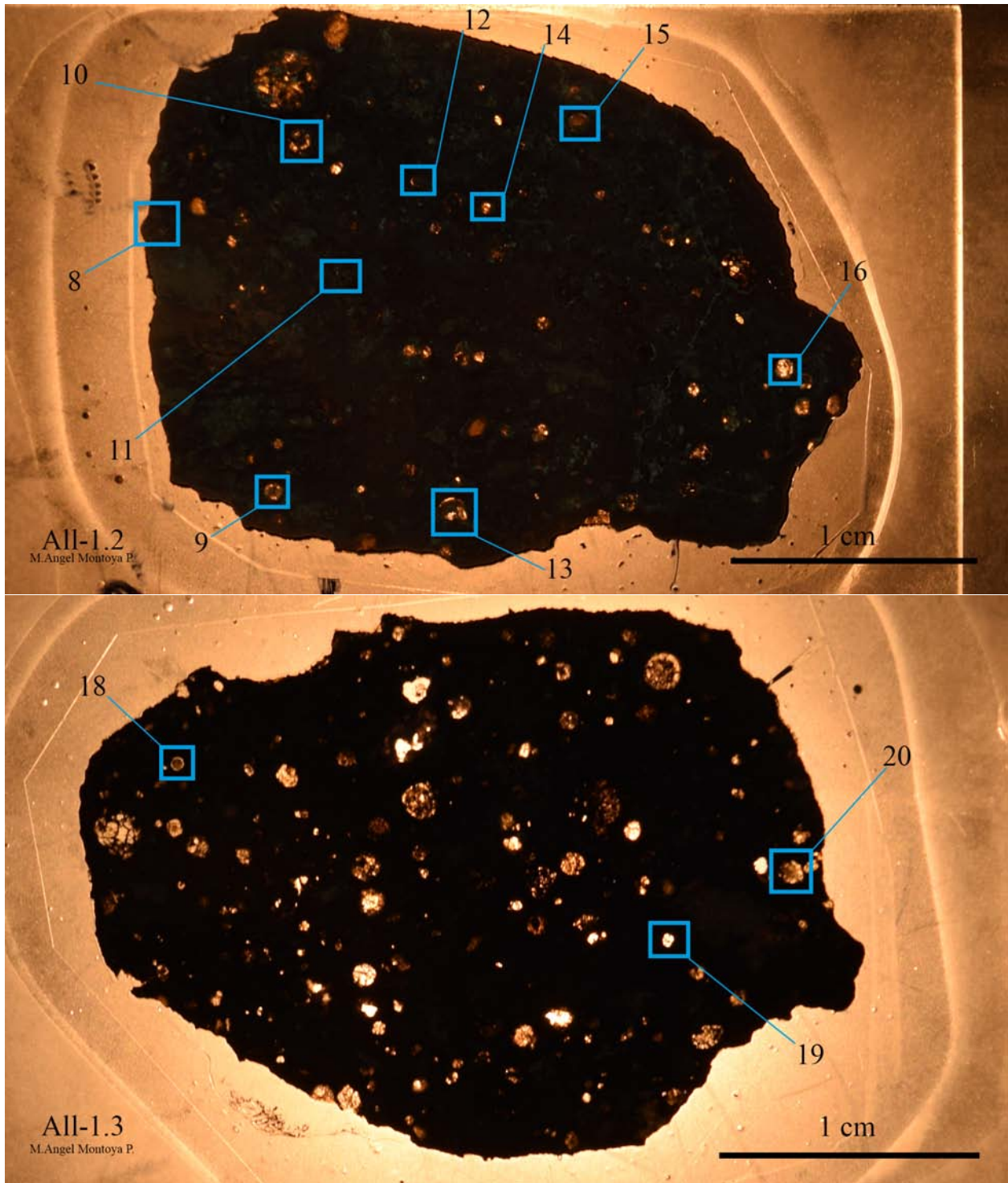


Figura 9. Mapas de las secciones delgadas de la condrita Allende con la localización de cada uno de los condros barrados de olivino encontrados.

Las fotografías mostraron que existen diferentes formas de crecimiento de los cristales de olivino que forma las barras. Por esa razón dividimos los condros barrados en cuatro grupos morfológicos en función del tipo de crecimiento que tienen sus barras (Figura 11). Los grupos en los que se dividieron son: barras discontinuas (Figura 11a), barras poco definidas (Figura 11b), barras radiales (Figura 11c) y barras finas (Figura 11d).

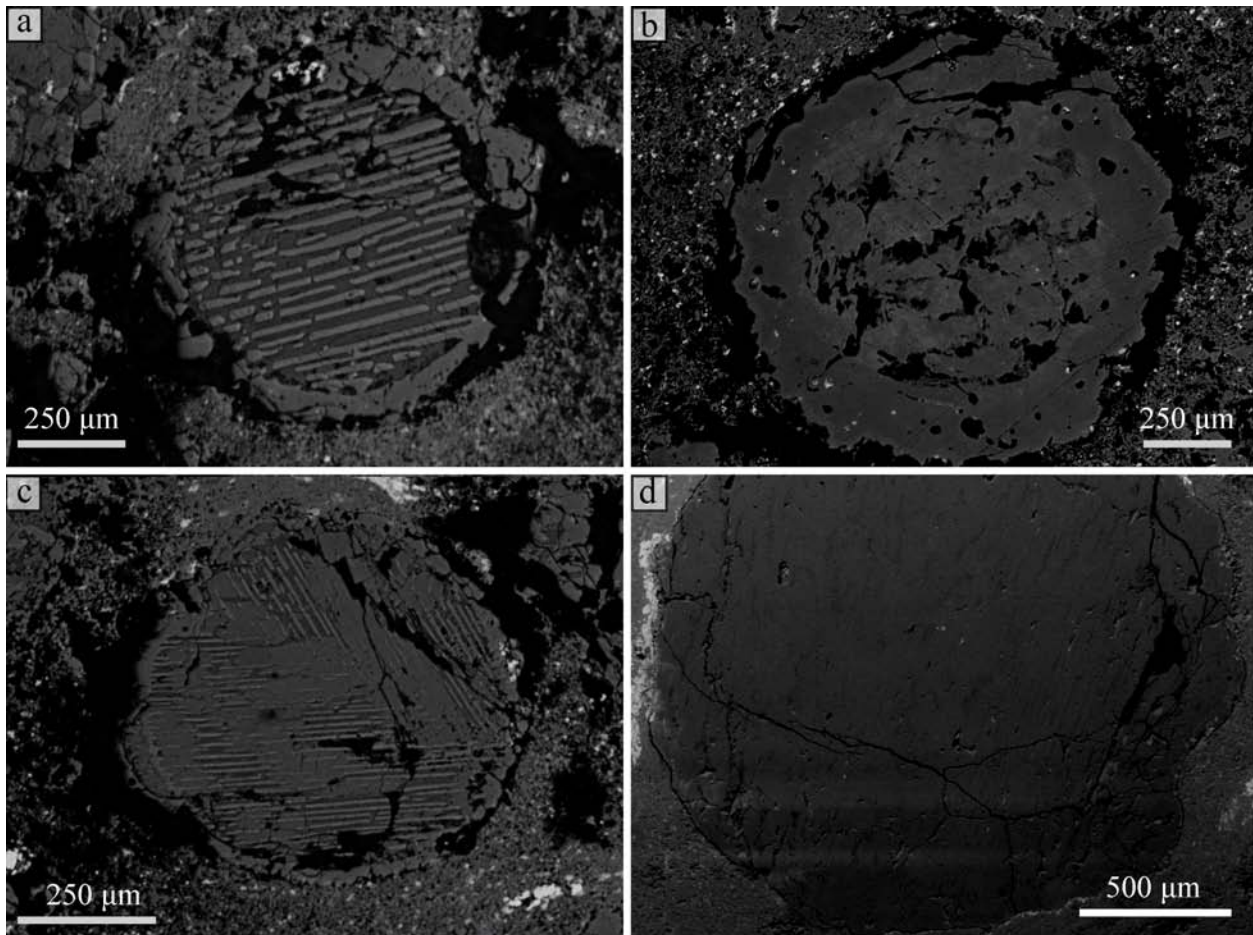


Figura 11. Fotomicrografías en luz reflejada donde se ven ejemplos del crecimiento de las barras de cada grupo: (a) barras discontinuas, (b) barras poco definidas, (c) barras radiales y (d) barras finas.

Para cada uno de los grupos se obtuvo la distribución de frecuencias del ancho de las barras de olivino (Tabla 1) y posteriormente se graficaron esos resultados en un histograma de frecuencias (Figura 12).

Tabla 1. Tipos de crecimiento en barras de olivino y los intervalos de ancho de barra en micrómetros. El número de barras en cada intervalo es distinto para cada tipo de crecimiento. La suma del número de barras de cada tipo de crecimiento calculamos el total de barras dentro de un intervalo.

