



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**LICENCIATURA EN GEOCIENCIAS**

Escuela Nacional de Estudios Superiores,  
Unidad Morelia

“Análisis petrográfico, de imágenes y dimensional del tamaño de condros  
en condritas CV, H y L.”

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**LICENCIADO EN GEOCIENCIAS**

P R E S E N T A

Concepción Viridiana Galeote Núñez

**DIRECTORA DE TESIS: Dra. María del Sol Hernández Bernal**

Morelia, Michoacán, México.

agosto 2022



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
 ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES UNIDAD MORELIA  
 SECRETARÍA GENERAL  
 SERVICIOS ESCOLARES

**MTRA. IVONNE RAMÍREZ WENCE**  
 DIRECTORA  
 DIRECCIÓN GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR  
**PRESENTE**

Por medio de la presente me permito informar a usted que en la **sesión ordinaria 07** del **H. Consejo Técnico** de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES) Unidad Morelia celebrada el día **06 de abril de 2022**, acordó poner a su consideración el siguiente jurado para la presentación del Trabajo Profesional de la alumna **Concepción Viridiana Galeote Núñez** adscrita a la Licenciatura en **Geociencias** con número de cuenta **417039215**, quien presenta el trabajo titulado: **"Análisis petrográfico, de imágenes y dimensional del tamaño de condros en condritas CV, H y L"** bajo la dirección como **tutora** de la **Dra. María del Sol Hernández Bernal**.

El jurado queda integrado de la siguiente manera:

<b>Presidente:</b>	Dra. Karina Elizabeth Cervantes de la Cruz
<b>Vocal:</b>	Dr. Pedro Corona Chávez
<b>Secretario:</b>	Dra. María del Sol Hernández Bernal
<b>Suplente 1:</b>	Dr. Orlando Hernández Cristóbal
<b>Suplente 2:</b>	M. en C. Felipe García Tenorio

Sin otro particular, quedo de usted.

Atentamente  
 "POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
 Morelia, Michoacán a 29 de julio de 2022.

**DRA. YUNUEN TAPIA TORRES**  
**SECRETARIA GENERAL**

---

CAMPUS MORELIA  
 Antigua Carretera a Pátzcuaro N° 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta  
 58190, Morelia, Michoacán, México. Tel: (443)689.3500 y (55)56.23.73.00, Extensión Red UNAM: 80614  
[www.enesmorelia.unam.mx](http://www.enesmorelia.unam.mx)

### **Agradecimientos institucionales**

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y a la Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Morelia (ENES), por permitirme realizar mis estudios de licenciatura en la máxima casa de estudios. A la licenciatura en Geociencias por cuatro años de mucho aprendizaje y experiencias.

Por la amable revisión de la tesis y sus comentarios y sugerencias que ayudaron a mejorar la claridad del trabajo a los Dres: Karina Elizabeth Cervantes de la Cruz (Presidente), Pedro Corona Chávez (Vocal), María del Sol Hernández Bernal (Secretario), Orlando Hernández Cristóbal (Suplente 1) y al M. en C. Felipe García Tenorio (Suplente 2).

Por el análisis de imágenes y mapeo elemental (MEB y EDS) al Dr. Orlando Hernández Cristóbal.

Al Ing. Dante Arteaga Martínez, responsable del equipo de microtomografía de Rayos X en Juriquilla; Laboratorio Universitario de Microtomografía de Rayos X.

Al Ing. Rufino Lozano Santacruz, responsable del laboratorio de Fluorescencia de Rayos X, Instituto de Geología, UNAM.

Al Dr. Pedro Corona Chávez, por permitirme utilizar el microscopio Olympus BX50, con el que fue posible obtener algunas de las imágenes presentadas en este trabajo.

Al Prof. Andrea Zerboni Università degli Studi di Milano por la muestra del hallazgo Libia.

Por el apoyo financiero para realización del trabajo al proyecto PAPIIT IN114521, “Procesos de mezcla de magmas “mingling y mixing) en plutones paleógenos del suroccidente de México: el Ensamble Plutónico de Arteaga”.

### **Agradecimientos personales**

A mi alma máter la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme la oportunidad de estudiar en sus instalaciones y de conocer excelentes personas.

A mi madre Ma. Guadalupe Núñez Pérez y mi padre Tito Galeote Hernández por darme la vida y darme la oportunidad de estudiar en otro estado e impulsarme a seguir mis sueños, gracias por todo su esfuerzo, por ustedes soy lo que soy hoy en día.

A mi hermana Violeta Enedina Galeote Núñez por darme ánimos en los días más grises, por ser mi compañera y mi confidente, por impulsarme a ser mejor persona.

A mi tía Rosa Icela Núñez Pérez por abrirme las puertas de su casa y apoyarme en todos los sentidos siempre que necesite de ella, por enseñarme a valorar cada cosa que tengo.

A la Dra. María del Sol Hernández Bernal por ser mi guía en este camino, por brindarme su apoyo y su amistad, por compartir su amor por las Geociencias, muchas gracias por tantos consejos.

Al M. en C. Neftalí Razo Pérez por escucharme cuando necesitaba desahogarme, por aconsejarme y ser ese apoyo siempre que lo necesité.

A mis amigas Ihaly y Dulce, gracias por la bonita amistad que hemos construido a lo largo de toda la carrera, por hacer las prácticas de campo menos pesadas y más divertidas, por permitirme ser quien soy, por compartir cada momento de felicidad, frustración, enojo, etc., por apoyarme incondicionalmente en este proceso y la pandemia, gracias por regalarme tantos recuerdos.

A mi amigo Eric García Calderón por ser un gran apoyo y compañía a lo largo de estos años, gracias por inspirarme a ser yo misma, a salir adelante y a esforzarme por lo que me apasiona.

A Oscar Reyes, gracias por ser mi compañero de vida, por apoyarme incondicionalmente en este proceso, por impulsarme y motivarme a superarme cada día más, gracias por tus consejos, y los momentos de felicidad que me regalas.

A familia y amigos que formaron parte de este proceso.

*Dedicado a mi padre Tito Galeote Hernández*

*Y a mi madre Ma. Guadalupe Núñez Pérez.*

# Índice de imágenes

Figura 1.1. Esquematación de los componentes de una condrita ordinaria primitiva; del lado derecho de la imagen se muestran las diferentes texturas que pueden contener los condros. Tomada de (Sears, 2004).....	22
Figura 1.2. Teorías de formación de condros.....	27
Figura 1.3. Procesos de formación de condros ocurridos en la nebulosa solar primitiva. Tomada de (Sears, 2004).....	28
Figura 1.4. Procesos de formación de condros que ocurrieron en los cuerpos parentales. Tomada de (Sears, 2004).....	29
Figura 1.5. Abundancias medias de elementos litófilos normalizados a condritas CI y silicio dispuestos en orden de volatilidad creciente en grupos de condritas. Los refractarios (elementos que se condensan por encima de V) se enriquecen uniformemente en condritas CO, CM, y CV y se empobrecen en condritas H, L y EH. Los elementos moderadamente volátiles (que se condensan por debajo del Mg y Si) están todos empobrecidos en relación con la condrita CI. Estos fraccionamientos están relacionados de manera poco conocida con la formación de CAI y condros. Figura tomada de Scott y Krot (2014) en (Holland & Turekian, 2014).....	31
Figura 1.6. Relaciones elemento/Si característicos de cada grupo de meteoritos condriticos. Cada grupo se organiza a partir del contenido de oxígeno decreciente; el componente refractario está representado por Al; el Mg representa a los silicatos de Mg, el Fe representa al componente metálico y el Na, Zn y S representan a los elementos moderadamente volátiles. Sólo las condritas CI se ajustan con las abundancias fotosféricas indicadas en el lado izquierdo. Figura y descripción tomada de (Lodders et al., 2009).....	33
Figura 3.1: a) Condro barrado de olivino (BO), se puede observar la presencia de un borde de grano grueso (borde ígneo), los minerales presentes en el son los mismos que componen las barras del condro; b y d) condros radiales de piroxeno (RP); c) agregados cristalinos de olivino y piroxeno..	42
Figura 3.2. Distribución y abundancia relativa de tamaño y tipos de condro de la condrita ordinaria Gold Basin.....	42
Figura 3.3. a) Condro criptocristalino (C); b) del lado izquierdo se observa un condro criptocristalino de piroxeno (C), del lado derecho se observa un condro radial de piroxeno (RP); c) condro porfídico de olivino (PO); d) agregado cristalino porfídico de olivino y piroxeno.....	44
Figura 3.4. Distribución y abundancia relativa de tamaño y tipos de condro de la condrita ordinaria El Pozo.....	44
Figura 3.5. a) Condro barrado de olivino (BO); b) condro porfídicos de olivino (PO); c) condro criptocristalino (C) con forma bien definida; d) condro granular de olivino (GO).....	45
Figura 3.6. Distribución y abundancia relativa de tamaño y tipos de condro de la condrita ordinaria NWA 869 - Brecha.....	46
Figura 3.7. a) Condro porfídico de olivino (PO); b) condro granular de olivino y piroxeno; c) condro radial compuesto principalmente de piroxeno (RP).....	47
Figura 3.8. a) Condro barrado de olivino (BO); b) condro porfídico de olivino (PO), c) condro criptocristalino, presenta varias fracturas rellenas del vidrio presente en la matriz (C); d) condro granular principalmente de olivino (GO); e) condro radial de piroxeno (RP).....	48

Figura 3.9. Distribución y abundancia relativa de tamaño y tipos de condro de la condrita ordinaria Nuevo Mercurio.....	49
Figura 3.10. Condro barrado de olivino y piroxeno (BOP), b) a la izquierda e la imagen se puede observar un condro radial de piroxeno (RP), del lado derecho se observan cristales individuales euhedrales de olivino; c) condro granular compuesto principalmente de olivino (GO); d) condro criptocristalino (C) con borde de vidrio; e) condro porfídico de olivino (PO).....	50
Figura 3.11. Distribución y abundancia relativa de tamaño y tipos de condro de la condrita ordinaria Cosina.....	50
Figura 3.12. a) Condro porfídico de olivino (PO) con presencia de oxidación radial; b) condro granular de olivino (GO); c) condro criptocristalino fracturado de piroxeno (C), las fracturas están rellenas óxidos/vidrio; d) condro barrado formado de olivino principalmente (BO).....	52
Figura 3.13. Distribución y abundancia relativa de tamaño y tipos de condro de la condrita ordinaria Aldama.....	52
Figura 3.14. a) CAI ( <i>calcium – aluminium – rich inclusion</i> ); b) condro porfídico de olivino (PO); c) condros granulares de olivino (GO); d) en el lado inferior izquierdo se encuentra un condro porfídico de olivino (PO), del lado derecho de este se encuentra un condro criptocristalino (C).....	53
Figura 3.15. Distribución y abundancia relativa de tamaño y tipos de condro de la condrita carbonácea Allende.....	54
Figura 3.16. a) Condro granular de olivino (GO) con borde de grano fino (acrecional); b) condro radial de piroxeno (RP) sin borde aparente; c) condro radial de olivino (RO) muestra un borde grueso, de grano fino (acrecional).....	55
Figura 3.17. Distribución y abundancia relativa de tamaño y tipos de condro de la condrita carbonácea NWA CV3.....	55
Figura 3.18. a) Condro criptocristalino (C) fracturado, sus fracturas están rellenas de vidrio, también presenta un pequeño borde de color oscuro; b) condros porfídico (P); c) condro barrado (B); d) condros granulares (G); e) agregados cristalinos.....	56
Figura 3.19. Distribución y abundancia relativa de tamaño y tipos de condro de la condrita ordinaria Libia.....	56
Figura 3.20. Concentración elemental de las secciones analizadas.....	57
Figura 3.21. Concentración elemental de los condros de Libia. En el condro #1 la abundancia de Na y Al en las mismas regiones se asocia a la presencia de plg sódica, mientras que el Fe metálico se localiza en granos dispersos formando una corona en el condro. En el condro #2 la abundancia de Si, Mg, y Ca se asocia a presencia de piroxenos y el Fe metálico nuevamente se agrupa como granos al borde del condro.....	58
Figura 4.1. A) plagioclasa representada en gris. B) red esquelética coloreada donde los colores más cálidos simbolizan los segmentos más gruesos. Figura tomada de (Hanna & Ketcham, 2017).....	61
Figura 4.2. Imagen de MTRX de la condrita Libia, las áreas blancas corresponden al Fe-Ni metálico, señalados por las flechas rojas.....	62
Figura 4.3. Las fases minerales que se representaron en 3D en la condrita Libia, son cristales de Fe-Ni.....	63