Intervalo(μm)	Discontinuas	Poco definidas	Radiales	Finas	Total
[0-5)	6	0	11	0	17
[5-10)	19	1	33	8	61
[10-15)	30	6	0	2	38
[15-20)	26	12	0	0	38
[20-25)	16	7	0	0	23
[25-30)	22	2	0	0	24
[30-35)	10	9	0	0	19
[35-40)	8	5	0	0	13
[40-45)	3	1	0	0	4
[45-50)	2	1	0	0	3
[50-55)	1	1	0	0	2
[55-60)	1	1	0	0	2
[60-65)	0	0	0	0	0
[65-70)	0	0	0	0	0
[70-75)	0	0	0	0	0
[75-80]	1	0	0	0	1

El histograma muestra una distribución unimodal con una moda en el intervalo de 5 a 10 μm . Eso muestra que existe una tendencia en el ancho de las barras de olivino para los condros de la meteorita Allende. Para cada uno de los grupos se tienen las siguientes observaciones:

Para el grupo de las barras discontinuas la moda de tamaños es en el intervalo de 10 a 15 μm . Para el grupo de las barras poco definidas la moda es en el intervalo de 15 a 20 μm . Para los grupos de las barras con distribución radial y el de barras finas la mayor concentración de los datos es en el intervalo de 5 a 10 μm .

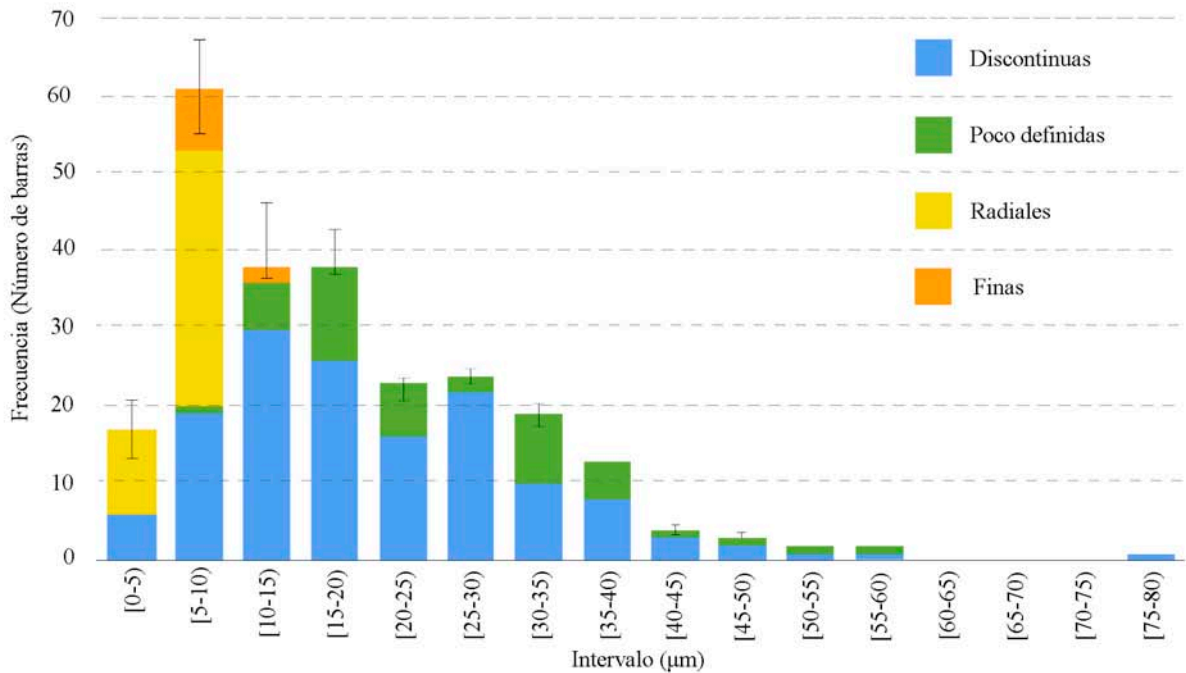


Figura 12. Histograma de frecuencias del ancho de las barras de olivino en los condros. En diferentes colores se muestra la frecuencia para cada grupo del tipo de crecimiento de los cristales.

3.1.2 Caracterización mineralógica

Con el objetivo de caracterizar químicamente los olivinos y los minerales accesorios de los condros BO, se seleccionaron las regiones en la sección delgada donde petrográficamente no se podía observar los minerales por ser cristales muy pequeños. En la Figura 13 se muestran los puntos donde se realizaron los análisis en MEB (1, 2 y 3) y microRaman (A, B, C, D).

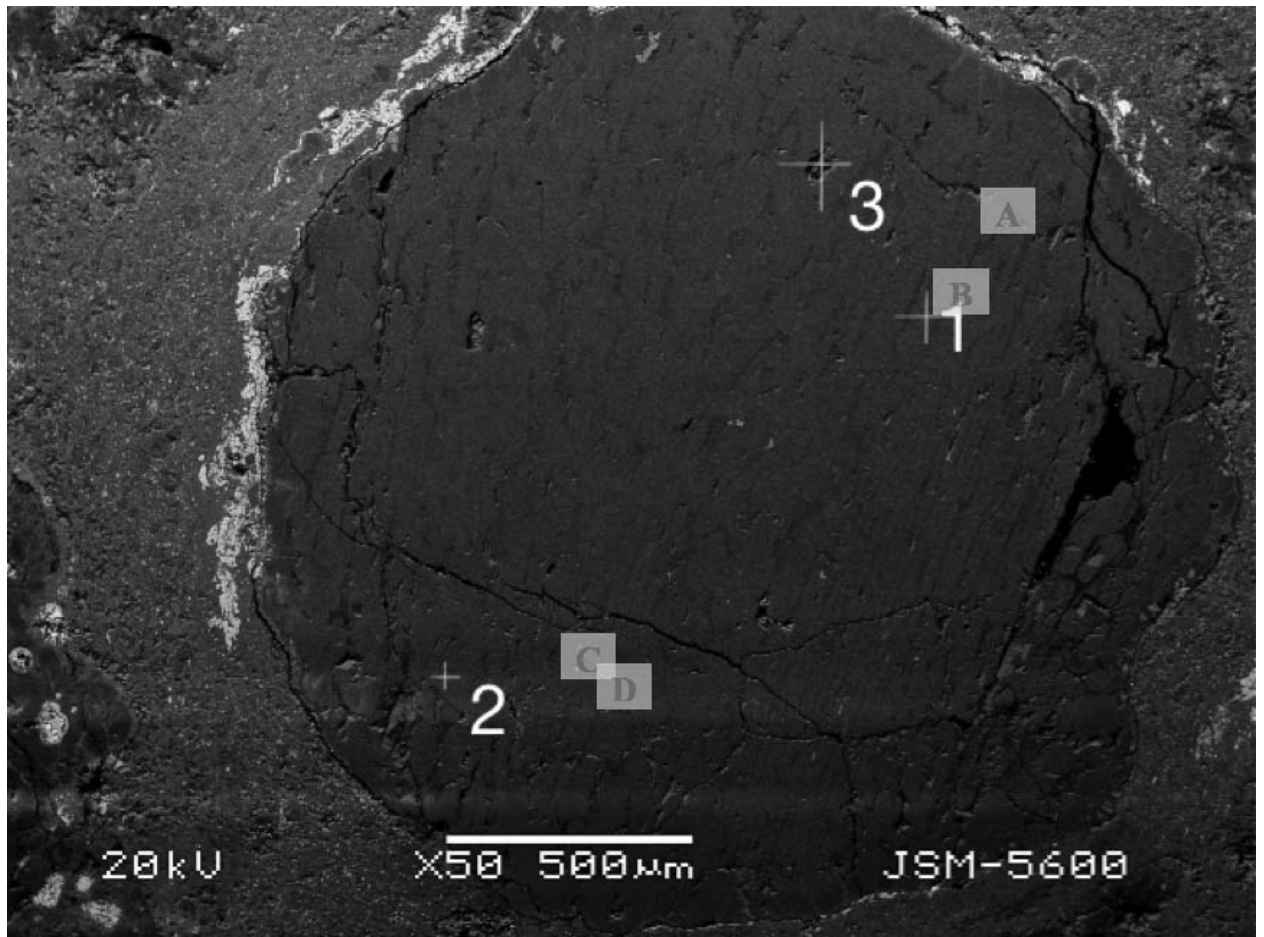


Figura 13. Imagen con electrones retrodispersados de un condro. Con una cruz se señala el punto sobre el que se realizaron los análisis en MEB y en los cuadros se muestran las zonas sobre las que se realizaron análisis con microRaman.

3.1.2.1 Resultados de análisis químico por EDS

La estequiometría de los datos obtenidos por EDS para los puntos analizados en los condros se describe de acuerdo a sus relaciones de forsterita (Fo) (Mg_2SiO_4) y fayalita (Fa) (Fe_2SiO_4) en los olivinos. Para los piroxenos se describen las relaciones de ferrosilita (Fs) ($FeSiO_3$), enstatita (En) ($MgSiO_3$) y wollastonita (Wo) ($CaSiO_3$) correspondientes a los diferentes puntos analizados con lo cual pueden clasificarse químicamente (Morimoto, 1988).