- Figura 4.4. a) Se utilizó la herramienta *Draw Line Region* para conocer los valores de vóxel de la región de interés. b) se puede observar en la gráfica los valores de vóxel se encuentran entre  $3.2 \times 10^4$  –  $4.2 \times 10^4$  voxeles, sin embargo, con este último valor, había algunas regiones que no quedaban cubiertas, por lo que se optó por aumentar el valor hasta  $4.4 \times 10^4$  ..... 63
- Figura 4.5. a) las áreas rojas muestran la identificación del Fe-Ni metálico basado en los valores de vóxel que se introdujeron en la función *General Threshold*; b) estas mismas áreas rojas se muestran en la imagen original, mostrando su posición..... 64
- Figura 4.6. Este blob se encuentra en la esquina inferior izquierda, cuenta con dimensiones de  $0.6 \times 0.3 \times 0.03$  mm..... 64
- Figura 4.7. El blob se encuentra en la parte inferior de la imagen, cuenta con dimensiones de  $0.6 \times 0.3 \times 0.025$  mm..... 65
- Figura 4.8. Este blob se encuentra en la esquina superior derecha, cuenta con dimensiones de  $0.6 \times 0.3 \times 0.05$  mm, este blob cuenta con una pequeña cavidad en la parte central de este, en la imagen original se muestra que en esta cavidad se encuentra una pequeña mancha de color gris, la cual, es otro mineral o bien, dada su forma redonda un fragmento de condro..... 65
- Figura 4.9. Este blob se encuentra en la esquina superior izquierda, cuenta con dimensiones de  $0.3 \times 0.3 \times 0.03$  mm.....66
- Figura 4.10. Este blob se encuentra en la inferior, cuenta con dimensiones de  $0.4 \times 0.3 \times 0.03$  mm..... 66
- Figura 5.1. Distribución relativa del tamaño de condro y media determinada para cada condrita ordinaria H..... 68
- Figura 5.2. Distribución relativa del tamaño de condro y media determinada para cada condrita ordinaria L..... 69
- Figura 5.3. Distribución relativa del tamaño de condros y media determinada de las condritas carbonáceas CV3..... 69
- Figura 5.4. Comparación de los datos presentados en (Friedrich et al., 2015) (líneas azules) con los datos obtenidos en este trabajo (líneas rojas)..... 71
- Figura 5.6. a) Condro reliquia, en la imagen completa, el contorno de este condro es confuso y no se logra distinguir con claridad, por lo que se muestra el contorno con una línea blanca punteada; b) condro “colisionado” por otro condro, la línea roja punteada muestra al condro que fue afectado.. 74
- Figura 5.7. Para la relación Mg/Si, el valor de Libia cae entre los valores de las condritas carbonáceas CM y las condritas ordinarias H (valores graficados a partir de Lodders et al., 2009)..... 77
- Figura 5.8. En el caso de la relación Al/Si, es el único caso en el que los valores obtenidos en ambos laboratorios se encuentran juntos (debido a que el valor del Al no es afectado de la misma forma que el valor de Mg por el contenido de Fe), encontrándose entre los valores de las condritas CV y las condritas H ((valores graficados a partir de Lodders et al., 2009)..... 77
- Figura 5.9. Los valores de la relación Fe/Si caen entre las condritas carbonáceas CI y CO..... 78
- Figura 5.10. Por último, los valores de la relación Al/Mg, cae en medio de los valores de la condrita carbonácea CI y la condrita ordinaria L..... 78
- Figura 5.11. Adicionalmente, se realizó una gráfica Al/Si vs Mg/Si, en las que se puede identificar un patrón, los valores más altos corresponden a los valores de las condritas carbonáceas y los más bajos

- corresponden a los calores de las condritas de enstatita, los valores de LDF – IGF caen entre los valores de las condritas carbonáceas y las condritas ordinarias H; esto puede tener relación con la posición respecto al Sol de cada una de las condrita (Las enstatitas se encuentran más cerca del Sol y las condritas carbonáceas más lejos de él)..... 79
- Figura 5.13. a) condros colisionados de la condrita El Pozo; b) condros colisionados de la condrita Libia. En ambas imágenes el condro afectado se muestra con la línea punteada de color rojo..... 81
- Figura A1.1. Diagrama de clasificación de condros. A) olivinos y B) mesostasis. Tomada de (Sears et al., 1992)..... 94
- Figura A1.2. Esquema de clasificación de las dos grandes clases de meteoritos. Tomada de (Krot et al., 2013)..... 108
- Figura A2.1. a) Histograma de tamaños para los rangos L (longitud) establecidos. Los cristales más gruesos son los menos abundantes. El tamaño de grano disminuye exponencialmente con el número de cristales, lo que corresponde a un sistema estacionario. b) Diagrama semilogarítmico del sistema estacionario anterior en el que la relación entre el logaritmo natural de la densidad de población de tamaños  $[\ln(n)]$  y el tamaño (L) es una línea recta de pendiente negativa..... 113
- Figura A2.2. Coeficiente de atenuación lineal en función de la energía de rayos X para minerales comunes en meteoritos. Tomada de (Hanna & Ketcham, 2017)..... 117
- Figura A2.3. a) El ancho de la trayectoria del haz en la muestra define la resolución espacial de la imagen y es una función del tamaño del punto, s, tamaño del detector, d, fuente muestra – distancia (d), fuente – muestra – distancia (SOD) y fuente – detector – distancia (SDD). b) ampliación geométrica: se coloca la muestra cerca de la fuente, lo que da como resultado una resolución espacial más alta como SOD y, por lo tanto, el ancho de haz se minimiza. c) los elementos detectores son pequeños en comparación con la fuente, por lo que la muestra es colocada cerca del centellador para una resolución máxima. Se utiliza un aumento óptico..... 118
- Figura A2.4. Esquema del microscopio electrónico de barrido (MEB). En este esquema se observan los diferentes componentes. LP: light pipe, F: fotomultiplicador, ORC: osciloscopio de rayos catódicos, CB: generador de barrido, Ba: bobinas de ampliación. Tomado de (Renau-Piqueras & Faura, 1994)..... 122
- Figura A2.5. Los electrones reflejados (BE), emergen siguiendo direcciones distintas a la del haz. Los electrones primarios bombardean orbitales electrónicos de los átomos de la muestra generando electrones secundarios (SE1), de menor energía que los BE. De igual manera los BE pueden coincidir sobre átomos de la muestra produciendo electrones secundarios (SE2). Los electrones absorbidos son los electrones primarios, que penetran en la muestra y permanecen en su interior; en su opuesto, se encuentran los átomos transmitidos, los cuales atraviesan la muestra (solo si la muestra es lo bastante delgada para atravesarla)..... 123
- Figura A2.6. Mecanismo de adquisición de imágenes 3D por microtomografía de rayos X. tomada de (Vega et al., 2018)..... 124
- Figura A3.1. Para este ejemplo se utilizó el mosaico de condrita ordinaria Nuevo Mercurio. Para colocar la escala primero se debe de colocar una línea guía sobre la escala arrojada por el microscopio, esta línea se coloca con la herramienta *Straight*, posteriormente, en el menú principal, se selecciona la ventana *Analyze* y la opción *Set Scale*, en *Know Distance* se coloca el valor de la escala conocida y en *Unit of Length* se coloca las unidades en la que esta la escala, finalmente se selecciona la opción de *Global* y se da en *Ok*, inmediatamente notamos como se asigna la escala en la parte superior de la imagen (rectángulo rojo)..... 127