La estequiometría mostró que la composición química de los olivinos del condro 17 es 92.8% Fo, 7.2% Fa. Para el piroxeno se obtuvieron proporciones de 66% En, 6% Fs, 28% Wo. Los resultados para el feldespato son 81.6% Ab, 18.2% An y 0.2% Or (Tabla 2). Con la información de las proporciones de Ca-Mg- Fe para los diferentes puntos se pueden clasificar en el cuadrilátero de los piroxenos y en función de contenido en Mg en el caso de los olivinos (Figura 14).

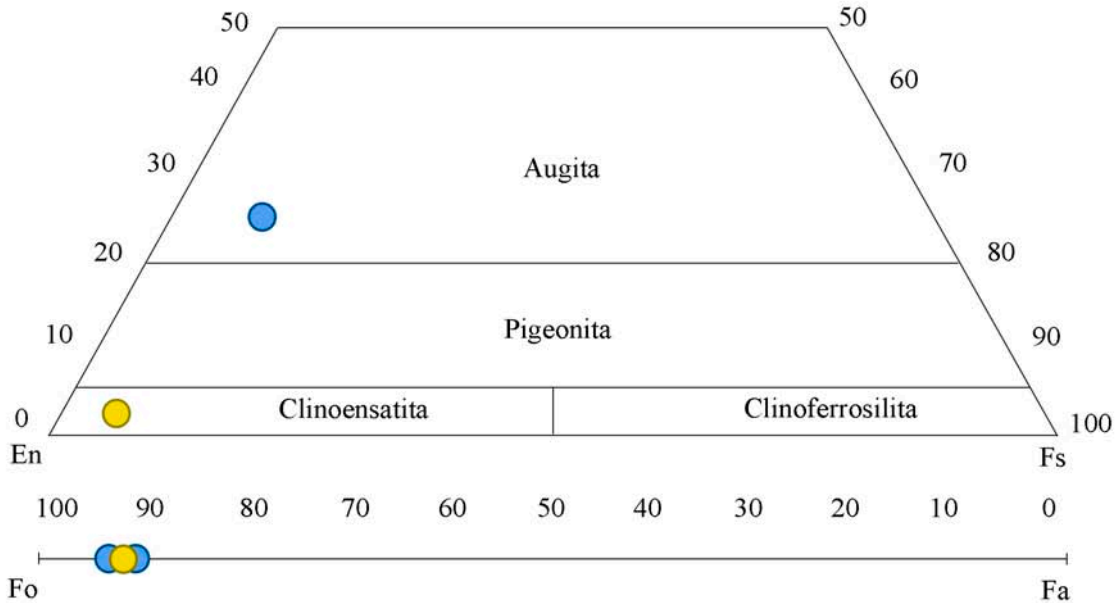


Figura 14. Diagrama de composición (Ca-Mg-Fe) para los minerales analizados en los condros 17 (azul) y 11 (amarillo), con los nombres aceptados para clinopiroxenos (Morimoto, 1988) y por el contenido de Mg para el olivino.

Tabla 2. Composición química semicuantitativa de los olivinos, feldespatos y piroxenos, obtenidas por EDS.

Análisis	Olivinos			Feldespatos		Piroxenos	
	17-1	17-3	11-2	18-3	17-2		
Condro							
SiO ₂	42.86	43.11	41.26	49.81	50.80		
TiO ₂	0.00	0.00	0.12	0.00	1.14		
Al ₂ O ₃	0.00	0.36	9.33	34.89	5.49		
Fe ₂ O ₃	-	-	-	0.00	4.36		
FeO	7.62	7.39	4.03	0.00	0.00		
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00		
MgO	49.52	48.86	44.73	0.00	23.33		
CaO	0.00	0.13	0.00	4.38	13.45		
Na ₂ O	-	-	-	10.88	-		
Cr ₂ O ₃	-	-	-	-	1.05		
NiO	-	-	-	-	0.24		
Total	100	100	99.50	100	99.86		
Iones con base en:		4 O ⁱ		32 O ⁱ	6 O ⁱ		
Si	1.02	1.04	0.97	2.26	1.81		
Al	0	0	0.00	1.86	0.23		2.0 ⁱⁱ
Ti	0	0.01	0.26	0.00	0.03		
Fe ²⁺	0.14	0.15	0.08	0.00	0.12		
K	0	0	0.00	0.00	0.00		
Mg	1.76	1.75	1.57	0.00	1.24		1.9 ⁱⁱⁱ
Ca	0	0	0	0.21	0.51		
Na	-	-	-	0.96	0.00		
Cr	-	-	-	-	0.03		
Ni	-	-	-	-	0.01		
Porcentajes atómicos							
Fo	92.8	92.2	95.2	Ab	81.6	En	66.3
Fa	7.2	7.8	4.8	An	18.2	Fs	6.3
				Or	0.2	Wo	27.5

i: Número de átomos de oxígenos que se emplearon para hacer el cálculo estequiométrico

ii: En el piroxeno, la suma de Si y Al debe ser igual a 2

iii: En el olivino, la suma de los cationes, sin contar el Si, debe ser igual a 2. En piroxeno no se cuenta Si y Al

3.1.2.2 Resultados de análisis microRaman

Por otra parte, en el condro 18 los análisis en MEB y los resultados de la petrografía sugieren una zona que posiblemente está compuesta por vidrio o feldespato. Por esa razón se empleó el análisis por microRaman, para averiguar si tiene una estructura cristalina o no. Las zonas de análisis en microRaman se fotografiaron, el espectro corresponde al punto en el centro de la imagen (Figura 15). De los espectros obtenidos en microRaman, identificamos la fase mineral de la cual se trataba a partir de las frecuencias de los modos vibraciones característicos del mineral. El espectro (Figura 16 a) del primer cristal (Figura 15 a) sugiere que se trata de una plagioclasa por sus bandas características en 185.502 y 975 cm^{-1} (Frezzotti, 2012).

Los olivinos se caracterizan por presentar bandas en 820 y 856 cm^{-1} . Los espectros de los diferentes cristales de olivino presentan una ligera desviación respecto a los valores característicos en esas bandas. Un ejemplo de ello es la imagen de la muestra de un cristal de olivino (Figura 15 b) identificado a través de su espectro (Figura 16 b) con bandas en 853.05 y 821.6 cm^{-1} .

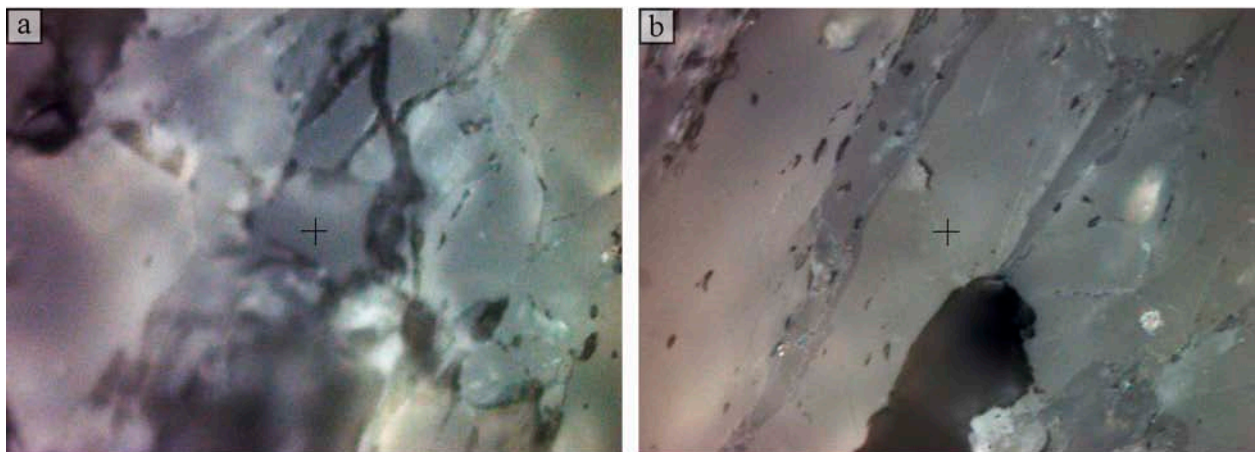


Figura 15. Zonas de análisis en microRaman. Fotografías en luz reflejada de las zonas a) y b) del condro donde se realizaron análisis en microRaman. La cruz al centro señala el cristal de donde se obtuvieron los espectros.