- Figura A3.2. Para asignar el tipo de imagen, en el menú principal se selecciona la ventana *Image* → *Type* → *8-bit*, automáticamente la imagen se verá en blanco y negro. Este fue el valor que se asignó a cada uno de los mosaicos trabajados..... 127
- Figura A3.3. Para eliminar la parte externa de la imagen se realiza lo siguiente: se debe de seleccionar la figura *Freehand selections* para dibujar una línea por todo el contorno del área de interés, una vez seleccionado el contorno, en el menú principal se selecciona la ventana *Edit* → *Clear Outside* y automáticamente se elimina todo lo que este fuera de ese contorno..... 128
- Figura A3.4. Una vez realizados los tres pasos anteriores, es recomendable guardar el proceso, ya que en el caso de querer volver a realizar el análisis ya no será necesario hacer el proceso desde el inicio. En el menú principal se selecciona la ventana *File* → *Save as* → *BMP*, posteriormente abrirá una ventana en donde se debe de seleccionar la carpeta en la que se desea que se guarde el archivo, así como el nombre que este tendrá, finalmente, se da clic en aceptar..... 128
- Figura A3.5. El siguiente paso consta de seleccionar las partículas a analizar. En la ventana de *Image*, se debe de seleccionar la opción *Adjust*..... 129
- Figura A3.6. En la ventana de *Threshold* aparecerá una gráfica interactiva, en la que se ira seleccionando el umbral que se quiere seleccionar, una vez seleccionado se selecciona la opción *Apply* y quedará una imagen con las regiones de interés..... 129
- Figura A3.7. En la ventaja *Analyze* se encuentra la opción *Analyze particles*, la cual abre una ventana en la que se deben colocar los parámetros de selección de partículas. Para poder determinar los valores del tamaño de interés se hizo un análisis de los tamaños propuestos en Friedrich et. al (2015), la mayoría de sus gráficas reportan como tamaño máximo 3 mm, en nuestro caso se analizaron tamaños desde 0 hasta 3 mm. En *Show* se selecciona la opción de *Ellipses*, para que las partículas sean mostradas de esta manera; los demás parámetros se dejan por *default*..... 130
- Figura A3.8. a) las elipses muestran todas las partículas encontradas a partir de los criterios dados; b) la ventana *Result* muestra las características de cada una de las partículas (eje mayor, eje menor, Angulo, área, etc.); c) la ventana *Summary* muestra toda la estadística del análisis..... 130
- Figura A3.9. La ventana de *Results* y *Summary* deben ser guardadas, ya que a partir de aquí se realizará el análisis de tamaño. En *File* → *Save as* abrirá una ventaja donde debemos seleccionar la carpeta en la queremos que se guarde el archivo, así como el nombre de este. Estos archivos se almacenaras como archivos Excel..... 131
- Figura A3.10. Para poder colocar los datos en el *CSDCorrections* se deben reacomodar. El rectángulo rojo muestra el orden que presenta el software. *Length* y *Width* corresponde a los datos *Major* y *Minor*, respectivamente, obtenidos en *ImageJ*..... 132
- Figura A3.11. Se muestra la pantalla principal de *CSDCorrections*. Aquí se asignarán los parámetros para realizar el análisis bidimensional. Los siguientes parámetros fueron iguales en todos los análisis: En *Shape* se buscan las formas que estén más parecidas a una esfera; en *Fabric* se selecciona la opción *Massive*; *Measurement* se selecciona la opción de *Ellipse Major axis*. *Measured Area 1* (rectángulo azul) y *Correct to* pase *abundance* (rectángulo amarillo) corresponden a los datos de *Total area* y *%Area*, respectivamente, obtenidos en la ventana de *Summary* de *ImageJ*. Una vez ingresados todos los parámetros se realiza el análisis dando clic en *Calculate* (rectángulo verde)..... 133
- Figura A3.12. En la ventana de *Size Results*, los datos que necesitamos son lo que se presentan en el rectángulo rojo, con mayor precisión la primera y segunda columna de esta. *Size inter* corresponde al tamaño dado en milímetro y *Data Set 1* corresponde a la densidad de población, estas columnas son

- las que servirán para realizar las gráficas antes presentadas en la sección de Descripción petrográfica de las condritas estudiadas.....134
- Figura A3.13. a) Load Tiffs abre una ventana en la cual se tendrá que seleccionar la carpeta con las imágenes de tomografía en formato .tiff; b) posteriormente se abrirá la ventana *Input Data Parameters*..... 135
- Figura A3.14. Una vez ingresadas las imágenes se activa el botón de *List Components*, en donde se deben escribir manualmente los componentes que se quieren analizar, en este caso, los sulfuros, la matriz se analizará de manera automática..... 136
- Figura A3.15. A continuación, aparecerán los componentes seguidos de las opciones de los tres pasos antes mencionados, estos botones se irán activando conforme el proceso vaya avanzando..... 136
- Figura A3.16. Ventana de segmentación. En el rectángulo azul se enlistarán todos los filtros que se utilizaran, en la manera en la estén posicionados es la manera que serán ejecutados. *Add filter* se mostrarán todos los filtros que se pueden utilizar. *Edit* permite volver a editar los datos ingresados en cada filtro; *Remove* permite eliminar un filtro; *Deselect* ayuda a deseleccionar un filtro; las flechas permiten desplazar cualquier filtro en la lista. El rectángulo rosa permite visualizar los filtros empleados en el paquete de imágenes CT, si se selecciona la opción *Interactive Display* los cambios se mostrarán de manera automática sin necesidad de completar el proceso. Finalmente, *Process Data Set* (rectángulo rojo) se activará una vez que los datos de salida sean en formato binario..... 137
- Figura A3.17. Ventana *Display*. Esta ventana nos permite visualizar los cambios que se van realizando. *View Mode* (rectángulo azul) permite visualizar la imagen en los distintos ejes (x, y, z); *Slice* (rectángulo amarillo) nos permite visualizar el objeto de interés a lo largo de las diferentes imágenes que se analizan; *ROI Tools* son herramientas que ayudan a identificar los objetos de interés.....138
- Figura A3.18. Para mayor detalle de casa una de las opciones puede consultar el manual en la página. Imagen tomada de (Suazo Cruz, 2020)..... 139
- Figura A3.19. Para obtener más información de cada una de las opciones se recomienda consultar el manual en la página 31. Imagen tomada de (Suazo Cruz, 2020)..... 140

# Índice de Tablas

Tabla 1.1. Clasificación textural de condros. Tomada de (Lauretta, Nagahara, & Alexander, 2006).....	23
Tabla 1.2. Compendio de temperaturas y rangos de enfriamiento de condros. Tomada de Sears (2004).....	25
Tabla 3.1. Características principales de las condritas estudiadas de acuerdo con el (“Meteoritical Bulletin: Search the Database,” n.d.).....	39
Tabla 5.1. Características observadas en las condritas analizadas.....	75
Tabla 5.2. Datos del análisis geoquímico de óxidos elementos mayores. La fila color azul corresponde a los datos obtenidos en el Instituto de Geología, la fila de color naranja corresponde a los datos obtenidos en el Instituto de Geofísica.....	76
Tabla A1.1: Relación de color de CL con el contenido de FeO y CaO de los olivinos y la mesostasis cada grupo. Tomada de (Muñoz - Espadas, 2003; Sears, Jie, Benoit, Dehart, & Lofgren, 1992)....	93
Tabla A1.2. Parámetros taxonómicos para la clasificación de las condritas. Tomada de (Muñoz-Espadas, 2003).....	96
Tabla A1.3. Características de los diferentes grupos de condritas carbonosas. Formada a partir de (Krot et al., 2013; Muñoz-Espadas, 2003).....	97
Tabla A1.4 Tipos petrológicos. Tomada de (Krot, Keil, Scott, Goodrich, & Weisberg, 2013).....	103
Tabla A1.5. Clasificación por metamorfismo de choque (impacto) en condritas. Tomada de (Krot et al., 2013).....	104
Tabla A1.6. Descripción de las diferentes brechas. Tomada de (Krot et al., 2013).....	105
Tabla A1.7. Minerales principales y secundarios de los diferentes tipos de condritas. Formada partir de (Krot et al., 2013; Muñoz-Espadas, 2003).....	109

# Índice General

<b>Resumen:</b> .....	15
<b>Abstract:</b> .....	16
<b>Introducción:</b> .....	17
<b>Justificación:</b> .....	18
<b>Objetivos:</b> .....	19
<b>Objetivos secundarios:</b> .....	19
<b>Capítulo 1: Marco Teórico:</b> .....	20
<b>1.1 Importancia de las condritas:</b> .....	21
<b>1.2 Condros:</b> .....	21
<b>1.2.1 Teorías de formación de condros:</b> .....	26
<b>1.3 Geoquímica:</b> .....	29
<b>Capítulo 2: Metodología:</b> .....	34
<b>Capítulo 3: Resultados: Petrografía:</b> .....	37
<b>3.1 Petrografía y análisis bidimensional:</b> .....	41
<b>3.2 Analisis EDS en la condrita Libia:</b> .....	57
<b>Capítulo 4: Análisis dimensional 3D:</b> .....	59
<b>4.1 Aplicaciones de análisis 3D en el estudio de los meteoritos:</b> .....	60
<b>4.2 Modelo 3D de las fases Fe-Ni metálico en la condrita Libia:</b> .....	61
<b>Capítulo 5: Discusión:</b> .....	67
<b>5.1 Comparación:</b> .....	69
<b>5.2 Condrita Libia:</b> .....	76
<b>Capítulo 6: Conclusiones:</b> .....	83
<b>Referencias:</b> .....	86
<b>Anexo 1: Clasificación de meteoritos:</b> .....	90
<b>A1.1 Condritas:</b> .....	91
<b>A1.1.2 Carbonáceas:</b> .....	96
<b>A1.1.3 Ordinarias:</b> .....	99
<b>A1.1.4 Enstatita:</b> .....	99
<b>A1.1.5 Rumuruti y Kakangari:</b> .....	100
<b>A1.2 Clasificación primaria de condritas:</b> .....	100
<b>A1.2.1 Composición química de roca total:</b> .....	100
<b>A1.2.2 Isotopos, C y N total y abundancia isotópica:</b> .....	101

<b>A1.2.3 Estado de oxidación:</b> .....	101
<b>A1.3 Clasificación secundaria de condritas:</b> .....	101
<b>A1.3.1 Tipo petrológico:</b> .....	101
<b>A1.3.2 Alteración Acuosa:</b> .....	102
<b>A1.3.3 Metamorfismo de choque y brechas:</b> .....	102
<b>A1.3.4 Grado de meteorización terrestre:</b> .....	107
<b>A1.4 Mineralogía:</b> .....	108
<b>ANEXO 2: Técnicas Analíticas:</b> .....	111
<b>A2.1 Fundamentos del análisis dimensional 2D – 3D:</b> .....	112
<b>A2.1.1 Generación de rayos X:</b> .....	113
<b>A2.1.2 Atenuación de Rayos X:</b> .....	115
<b>A2.1.3 Resolución espacial:</b> .....	117
<b>A2.1.4 Parámetros de adquisición:</b> .....	119
<b>A2.1.5 Reconstrucción:</b> .....	119
<b>A2.1.6 Artefactos:</b> .....	120
<b>A2.1.7 Visualización:</b> .....	121
<b>A2.2 MEB o SEM:</b> .....	121
<b>A2.2.1 Características:</b> .....	121
<b>A2.2.2 Señales emitidas:</b> .....	122
<b>A2.3 Espectrometría de rayos X por dispersión de energía (EDS):</b> .....	123
<b>A2.4 Microtomografía de rayos X:</b> .....	124
<b>A2.5 Espectroscopia de Fluorescencia de rayos X (FRX):</b> .....	124
<b>ANEXO 3: Análisis de imágenes:</b> .....	125
<b>A3.1 ImageJ (análisis 2D):</b> .....	126
<b>A3.2 CSD CORRECTIONS:</b> .....	131
<b>A3.3 Blob3D (Análisis 3D):</b> .....	134
<b>Referencias:</b> .....	141

**Resumen:**

El tamaño de los condros permite caracterizar a los diferentes grupos de condritas, ya que cada tipo posee una distribución de tamaños característicos. Se considera que la distribución de tamaño de los condros estuvo controlada por la abundancia de polvo y el número de eventos de calentamiento en diferentes regiones formadoras de condros.

En este trabajo se describieron petrográficamente 6 diferentes muestras de condritas de localidades nacionales (El Pozo, Escalón, Nuevo Mercurio, Cosina, Aldama y Allende) y 4 internacionales (Gold Basin, NWA 869, NWA CV3 y Libia), pertenecientes a la clase ordinaria (tipo H y L) y carbonáceas (tipo CV3). Por medio de análisis bidimensional del tamaño de condros a partir del análisis de imágenes de las muestras en lamina delgada de las condritas, se identificaron diámetros en rangos específicos para cada tipo de condrita: 490 – 580  $\mu\text{m}$  para las condritas H; 580 -700  $\mu\text{m}$  para las condritas L y ~580 – 640  $\mu\text{m}$  para las condritas carbonáceas CV3. En particular, la condrita denominada en el presente trabajo como Libia se describe por primera vez en este estudio.

En esta condrita se identificaron dos rangos importantes de tamaño de condro, el primero (490 – 580  $\mu\text{m}$ ) es semejante con el rango de las condritas H, el segundo (700 – 830  $\mu\text{m}$ ) es similar al rango de las condritas LL.

El análisis contenido de óxidos de elementos mayores posicionó a Libia entre la composición de las condritas H y las condritas carbonáceas. Petrográficamente se encontraron similitudes con las distintas condritas ordinarias H y L, algunas de estas características fueron reafirmadas gracias al análisis elemental EDS.

Basados en la correlación positiva entre la cantidad de Fe-Ni y el contenido de Fe total, es posible identificar si la condrita analizada pertenece al grupo H (< 13% en peso) o L (> 13% en peso) a partir del Fe-Ni metálico. A partir del análisis de imágenes se estimó el contenido de Fe-Ni metálico, obteniendo el 15.75% en peso. A partir de esto y la coincidencia del rango de tamaño de condros, se clasificó a Libia como una condrita tipo H.

A partir de los rasgos petrográficos, el análisis de Fe-Ni metálico y dimensional de los condros se asigna al hallazgo de la condrita Libia la siguiente clasificación preliminar: es



una condrita ordinaria H de tipo petrológico 4 – 6, con una etapa de choque S1 y un grado de meteorización terrestre W1.

El análisis dimensional de los condros provee una herramienta sencilla y rápida para clasificar preliminarmente a una condrita utilizando únicamente imágenes de láminas delgadas, briquetas pulidas y software de acceso libre.

### **Abstract:**

The size of the chondrules allows the description of chondrites, since each type has a characteristic size distribution. It is considered that the size distribution of chondrules in chondrites was controlled by the abundance of dust and the number of heating events in different chondrules-forming regions.