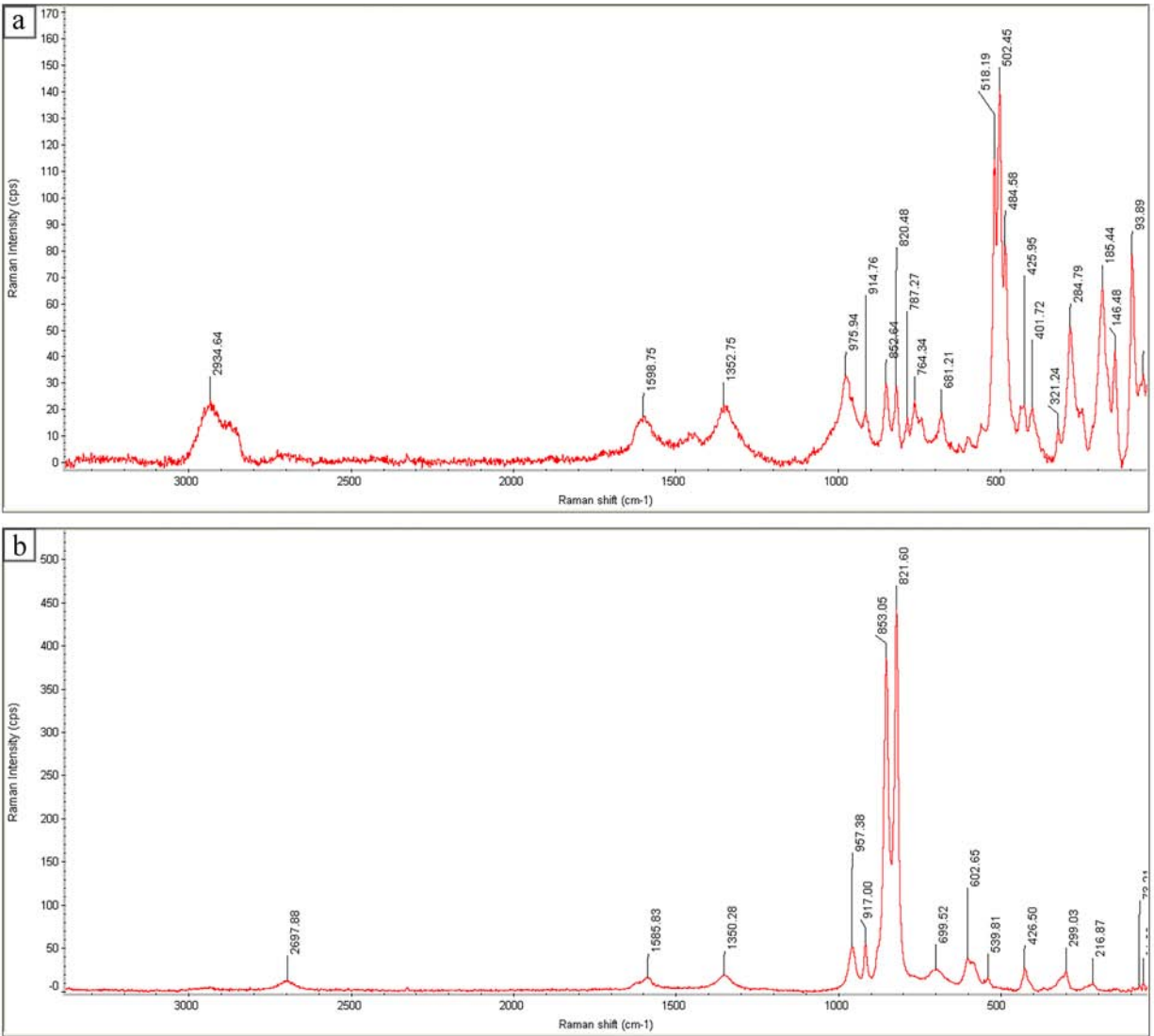


Figura 16. Espectros obtenidos con microRaman sobre los cristales de a) plagioclasa, con bandas en 975.94, 502.45 y 185.44 cm^{-1} y b) olivino, con bandas en 853.05 y 821.6 cm^{-1} .

Posteriormente, comparamos los resultados de los análisis del olivino obtenidos por MEB y microRaman. Se utilizó el diagrama de Chopelas (1991) en donde se muestra la variación de la frecuencia microRaman característica en función de la proporción de cationes de Fe y Mg en los olivinos. Para ello se utiliza las proporciones de Fo y Fa en el olivino obtenidas por MEB y con ellos se calcula el valor M de la siguiente manera:

$$M = (\text{Masa atómica de Mg})(\%Fo/100) + (\text{Masa atómica de Fe})(\% Fa/100)$$

$$M = (24.3)(\%Fo/100) + (55.8)(\% Fa/100)$$

Partiendo de los proporciones de Fo y Fa reportados en la Tabla 2, obtuvimos los valores del parámetro M que se reportan en la Tabla 3. También se reportan las frecuencias (ν_1 , ν_2 y ν_3) obtenidas en el espectro microRaman.

Tabla 3. El valor M calculado a partir de proporciones de Fo y Fa de los cristales de los condros 17 y 11 y sus frecuencias características (ν_1 , ν_2 y ν_3).

Condro	17-1	17-2	11-2
Fo	92.8	92.2	95.2
Fa	7.2	7.8	4.8
M	26.5	26.8	25.9
$1/\sqrt{M}$	0.19	0.19	0.20
ν_3	852.59	852.81	853.05
ν_2	820.72	820.93	821.6
ν_1	425.05	423.3	432.02

La Figura 17 muestra que las frecuencias obtenidas en microRaman coinciden con las frecuencias esperadas a partir de los resultados obtenidos por MEB en cuanto a la relación Fe/Mg.

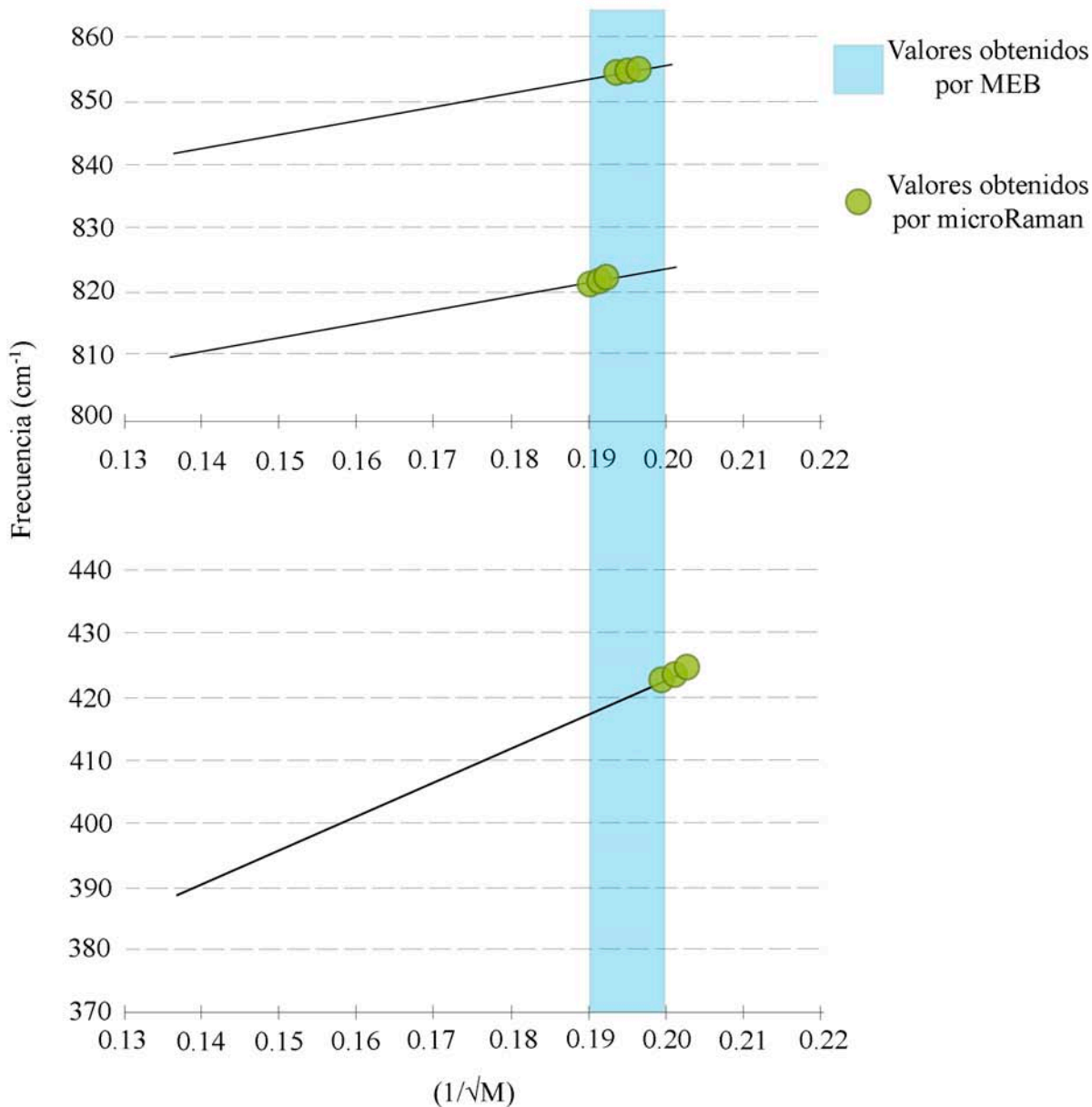


Figura 17. Masa ($1/\sqrt{M}$) y frecuencias de los modos vibracionales. Las líneas sólidas representan las variaciones en la frecuencia en función de la relación Fe/Mg de la muestra (Chopelas, 1991). M es la proporción en masa de cada catión. La zona azul marca los valores esperados a partir de los resultados de MEB. Los círculos verdes son los resultados obtenidos por microRaman.

3.1.3 Análisis de condro total por medio de FRX

El análisis de condro total está compuesto por dos partes: la primera en el cálculo de la composición del condro total, partiendo de los análisis obtenidos en la microsonda para un condro; y la segunda parte consiste en utilizar esos resultados para obtener la composición del resto de los condros con los análisis realizados con el equipo SANDRA.

3.1.3.1 Cálculo de la composición del condro total como estándar

Para generar un estándar interno que ayude a obtener análisis por fluorescencia de rayos X puntual, se eligió el condro 15 por presentar una morfología promedio de todos los condros estudiados, es decir su tamaño, forma y el contenido de matriz y barras de olivino representan bien el promedio del resto de los condros.

Partiendo de la aproximación de que el total del volumen del condro está compuesto por olivino y vidrio en la mesostasis, calculamos el porcentaje en área de vidrio y olivino contenido en el condro por medio del programa Image Pro. Por este método se obtuvo que del total del volumen del condro el 50.5% es vidrio y el 49.5% está compuesto por olivino.

Para saber la masa de olivino y vidrio que tenemos en el condro se multiplicó la densidad, 2.6 g/cm^3 para el vidrio y 3.8 g/cm^3 para el olivino (Klein y Philpotts, 2013), por la fracción de volumen que representa cada fase.

$$\begin{array}{cc} \text{Vidrio} & \text{Olivino} \\ \left(2.6 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right) (50.5\%Vol) = 131.04 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \%Vol & \left(3.8 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right) (49.5\%Vol) = 188.1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \%Vol \end{array}$$

Después normalizamos el peso de cada fase a partir del peso total :

$$\text{Vidrio} + \text{Olivino} = 131.04 \frac{g}{cm^3} \%Vol + 188.1 \frac{g}{cm^3} \%Vol$$

$$\text{Vidrio} + \text{Olivino} = 319.14 \frac{g}{cm^3} \%Vol$$

$$\text{Peso de vidrio normalizado} = \frac{131.04 \frac{g}{cm^3} \%Vol}{319.14 \frac{g}{cm^3} \%Vol}$$

$$\text{Peso de vidrio normalizado} = 0.4106$$

$$\text{Peso de olivino normalizado} = \frac{188.1 \frac{g}{cm^3} \%Vol}{319.14 \frac{g}{cm^3} \%Vol}$$

$$\text{Peso de olivino normalizado} = 0.5893$$

Finalmente, calculamos el contenido en porcentaje en peso del óxido de cada elemento para el total del condro (%W_T) a partir del contenido de ese óxido en el vidrio (%W_V) y en el olivino (%W_O) considerando la fracción del peso total que cada fase representa en el condro:

$$(\%W_V)(0.4106) + (\%W_O)(0.5893) = \%W_T$$

El contenido de cada óxido calculado para el condro total se presenta en la siguiente tabla :

Tabla 4. La concentración en porcentaje en peso (% Wt) de cada óxido para el condro total calculado a partir de las concentraciones para cada fase obtenidas por los análisis en microsonda.

	Vidrio	Olivino	Condro total
Densidad (g/cm ³)	2.6	3.8	
Vol%	50.4	49.5	99.9
Wt.	131.0	188.1	319.1
Wt. Normalizado	0.411	0.589	1.000
Concentración (% Wt)			
	Vidrio	Olivino	Condro total
SiO ₂	47.113	42.243	44.243
TiO ₂	0.503	0.014	0.215
Al ₂ O ₃	21.777	0.111	9.007
FeO	1.234	5.992	4.038
MnO	0.034	0.099	0.072
MgO	13.139	52.285	36.212
CaO	15.478	0.107	6.418
Na ₂ O	1.385	0.007	0.573
Cr ₂ O ₃	0.336	0.132	0.216
NiO	0.017	0.006	0.011
K ₂ O	0.031	-	0.013
P ₂ O ₅	0.230	-	0.094
SO ₃	0.020	-	0.008
Total			101.119

3.1.3.2 Composición de los condros con los resultados de SANDRA

Puesto que el equipo SANDRA es un dispositivo portátil representa una gran ventaja su uso, ya que no requiere de una previa preparación del material y puede ser utilizado en muestras que miden desde algunas decenas de micras hasta metros. Sin embargo esto está limitado por diámetro del haz de rayos X del equipo.

Los espectros sobre los condros analizados con el equipo SANDRA de FXR, y posteriormente tratados con el programa AXIL, muestran una concentración en porcentaje en peso una vez que son comparados con los resultados de los contenidos elementales del estándar. Si se conoce la concentración de un elemento en el material de referencia (C'), entonces se puede relacionar con la intensidad de ese elemento en el espectro de FRX (I'), puesto que la intensidad de un elemento es directamente proporcional a la concentración del mismo en la muestra (Als-Nielsen y McMorrow, 2011).

De esta manera, partiendo de la intensidad en el espectro para cada elemento de una muestra (I) que se quiere analizar se puede calcular la concentración de ese elemento en la muestra (C). Suponiendo que el material analizado es muy parecido al material utilizado como estándar por lo cual, las correcciones por matriz no son significativas (Rousseau *et al.*, 1996). En consecuencia, podemos relacionar las intensidades del estándar y la muestra con las concentraciones de cada elemento mediante la ecuación:

$$C'I' = CI$$

El estándar utilizado fue la composición de condro total calculada previamente para el condro 15. Las concentraciones en porcentaje en peso de cada elemento para cada condro se reportan en la Tabla 5:

Tabla 5. Concentraciones de cada elemento en porcentaje en peso (%Wt) para el estándar y la concentración calculada para cada condro. En gris se muestra el valor máximo registrado por cada elemento.

Muestra	Concentración (% wt)												
	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Zn
Estandar	21.8	2.38	20.7	0.021	0.003	0.031	4.59	0.129	0.074	0.056	3.14	0.008	0.004
Condro 6	36.9	1.16	20.4	-	0.034	0.007	2.03	0.108	0.101	0.037	2.64	0.011	-
Condro 7	23.2	1.26	18.9	-	0.043	0.007	1.65	0.105	0.099	0.047	3.23	0.014	0.0018
Condro 8	89.2	4.93	15.8	-	0.023	0.318	1.06	0.069	0.091	0.051	2.76	0.011	0.0025
Condro 9	37.4	2.18	18.3	-	0.029	0.01	1.38	0.081	0.104	0.053	3.65	0.011	0.0021
Condro 10	97.1	1.62	22.7	-	0.033	0.012	1.23	0.113	0.115	0.04	1.87	0.011	0.002
Condro 11	59.1	1.74	18.1	-	0.034	0.003	0.98	0.077	0.115	0.041	2.77	0.013	0.0016
Condro 12	17.9	1.84	20.2	-	0.109	0.014	2.20	0.126	0.152	0.044	3.64	0.018	0.0018
Condro 13	41.2	1.96	18.6	-	0.036	0.008	1.67	0.115	0.095	0.039	2.89	0.011	0.0026
Condro 14	14.4	1.88	16.5	-	0.07	0.005	1.17	0.075	0.119	0.067	4.69	0.018	0.002
Condro 15	21.9	2.38	20.7	-	0.02	0.026	4.59	0.129	0.074	0.056	3.14	0.008	0.004
Condro 16	36.5	2.21	19.5	-	0.031	0.017	2.12	0.135	0.11	0.058	3.23	0.012	0.0049
Condro 17	73.6	1.22	24.4	-	0.007	0.008	2.13	0.12	0.112	0.089	2.19	0.001	0.001
Condro 18	45.5	1.55	21.1	-	0.032	0.007	1.72	0.124	0.107	0.054	3.58	0.012	0.0028
Condro 20	42.5	1.28	18.9	-	0.048	0.005	1.02	0.097	0.129	0.044	3.23	0.015	0.0016

El hierro total de cada condro fue separado en dos fases: i) el hierro formando troilita (FeS), haciendo una asociación 1/1 del contenido de azufre y hierro y ii) el hierro formando kamacita (FeNi), haciendo una asociación 1/1 del contenido de níquel y hierro. Para asignar el contenido de Fe asociado a cada fase mineral, consideramos la proporción que representa la masa atómica de cada elemento $p(E)$ en la masa molecular, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$p(S) = \frac{Fe}{S} = \frac{55.85}{32.05} = 1.74$$

$$p(Ni) = \frac{Fe}{Ni} = \frac{55.85}{58.69} = 0.95$$

A partir de la proporción de cada elemento, respecto al peso molecular, calculamos el Fe necesario para formar la fase mineral a partir del contenido de S y Ni. Multiplicando el contenido de cada elemento por la proporción que representan en la fase mineral se obtiene, en cada condro analizado, la cantidad de Fe asociado a S y Ni, como se muestra en la Tabla 6.

Conociendo la cantidad de Fe asociado a S y Ni, consideramos el Fe restante formando óxido ferroso (FeO) puesto que no contamos con un medio para diferenciar entre sus distintos estados de oxidación (Tabla 6).

Para calcular el porcentaje en peso del Mg como MgO hicimos el cálculo de la masa que el átomo de Mg representa en la molécula de MgO, tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$p(Mg) = \frac{Mg}{MgO} = \frac{24.3}{40.3} = 0.603$$

Tabla 6. El contenido de hierro total fue separado en el Fe contenido en: i) kamacita (FeNi), asociándolo con el contenido de Ni. Fe en FeNi = (% wt Ni) (0.95), y ii) Troilita (FeS) asociando el Fe con el contenido de S. Fe en FeS = (% wt S) (1.74). Óxido ferroso (FeO) restando el contenido en kamacita y troilita al contenido de Fe total.