In this work, 6 different samples of chondrites from local sites (El Pozo, Escalón, Nuevo Mercurio, Cosina, Aldama and Allende) and 4 international sites (Gold Basin, NWA 869, NWA CV3 and Libia), belonging to the ordinary class, were petrographically described (type H and L) and carbonaceous (type CV3). By means of a two-dimensional analysis of the size of the chondrules from the analysis of images of the samples in thin films of the chondrites, diameters were identified in specific ranges for each type of chondrite: 490 – 580  $\mu\text{m}$  for the H chondrites; 580 -700  $\mu\text{m}$  for L chondrites and ~580 – 640  $\mu\text{m}$  for CV3 carbonaceous chondrites. The chondrite named in the present work as Libia is described for the first time in this study.

In Libia, two important ranges of chondrule size were identified, the first (490 – 580  $\mu\text{m}$ ) is like the range of H chondrites, the second (700 – 830  $\mu\text{m}$ ) range is similar to that presented by the type of LL chondrites.

The content of oxides of major elements positioned Libia between the composition of H chondrites and carbonaceous chondrites. Petrographically, similarities were found with the different ordinary chondrites H and L; some of these characteristics were supported by the EDS elemental analysis.

Based on the positive correlation between the content of metallic Fe-Ni and the total Fe weight, it is possible to assign whether the chondrite belongs to the H (< 13% by weight) or L (> 13% by weight) group from the metallic Fe – Ni. From image analysis, the metallic

Fe-Ni content was estimated, obtaining 15.75% by weight. From this and the correspondence of the size range of chondrules, Libia was classified as an H-type chondrite.

From the petrographic features, metallic Fe-Ni content, and dimensional analysis of chondrules of the Libia meteorite find, a preliminary classification is assigned: Libia is an ordinary H chondrite of petrological type 4 – 6, with an S1 shock stage and a terrestrial weathering stage W1.

The dimensional analysis of the chondrules provides a simple and rapid tool for a preliminary classification of a chondrite using images of thin slides, polished samples and free access software.

### **Introducción:**

Este trabajo comienza con una descripción de las condritas, su importancia y sus principales componentes, en esta misma sección se describen a los condros, su clasificación y un resumen de las principales teorías de su formación, también se habla un poco de la geoquímica de las condritas, el cual será importante para entender el análisis de óxidos de elementos mayores presentado en la discusión.

Se presentan algunos antecedentes y datos relevantes publicados de cada una de ellas, los cuales posteriormente se utilizarán para comparar los resultados obtenidos en este trabajo. Después, se hace una descripción megascópica y microscópica de cada muestra, se realiza el análisis petrográfico y dimensional de las condritas estudiadas. En esta sección se muestran las gráficas obtenidas de la distribución de tamaños de condros de cada muestra, así como los resultados del estudio Energy-Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS), hechos a la condrita Libia, el cual contribuyó a identificar un componente importante de la matriz.

En la siguiente sección, se describe el análisis 3D de las partículas de Fe – Ni metálico y su arreglo dentro de la condrita Libia.

La discusión se presenta en dos secciones, la primera muestra los resultados de las condritas que ya cuentan con clasificación previa, se muestran gráficas comparativas entre las condritas del mismo grupo, así como con los resultados reportados por otros autores. La segunda sección describe a la condrita Libia, el tamaño de condros observados, las similitudes compartidas con las demás condritas, también se realiza un análisis de abundancia

del Fe – Ni metálico el cual ayudó a encontrar una clasificación más aproximada de la condrita.

Finalmente se presentan las conclusiones, se hace una recopilación de los resultados obtenidos en cada análisis, concluyendo en una clasificación preliminar de la condrita ordinaria Libia. Por último, se hizo una breve reflexión sobre el método y sus limitantes.

En el primer anexo se muestra clasificación de las condritas, los tipos de metamorfismo que estas pueden presentar y su mineralogía. En el segundo anexo se describen los diferentes métodos analíticos utilizados, así como los fundamentos de estos, por último, el anexo 3, describe los diferentes programas de cómputo utilizados, sus principios y se presenta un tutorial de cómo utilizarlos.

### **Justificación:**

La relevancia de estudio de los condros radica principalmente en la comprensión de su presencia en el registro de los meteoritos pétreos no diferenciados y su relación potencial con otros procesos que ayudaron a dar forma al sistema solar primitivo. Adicionalmente 1) los condros proporcionan un registro de los procesos que ocurrieron y los materiales que se formaron antes de la acreción de sus asteroides parentales. 2) Algunos condros presentan una composición similar a la fotosfera solar (a excepción de los elementos más volátiles como H, C, N y gases nobles). 3) Los condros proporcionan un registro cronológico de los materiales primordiales formadores de rocas. 4) Algunos condros registran procesos geológicos como el metamorfismo térmico y la alteración acuosa (en Connolly & Jones, 2016).

Las propiedades físicas de los condros han recibido menor atención que otras propiedades de los meteoritos, aunque estas propiedades también son importantes debido a que ayudan a desarrollar modelos astrofísicos para comprender como utilizar los asteroides en la exploración espacial. El tamaño de los condros es de suma importancia debido a que cada grupo de condritas posee una distribución de tamaños distinta (Friedrich et al., 2015). Debido a que cada grupo de condrita está asociado a cierto rango de tamaños de condro se puede suponer que el tamaño de condro está asociado a la distancia del Sol.

Si bien existen algunos trabajos que describen a los condros de algunos ejemplares (Cervantes, 2009; Connolly & Jones, 2016; Friedrich et al., 2015; Hernández Reséndiz, 2020;

Montoya Pérez, 2016), la idea principal de este trabajo partió, de la premisa que al medir el tamaño de condros, se puede asociar al ejemplar con un tipo de condrita, ofreciendo, una clasificación básica, rápida y sencilla, no destructiva y relativamente económica.

### **Objetivos**

- Analizar petrográficamente 10 diferentes muestras de condritas de localidades nacionales (El Pozo, Escalón, Nuevo Mercurio, Cosina, Aldama, y Allende,) e internacionales (Gold Basin, NWA 869, NWA y Libia).
- Establecer para este trabajo, una metodología para una clasificación básica, rápida y sencilla para condritas ordinarias basada en el tipo, abundancia y distribución de tamaños de condros.
- Con la metodología propuesta, describir y clasificar a la condrita Libia, la cual no está clasificada formalmente.

### **Objetivos secundarios**

- Describir petrográficamente condritas de diversos grupos.
- Describir y clasificar el tipo de condros que componen a cada tipo de condrita observada.
- Relacionar los tipos de condros, su abundancia, tamaños y la relación matriz/condros con cada tipo de condrita estudiada.

# **Capítulo 1: Marco Teórico**

### **1.1 Importancia de las condritas:**

Las condritas son las rocas más antiguas y menos diferenciadas del sistema solar; su composición química, comparable a la de la fotosfera solar, proporcionan estimaciones confiables de la abundancia media de los elementos no volátiles del sistema solar. Los granos pre-solares proporcionan información adicional sobre la nucleosíntesis y la formación de granos circunsolares. Los componentes de las condritas, los cuales se formaron en condiciones diversas, proporcionan información sobre los diferentes procesos durante la formación del Sol y los planetas a partir de una nube de polvo y gas interestelar que colapsó. A su vez, estas rocas contienen información sobre los procesos petrológicos y de impacto que sufrieron los asteroides y la naturaleza de los planetesimales, también son útiles para identificar una relación de las clases de asteroides con la distancia al Sol y la evolución del cinturón de asteroides entre las órbitas de Marte y Júpiter. Finalmente, el estudio de las condritas proporciona información sobre la estructura física y mineralógica de los asteroides no fundidos y diferenciados, lo que ayuda a evaluar las acciones a emplear en caso de que haya un asteroide cercano a la Tierra (Holland & Turekian, 2014).

Los granos pre-solares contienen anomalías isotópicas que demuestran que son ajenos al sistema solar, implicando que fueron formados en otras estrellas, esto es un gran indicador del entorno estelar del que proceden, por ejemplo, de una supernova; esto lleva a pensar que ese tipo de explosión de estrella en fase de supernova indujo colapso gravitatorio masivo como el que formó a nuestro sistema solar (Trigo – Rodríguez & Martínez – Jiménez, 2013).

El propósito de clasificar a los meteoritos en clases es describir y comprender mejor su origen y establecer relaciones con los asteroides de los que proceden. Dependiendo de la masa del fragmento y ángulo de entrada a la Tierra, los meteoritos son los responsables de la formación de los cráteres de impacto. Por otro lado, cuando un meteoroide entra a la atmósfera puede fragmentarse, particularmente los pétreos, creando la denominada “elipse de dispersión” (Muñoz-Espadas, 2003).

### **1.2 Condros:**

Los condros son partículas de silicatos fundidos de tamaños milimétricos o submilimétricos que se formaron a temperaturas cercanas a los 1750 °C. Los procesos que

generaron a estas gotas que flotaban libremente en el disco protoplanetario no están completamente comprendidos. Después de enfriarse, estas gotas fueron incorporadas a cuerpos rocosos llamados condritas (Connolly & Desch, 2004).

Los condros tienen gran diversidad textural (figura 1.1) que da indicios de las condiciones del sistema solar primitivo; estas texturas están controladas por la densidad de nucleación, el grado y la velocidad de enfriamiento. Adicionalmente, la textura también puede ser controlada por la intensidad y duración del evento de calentamiento. De acuerdo con (Gooding & Keil, 1981) en Cannolly y Desch (2004) los condros se clasifican de acuerdo con su textura en porfiríticos y no porfiríticos. Para determinar el tipo de textura se considera el arreglo geométrico y la abundancia de las fases minerales. Las no porfiríticas se pueden dividir en los tipos: vítreo (G); criptocristalinas (CC); piroxeno u olivino radial (RO y RP); piroxeno – olivino radial (RPO); y olivino o piroxeno barrado (BO y BP); de igual manera se puede distinguir una transición de barrado a radial, aunque esto no es sencillo de distinguir. Las texturas porfiríticas muestran un rango desde granos grandes colocados en una mesostasis vítrea hasta granos de tamaño fino (granular o microporfirita), y en el límite hasta el tamaño de grano muy fino (aglomerático).

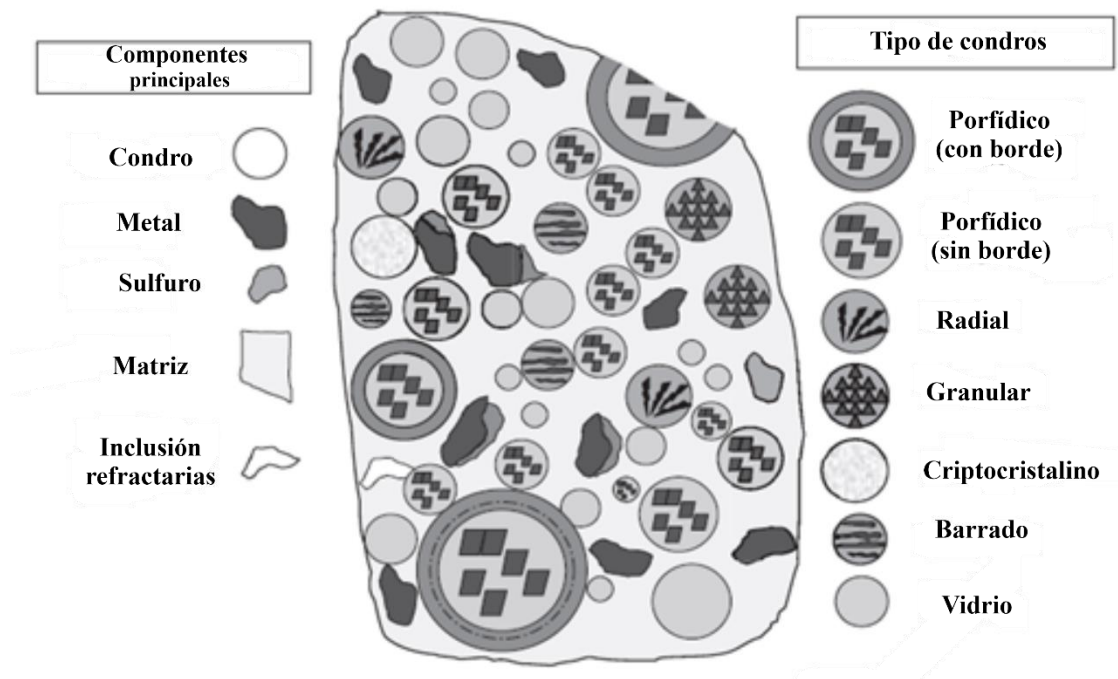


Figura 1.1. Esquemización de los componentes de una condrita ordinaria primitiva; del lado derecho de la imagen se muestran las diferentes texturas que pueden contener los condros. Tomada de (Sears, 2004).

Otro sistema de clasificación combina la textura del condro con su composición química global, inferida a partir de su mineralogía modal. Este sistema se basa en el contenido de FeO del olivino y el FeO total, los condros empobrecidos en FeO se designan como tipo I y los enriquecidos en FeO como tipo II, el tipo III se refiere a las texturas radiales de piroxeno (RP) que pueden ser del tipo I o II. La subdivisión entre los tipos depende de la abundancia modal del olivino y piroxeno pobre en Ca, los condros con <10% de piroxeno pobre en calcio se les asigna la letra A, con <10% del olivino se le asigna la letra B y con cantidades similares de olivino y piroxeno se les asigna la letra AB (Cervantes, 2009).

Tabla 1.1. Clasificación textural de condros. Tomada de (Lauretta, Nagahara, & Alexander, 2006).