Muestra	Concentración (% wt)		
	FeNi	FeS	FeO
Olivino Ho.	0.02	0.05	3.98
Condro 6	0.02	0.09	3.31
Condro 7	0.03	0.12	4.04
Condro 8	0.02	0.06	3.49
Condro 9	0.02	0.08	4.62
Condro 10	0.02	0.09	2.33
Condro 11	0.03	0.09	3.48
Condro 12	0.04	0.30	4.41
Condro 13	0.02	0.10	3.63
Condro 14	0.04	0.19	5.86
Condro 15	0.02	0.05	3.98
Condro 16	0.02	0.08	4.07
Condro 17	0.01	0.02	2.81
Condro 18	0.02	0.09	4.52
Condro 20	0.03	0.13	4.03

Posteriormente, calculamos el porcentaje en peso del Mg como MgO mediante la ecuación:

$$\% MgO = \frac{\% Mg}{0.85}$$

De esta manera, calculamos el porcentaje en peso de MgO en las muestras de olivino de nuestro estándar y en cada uno de los condros (Tabla 7).

Tomando el valor de contenido de FeO y MgO para cada muestra, calculamos el número de magnesio (#Mg). El número de magnesio es un parámetro que refleja el grado de evolución de

un mineral; un número de magnesio cercano a 100 representa un mineral poco evolucionado.

Estos valores nos permiten tener una referencia del grado de evolución de los olivinos.

Tabla 7. El número de magnesio de cada muestra se calculó a partir de los contenidos de FeO y MgO.

Muestra	FeO (%Wt)	MgO (%Wt)	#Mg
Estándar	3.984	36.219	90.09
C.BO.A*			93.0
C.BO.A**			94.8
Condro 6	3.308	61.336	94.88
Condro 7	4.039	38.403	90.48
Condro 9	4.622	62.064	93.07
Condro 11	3.475	97.919	96.57
Condro 12	4.409	29.849	87.13
Condro 13	3.625	68.252	94.96
Condro 14	5.864	23.843	80.26
Condro 15	3.984	36.219	90.09
Condro 16	4.068	60.608	93.71
Condro 18	4.524	75.532	94.35
Condro 20	4.032	70.436	94.58

#Mg = $100 \times (\text{MgO} / \text{MgO} + \text{FeO})$.

C.BO.A* : Valores del #Mg calculado para los condros barrados de olivino presentes en Allende por Simon Haggerty (1980)

C.BO.A** : Valores del #Mg calculado para los condros barrados de olivino presentes en Allende por Rubin y Wasson (1987).

Como resultado obtuvimos valores de #Mg para la composición de condro total calculada para el estándar, que son muy parecidos a los reportados en la literatura (Simon y Haggerty, 1980; Rubin y Wasson, 1987). Lo mismo sucedió con los valores obtenidos para el resto de los condros a partir del cálculo de los contenidos de Mg y Fe realizados con los datos aportados por SANDRA.

3.2 Identificación rápida de meteoritas

De los análisis químicos elementales por FRX en las meteoritas se obtuvieron los contenidos de Fe y Ni (Tabla 8). A partir de las concentraciones de Fe y Ni realizamos una gráfica de dispersión (Figura 18). Considerando que la intensidad de un elemento en el espectro de FRX es directamente proporcional a la concentración del elemento en la muestra, tomamos en cuenta el número de cuentas registradas para Fe y Ni sin hacer una conversión a porcentaje en peso. Con ello eliminamos la necesidad de un estándar que fuera muy parecido a cada una de las muestras y como resultado obtuvimos un método de análisis químico semicuantitativo para una identificación rápida inicial que ayude a descartar pseudometeoritas versus meteoritas.

Tabla 8. Intensidad de FRX en número de cuentas registradas por los detectores del equipo SANDRA para el Ni y Fe en las diferentes muestras.

Muestra	Ni (Cuentas)	Fe (Cuentas)
Catorce	47448	1354059
Cañon Diablo	70417	1337194
Shikote	45485	1374603
Campo Cielo	114148	1253988
Brenham	101615	1403110
Aldama 1	27440	719342
Aldama 2	27122	755522
Muestra 2	356	297246
Muestra 1	221	36106

En la Figura 18 el contenido de Fe y Ni en las meteoritas mostró una concentración alta, agrupando a las muestras en la zona superior derecha del diagrama (campo azul). Las concentraciones más altas se encontraron en la fase metálica de la pallasita, seguidos de los

fragmentos de las meteoritas metálicas y posteriormente los granos metálicos de la condrita Aldama. Por el contrario, las posibles meteoritas que se evaluaron mostraron bajos contenidos de Fe y Ni en comparación con las meteoritas. Estas muestras presentaban características físicas que tales como raya negra y dureza similar a 6 indica que una de éstas muestras es un fragmento de magnetita y el otro con raya roja y dureza alrededor de 5 es un fragmento de hematita. Estas dos muestras se agruparon en un campo aparte (campo verde) en la esquina inferior izquierda (Figura 18). Estos resultados muestran una clara diferencia en el contenido de Fe y Ni de una meteorita.

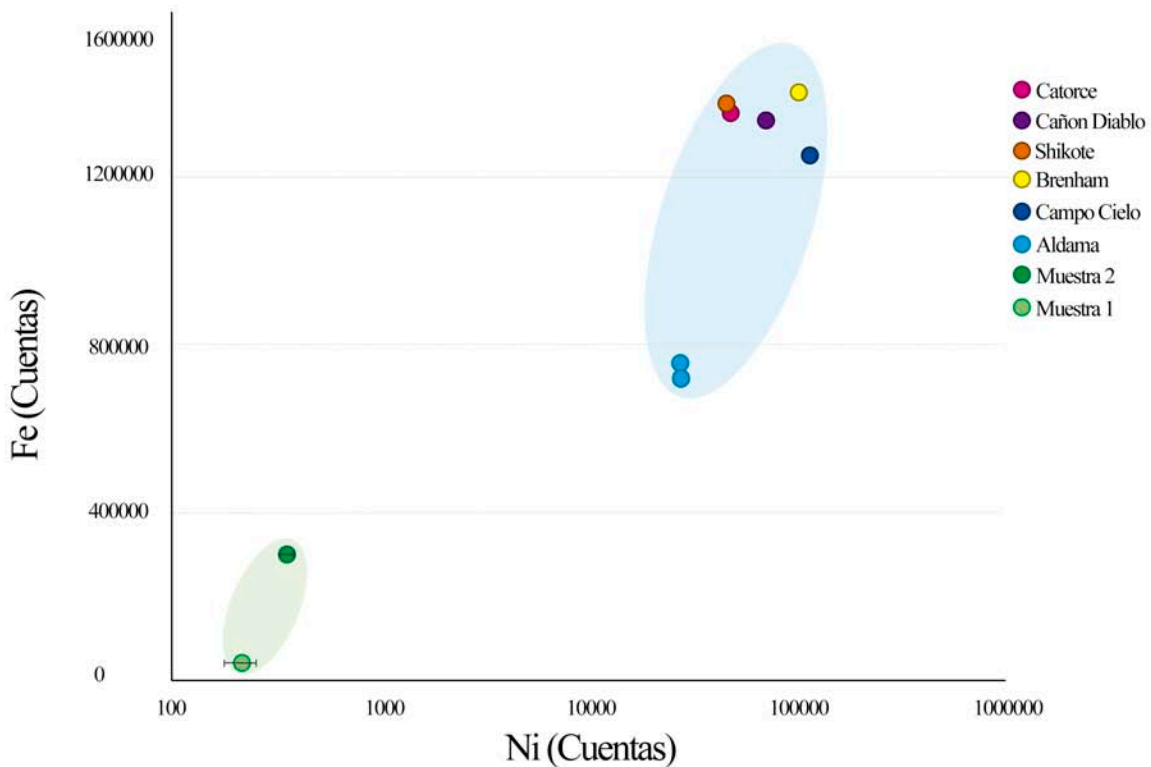


Figura 18. Relaciones de Fe/Ni para meteoritas y pseudo meteoritas. En la gráfica se muestran los contenidos de Fe y Ni para cada muestra, obtenidos con el equipo SANDRA. En verde se muestra el campo donde se encuentran los valores de los fragmentos a evaluar. Estos fragmentos muestran un bajo contenido de Fe y Ni. En azul se muestra el contenido de Fe y Ni de los fragmentos de meteoritas. Los contenidos de Fe y Ni en las meteoritas muestran una clara diferencia con los contenidos de esos elementos en los fragmentos a evaluar.

CAPÍTULO IV

Discusión de resultados y conclusiones

4.1 Discusión

4.1.1 Caracterización morfológica

La distribución unimodal de los datos del ancho de las barras de los condros de la meteorita Allende indican que los condros barrados de olivino (BO) presentan un ancho de barra típico de entre $5\mu\text{m}$ y $10\mu\text{m}$. Estos resultados son comparables con los obtenidos por Cervantes de la Cruz *et al.*, (2015), en donde se obtienen resultados similares para la condrita Nuevo Mercurio (H4, S1). Estos autores sugieren que el ancho de las barras está relacionado con la energía de formación de los condros. Existen otros trabajos donde se midieron características morfológicas, como el ancho del borde de los condros barrados de olivino (Gooding y Keil, 1981) y sus diámetros (Clarke *et al.*, 1970), con el fin de buscar una relación entre la morfología de los condros y el ambiente de su formación. Sin embargo, éste es el primer trabajo donde se cuantifica el ancho típico de los cristales de los condros barrados de olivino presentes en la meteorita Allende.

También se puede ver que la mayoría de las barras son discontinuas. Se desconoce a qué se debe el tipo de crecimiento de las barras, sin embargo, se puede ver en la Figura 11 que las barras radiales y discontinuas son las más abundantes en el grupo con un ancho entre $5\mu\text{m}$ y $10\mu\text{m}$. Por esa razón podemos pensar que, si el tipo de crecimiento está relacionado con el ancho, y éste a su vez se relaciona con la energía de formación de los cristales, entonces el tipo de crecimiento también guarda relación con la energía del evento que originó los condros.

4.1.2 Caracterización mineralógica

Partiendo de los resultados de MEB y microRaman las barras están compuestas por olivino rico en magnesio. Además de este mineral, en algunos casos puede haber clinopiroxenos y algunos minerales accesorios como plagioclasas.

Las variaciones en las frecuencias de las bandas características en los espectros del olivino obtenidas por microRaman pueden deberse a variaciones en las proporciones de Fe/Mg de los cristales (Chopelas 1991). Lo anterior se comprueba al ver que, los valores obtenidos por microRaman coinciden con el valor que la frecuencia que un cristal de olivino debería mostrar debido a las proporciones de Fe/Mg obtenidas por MEB (Figura 16).

Con respecto a las regiones con plagioclasa, la presencia de este mineral fue corroborado tanto por EDS como por espectroscopía microRaman. Su composición rica en albita sugiere que no pueden ser granos relictos.

4.1.3 Análisis de condro total

El resultado del número de magnesio (#Mg) obtenido para el estándar a partir de los análisis realizados por microsonda es de 90.09. Resultado es muy cercano al número de magnesio de 93.0 que reportan Simon y Haggerty (1980) y de 94.8 reportado por Rubin y Wasson (1987), ambos resultados obtenidos en condros barrados de olivino de la meteorita Allende.

Por otra parte, el número de magnesio calculado para los condros de nuestras muestras a partir de los análisis realizados con el equipo SANDRA oscila entre valores que van desde 80.26 hasta 96.57. Sin embargo estos resultados siguen siendo muy aproximados tanto al número de magnesio obtenido para el estándar, como al reportado en la literatura. Este resultado es

compatible si pensamos que un número de magnesio alto corresponde a este tipo de olivinos primitivos ricos en magnesio (Clarke *et al.*, 1970, Amelin *et al.*, 2002, Connelly *et al.*, 2012).

Con respecto a la diferencia entre los números de magnesio calculados con los análisis obtenidos por FRX, pensamos que es el resultado de la morfología misma que presentan los condros. Es decir, debido a que su morfología es tan diversa, la distribución de olivino en el área total del análisis es diferente a la del condro utilizado como estándar.

Para mejorar los resultados obtenidos por FRX con el equipo SANDRA es necesario hacer un estudio sobre la distribución del vidrio y olivino en una muestra representativa de condros barrados de olivino presentes en la meteorita Allende y refinar la forma de adquisición de datos del equipo SANDRA para concentrar el haz en una zona más acotada al condro.

4.2 Identificación de meteoritas

Los elementos más usados para distinguir entre los diferentes grupos de meteoritas son el manganeso (Mn), el silicio (Si) y el magnesio (Mg) (Daviau *et al.*, 2012). Sin embargo, al graficar la intensidad registrada en el espectro obtenido por el equipo SANDRA de Fe y Ni de las meteoritas y las muestras de rocas terrestres, se marcan dos campos claramente separados. Esa diferencia separa las rocas terrestres de las meteoritas debido al alto contenido de Fe y Ni en los cristales de los minerales metálicos presentes en meteoritas (Weisberg *et al.*, 2006).

De los resultados obtenidos podemos concluir que la técnica de FRX con el equipo SANDRA ofrece un método de identificación rápida de meteoritas que, con un estudio más detallado de todos los grupos de meteoritas, permitirá la formación de una base de datos para la identificación y clasificación preliminar de cualquier muestra de roca extraterrestre. Además ofrece una discriminación cuantificable de muestras que no son meteoritas.

4.1.4 Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos fue posible cumplir con los objetivos planteados: i) Caracterizar morfológica y mineralógicamente los condros BO presentes en la meteorita Allende, empleando métodos de análisis no destructivos, ii) generamos un estándar que permite obtener la composición química total de los condros BO a partir de la técnica no destructiva de FRX, iii) desarrollamos una metodología que permite estudiar los condros BO usando el equipo portátil SANDRA, iv) implementando ese mismo equipo, desarrollamos un método alternativo que permite identificar si una roca es una meteorita. Cabe resaltar que en este trabajo se presenta por primera vez un estudio sobre el ancho de las barras de los condros presentes en la meteorita Allende. Finalmente podemos formular las siguientes conclusiones:

- 1) El ancho característico de las barras de olivino de los condros presentes en la muestra de la meteorita Allende estudiada se encuentra entre 5-10 μm . Este ancho es similar al de la condrita Nuevo Mercurio. Esto puede ser un rasgo común de los condros BO.
- 2) Los valores de los análisis químicos y microRaman de los olivinos coinciden con los reportados en la literatura, esto sugiere que el ancho de las barras de olivino no se deben a su composición sino a las condiciones físicas de su formación.
- 3) Sin embargo, aún no se sabe qué causa que el ancho de las barras de olivino sea tan similar en condros BO de diferentes meteoritas. De ser posible contestar esta pregunta, se conocería más acerca de las regiones donde los condros se formaron, que debieron ubicarse en la región entre Mercurio y Júpiter.
- 4) La presencia de plagioclasas en la mesostasis fue confirmada y su composición rica en albita sugiere que no son granos relictos.

5) Adicionalmente, se implementó un método por FRX *in situ* para la identificación rápida de posibles meteoritas. La ventaja del método es que puede analizar muestras mayores a algunas decenas de micrómetros sin un límite superior y es no destructivo.

REFERENCIAS

Allègre, C.J., Manhès, G. y Göpel C., 1995. The age of Earth. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 59, p. 1445-14956.

Als-Nielsen, Jens y McMorrow, Des, 2011. *Elements of modern X-ray physics*, Segunda edición. Ed. John Wiley & Sons, Ltd Publication. United Kingdom. p. 2-3.

Ángeles, S., Reyes, A.M., Macías, C., Ortega, F., 2010. Estudio mineralógico de la meteorita pacula por microscopia electrónica de barrido. *Acta Microscopica*, v. 19, p. 44-50.

Amelin, Y., Krot, A.N., Hutcheon, I. D., Ulyanov, A.A., 2002. Lead isotopic ages of chondrules and calcium-aluminum-rich inclusions . *Science*, v. 297, p. 1678-1683.

Bell, J. F., 1988. A probable asteroidal parent body for the CV or CO chondrites. *Meteoritics*, v. 23, p. 256-257.

Bischoff, A., 2001. Meteorite classification and the definition of new chondrite classes as a result of successful meteorite search in hot and cold deserts. *Planetary and Space Science*, v. 49, p. 769–776.

Burcham, W. E., 2003. *Física nuclear*. Ed. Reverté. España. pp. 3-12.

Burchell, M.J., Mann, J., Creighton, J.A., Kearsley, A.T., Graham, G.A., Esposito, A.P., Franchi, I.A., Westphal, A.J., Snead, C., 2004. Identification of minerals and meteoritic materials via Raman techniques after capture in hypervelocity impacts on aerogel. *Meteoritic and Planetary Science*, v.41, p. 217-232.

Castaing, R. y Guinier, A., 1950, Application des sondes électroniques a l'analyse metallographique, First International Conference on Electron Microscopy, 1949, Delft, p. 60–63.

Cervantes-de la Cruz, K.E. Tesis Doctoral "Estudio petrológico de los condros de las meteoritas condriticas mexicanas cuartaparte, cosina, y nuevo mercurio: origen y evolución de dichas estructuras", Universidad Nacional Autónoma de México (2009).

Cervantes-de la Cruz, K. E., Ortega-Gutiérrez, F., Segura, A., 2015. Bar Size Tendency of Barred Olivine Chondrules. 78th Annual Meeting of the Meteoritical Society, Berkeley, California, EUA. No. 1856.

Chopelas, A., 1991. Single crystal Raman spectra of forsterite, fayalite, and monticellite. *American Mineralogist*. v. 76, p. 1101-1109.

Clarke, Roy S. Jr., Jarosewich, E., Mason, B., Nelen, J., Gómez M., Hyde, Jack R., 1970. The Allende, Mexico, Meteorite Shower. *Smithsonian Contribution to the Earth Sciences*, v. 5, p. 1-53.

Connelly, J. N., Bizzarro, M., Krot, A. N., Nordlund, Å. Wielandt, D., Ivanova M. A., 2012. The Absolute Chronology and Thermal Processing of Solids in the Solar Protoplanetary Disk. *Science*, v. 338, p. 651-655.

Cuzzi J.N. y Conel M.O'D. A., 2006. Chondrule formation in particle-rich nebular regions at least hundreds of kilometers across. *Nature*, v. 441, p. 483-485.

Davis A.M., Richter, F. M., 2003. Condensation and evaporation of solar system materials, *Treatise on Geochemistry*. Vol. 1: Meteorites, Comets, and Planets, Ed. Oxford: Elsevier-Pergamon. Amsterdam. pp.143-200.

Daviau, K.C., Mayne, R.G., Ehlmann, A.J., 2012. An XRF study of meteorites. 43rd Lunar and Planetary Science Conference, The Woodlands, Texas, EUA. No.1659.

Dauphas, N., Chaussidon, M., 2011. A perspective from extinct radionuclides on a young stellar object: The sun and its accretion disk. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, v. 39, p. 351–386.

DeMeo, F. C., Carry, B., 2014. Solar System evolution from compositional mapping of the asteroid belt. *Nature*, v. 505, p. 629-634.

Edwards, H. G. M., Newton, E. M., Dickensheets, D. L., Wynn-Williams, D. D. 2003. Raman spectroscopic detection of biomolecular markers from Antarctic materials: evaluation for putative Martian habitats. *Spectrochimica Acta*, v. 59, p. 2277-2290.

Frezzotti, M.L., Tecce, F., Casagli, A., 2012. Raman spectroscopy for fluid inclusion analysis. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 112, p. 1-20.

Goldreich, P. y Ward, W. R., 1973. The Formation of Planetesimals. *Astrophysical Journal*, v. 183, p. 1051-1062.

Goldstein, J., Newbury, D., Joy, D., Lyman, C., Echlin, P., Lifshin, E., Sawyer, L., and Michael, J., 2003. *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*, Tercera edición. Kluwer Academic/Plenum Publishing, New York.

Gooding, J.L., Keil, K., 1981. Relative abundances of chondrule primary textural types in ordinary chondrites and their bearing on conditions of chondrule formation. *Meteoritics*. v.16, p. 17-43.

Gradie, J., Tedesco, E., 1982. Compositional Structure of the Asteroid Belt. *Science*, v. 216, p. 1405-1407.

Goto A., Tatsumi Y., 1994. Quantitative Analysis of Rock Samples by an X-Ray Fluorescence Spectrometer (I). *The Rigaku Journal*, v. 11, p. 40-56.

Herndon., J. M. y Herndon, M. A., 1977. Aluminium-26 as a planetoid heat source in the early solar system. *Meteoritics*, v.12, p.459-465.

Higgins, M. D., Herd, C. D., Walton, E. L., 2011. Micro-XRF Study of the Buzzard Coulee Meteorite (resumen), 42 Lunar and Planetary Science Conference, The Woodlands, Texas, EUA, p. 1944.

Hollis , A. J., 1987. Photometric Properties of the Minor Planets: Observations of (4) Vesta in 1985. *Journal of the British Astronomical Association*, v. 97, p. 350-352.

Janssens, K., Van Grieken, R., 2004. Non-destructive microanalysis of cultural heritage materials, *Comprehensive Analytical Chemistry*. Elsevier Science, v. 42, p. 129.

Jarosewich, E., Clarke, Roy S. Jr., Barrows J.N., 1987. The Allende meteorite reference sample. *Smithsonian Contribution to the Earth Sciences*, v. 27, p. 49.

Jones, R.H, Scott D., E.R., 1989. Petrology and thermal history of type IA chondrules in the Semarkona (LL3.0) chondrite. 19th Lunar and Planetary Science Conference. Lunar and Planetary Institute, Houston, EUA. p. 523-536.

Kamei, A., Nakamura, A. M., 2002. Laboratory Study of the Bidirectional Reflectance of Powdered Surfaces: On the Asymmetry Parameter of Asteroid Photometric Data. *Icarus*, v. 156, p. 551-561.

Kieffer, S.W., 1975. Droplet chondrules. *Science*, v. 189, p. 333-340.

King, E. A., Jr., 1969. Meteorite fall at pueblito de Allende, Chihuahua, Mexico: Preliminary information. *Science*, v. 929, p. 163-928.

Klein, C. y Philpotts, A. R., 2013. *Earth Materials, Introduction to Mineralogy and Petrology*, Primera edición. Cambridge University Press. New York.

Lofgren, G. y Lanier, A. B., 1990. Dynamic crystallizations study of barred olivine chondrules. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 54, p. 3537-3551.

Matsuda, H., Nakamura, N., Noda, S., 1990. Alkali (Rb/K) abundances in Allende barred-olivine chondrules: Implications for the melting conditions of chondrules. *Meteoritics*, v. 25, p 137-143.

McSween, H., 1999. *En Meteorites and Their Parent Planets*. Ed. Cambridge Univ. Press, United Kingdom, 1999, pp. 95-100.

Morimoto, N., 1988. Nomenclature of Pyroxenes. *Mineralogy and Petrology*, v. 39, p. 55-76.

Nowell, M.M., Carpenter, J.O., 2007. Multi-Length Scale Characterization of the Gibeon Meteorite using Electron Backscatter Diffraction. *Microscopy Today*, v.15 , p. 6-10.

Peck, J.A., 1983. Chemistry of CV3 Matrix Minerals and Allende Chondrule Olivine. *Meteoritics*, v. 18, p. 373.

Raman, C.V., Krishnan, K.S., 1928. A new class of spectra due to secondary radiation Part I. *Indian Journal of physics*, v. 2, p. 387-398.

Rousseau, R.M., Willis, J.P., Duncan, A.R., 1996. Practical XRF Calibration Procedures for Major and Trace Elements. *X-Ray Spectrometry*, v. 25, p. 179-189.

Röntgen, W.K., 1896. A New Form of Radiation. *Science*, v. 3, p.726-729.

Rubin A.E. y Wasson J. T., 1987 .Chondrules, matrix and coarse-grained chondrule rims in the Allende meteorite: Origin, interrelationships and possible precursor components. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 51, p. 1923-1937.

Ruvalcaba S., J.L., Ramírez M., D., Melo A., V., Picazo, F., 2010. SANDRA: a portable XRF system for the study of Mexican cultural heritage. *X-RaySpectrom*, v. 39, p. 338–345.

Sarrazin P., Blake D., Feldman S., Chipera S., Vaniman D., y Bish D., 2005. Field deployment of a portable XRD/XRF instrument on Mars terrain. *Advances in X-ray Analysis*, 48: 194-203.

Scott, E.R.D., 2007. Chondrites and the Protoplanetary Disk. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, v. 35, p. 577–620.

Simon, S.B. y Haggerty, S.E., 1980. Bulk compositions of chondrules in the Allende meteorite. 11th Lunar and Planetary Science Conference. Lunar and Planetary Institute, Houston, EUA. p. 901-927.

Trieloff, M., Jessberger, E.K., Herrwerth, I., Hopp, J., Fiéni, C., Ghélis, M., Bourot-Denise, M., Pellas, P., 2003. Structure and thermal history of the H-chondrite parent asteroid revealed by thermochronometry. *Nature*, v. 422, p. 502–506.

Tsiganis, K., Gomes, R., Morbidelli, A., Livenson, H., F., 2005. Origin of the orbital architecture of the giant planets of the Solar System. *Nature*, v. 435, p. 459-461.

Van Grieken, R. y Markowicz A., 2001. *Handbook of X-Ray Spectrometry*, Segunda Edición. Ed. Marcel Dekker. New York, EUA, p. 1-36.

Van Schmus, W.R., Wood, J.A., 1967. A chemical-petrologic classification for the chondritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 31, p. 747–765.

Van Schmus, W.R., 1969. The mineralogy and petrology of chondritic meteorites. *Earth-Science Reviews*, v. 5 , p. 145-184.

Vilas, F. y Smith, B.A., 1985. Reflectance Spectrophotometry (~0.5-1.0 μm) of Outer-Belt Asteroids: Implications for Primitive, Organic Solar System Material. *Icarus*, v. 64, p. 503-516.

Von H. F. I., 1941. Farbmessungen an Kleinen Planeten. *Astronomische Nachrichten*, v. 272, p. 127–147.

Walsh, K.J., Morbidelli, A., Raymond, S.N., O'Brien, D.P., Mandell, A.M., 2011. A low mass for Mars from Jupiter's early gas-driven migration. *Nature*, v. 475, p. 206-209.

Weisberg, M.K., McCoy, T.J., Krot, A.N., 2006. Systematics and Evaluation of Meteorite Classification. *Meteorites and the Early Solar System*, v. 2, p. 19-52.

Weselucha-Birczyńska, A. y Żmudzka M., 2008. Micro-Raman spectroscopy characterization of selected meteorites. *Journal of Molecular Structure*, v. 887, p. 253-261.

Wood J.A., 2004. Formation of chondritic refractory inclusions: the astrophysical setting. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 68, p. 4007-4021.

Zellner, B., Tholen, D.J., 1985. The eight-color asteroid survey: Results for 589 minor planets. *Icarus*, v. 61, p. 355-416.