<b>Clasificación Textural</b>		
<b>Tipo</b>	<b>Abundancia en condritas ordinarias %</b>	<b>Textura</b>
<b>M</b>	<1	Metálico
<b>GOP</b>	2 – 5	Olivino + piroxeno granular
<b>CC</b>	3 – 5	Cripcristalino
<b>BO</b>	3 – 4	Olivino barrado
<b>RP</b>	7 – 9	Piroxeno radial
<b>PP</b>	9 – 11	Porfídica, dominada por piroxeno (>10/1 volumen)
<b>PO</b>	15 – 27	Porfídica, dominada por piroxeno (>10/1 volumen)
<b>POP</b>	47 – 52	Porfídica, olivino + piroxeno

Los diferentes tipos de condritas poseen propiedades físicas y químicas que los diferencian unos de otros. Por ello, los condros juegan un papel importante en la clasificación de ellas ya que cada tipo posee una distribución de tamaños característica. Esta propiedad es importante para plantear o proponer modelos astrofísicos sobre la formación de los condros y en la comprensión de cómo utilizar los recursos pétreos de los asteroides para la exploración espacial (Friedrich et al., 2015), también nos ayudan a conocer la historia térmica por la que ha pasado la condrita y el asteroide parental. También se considera que la distribución de tamaño de los condros en las condritas estuvo controlada por la abundancia de polvo y el número de eventos de calentamiento en diferentes regiones formadoras de condros.

El origen de la diferencia en el tamaño de los condros puede hallarse en su mecanismo de formación, como resultado de la clasificación nebular posterior a la solidificación, el



resultado del proceso en el cuerpo parental o la combinación de diferentes factores. Sea cual fuere el mecanismo de formación, los condros proporcionan límites sustanciales en sus entornos astrofísicos nativos (Friedrich et al., 2015).

De acuerdo con Simon et. al. (2018) la abundancia de los condros y la formación de estos en los meteoritos es fundamental en las primeras etapas de acumulación de los asteroides parentales, debido a que los planetas se forman a partir de estos. Por ello es importante conocer los procesos que los forman (Simon et al., 2018).

Simon et. al. (2018) reportan en el meteorito Allende condros con bordes, ellos argumentan que el hecho de que los condros bordeados interactúen con los no bordeados, apoya la teoría de que estos experimentaron diferentes trayectorias, en las cuales evolucionaron y se desarrollaron de manera distinta, en el momento de la acreción del cuerpo parental y antes de ser clasificados por tamaños durante la acreción de los planetesimales. Diversos autores han identificado que estos bordes son zonas con gran concentración de metales y sulfuros, e incluso se han encontrado microcondros, lo que indicaría que sus etapas de formación fueron paralelas. El tamaño del borde es proporcional al tamaño del condro; los condros reducidos pobres en volátiles presentan bordes más gruesos que los condros oxidados ricos en volátiles, esto sugiere que el borde está formado de elementos que se evaporaron y posteriormente se condensaron en el exterior del condro. Estos bordes apoyan la teoría canónica y la sugerencia de que los condros se formaron en una región polvorienta de la nebulosa (Sears, 2004).

Se pueden encontrar dos tipos de bordes: acrecionales e ígneos. Los primeros se forman por la acumulación de polvo de grano fino en los condros, exhibiendo una gran variedad de composiciones y texturas; por otro lado, los bordes ígneos presentan texturas ígneas con tamaños de grano grueso que indica una fusión parcial (Lauretta et al., 2006).

Los condros “relictos” son residuos de condros originales de los cuales se formó un condro nuevo; estos indican que no se fundieron por completo durante su formación, lo que da como evidencia de que los condros se pueden reciclar durante su formación (Sears, 2004).

Una de las primeras consideraciones sobre los condros debe ser su historia térmica ya que esta nos ayuda a comprender mejor su evolución. Los condros experimentaron varios episodios de calentamiento en sus entornos de formación, estos episodios se pueden estudiar

a partir de los granos relictos o los bordes ígneos e incluso en algunos condros compuestos (Connolly & Jones, 2016).

Tabla 1.2. Compendio de temperaturas y rangos de enfriamiento de condros. Tomada de Sears (2004).

<b>Tipo de condro</b>	<b>Rango de enfriamiento (°C/h)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
<b>Tipo I, pobre en FeO</b>		
<b>Porfirítico</b>	100	1583 ± 2
<b>Barrado</b>	1000	1583 ± 2
<b>Porfirítico</b>	24000 – 1200	
<b>Barrado</b>	7200 – 300	
<b>Radial</b>	24000 – 1200	
<b>Porfirítico</b>	100	≤ 1590
<b>Barrado</b>	1000 – 3000	> 1590
<b>No Porfirítico</b>		~ 1700
<b>Tipo II, rico en FeO</b>		
<b>Porfirítico</b>	5	
<b>Radial</b>	5	
<b>Porfirítico</b>		~ 1300
<b>No Porfirítico</b>		~ 1500
<b>No especificado</b>	50 – 3000	
	5 - 10	

Otro aspecto que debe considerarse en la formación de los condros es saber si se formaron en un sistema abierto (si ganaron o perdieron elementos y/o gases dentro del ambiente de formación mientras se encontraban fundidos), ya que esta variable puede ser la causante de la variación composicional de los condros. Los condros potencialmente registran las condiciones de variación redox debido a diferencias en sus precursores o cambios en las condiciones del ambiente o ambos. Los experimentos sugieren que los condros experimentaron evaporación mientras estaban fundidos, lo que es posiblemente una de las razones por la que los condros sean tan diversos en su composición (Connolly & Desch, 2004).

La mesostasis de los condros se enriquece en volátiles en la zona exterior y en elementos refractarios en la zona central, lo que indica la migración de los volátiles. De la

misma manera, los silicatos con bajo contenido en FeO y Ni, la abundancia relativamente alta de metales, son muestras de que los condros se comportaron como un sistema abierto. Otros procesos que pueden haber contribuido al calentamiento y enfriamiento de los condros son la reducción de los gases ambientales y el carbono, impacto por polvo, la recondensación de los volátiles como bordes de la superficie y la difusión de los volátiles hacia el interior de los condros (Sears, 2004).

### **1.2.1 Teorías de formación de condros**

Los condros están formados por material total o parcialmente fundido. Estos objetos se formaron en la nebulosa solar a una distancia de entre 0.6 – 2.5 UA del Sol, hace ~ 4564 Ma y con un intervalo de formación de 1 a 3 Ma (Moggi Cecchi, Pratesi, & Salvadori, 2006).

Los condros son rocas ígneas, y como cualquier roca ígnea se debe de considerar la historia térmica con detalle; por lo tanto, se debe de tener en cuenta su temperatura máxima de fusión y las velocidades de enfriamiento (~ 1000 °C/h para condros tipo I; 0.5 y 100 °C/h para condros porfídicos; 1000 a 3000 °C/h para condros no porfídicos; sin embargo, no existe una base de datos confiable para la restricción de temperaturas) (tabla 1.2).

Connolly y Desch (2004) deducen que los condros se formaron antes que los planetesimales ya que, si los condros no hubieran vagado libremente por la Nebulosa, con anterioridad a la formación de los planetesimales, entonces su estudio no tendría relevancia para la historia del disco protoplanetario y sólo tendría que ver con los procesos planetarios.

En cambio, Lauretta et al., (2006) consideran que es posible que los condros se formaran después de que los planetesimales de mayor tamaño fueran sometidos a diferenciación química, ya que sus precursores fueron materiales expulsados por colisiones entre planetas o durante erupciones volcánicas en los asteroides parentales.

La figura 1.2 resume las teorías más recientes de la formación de condros.

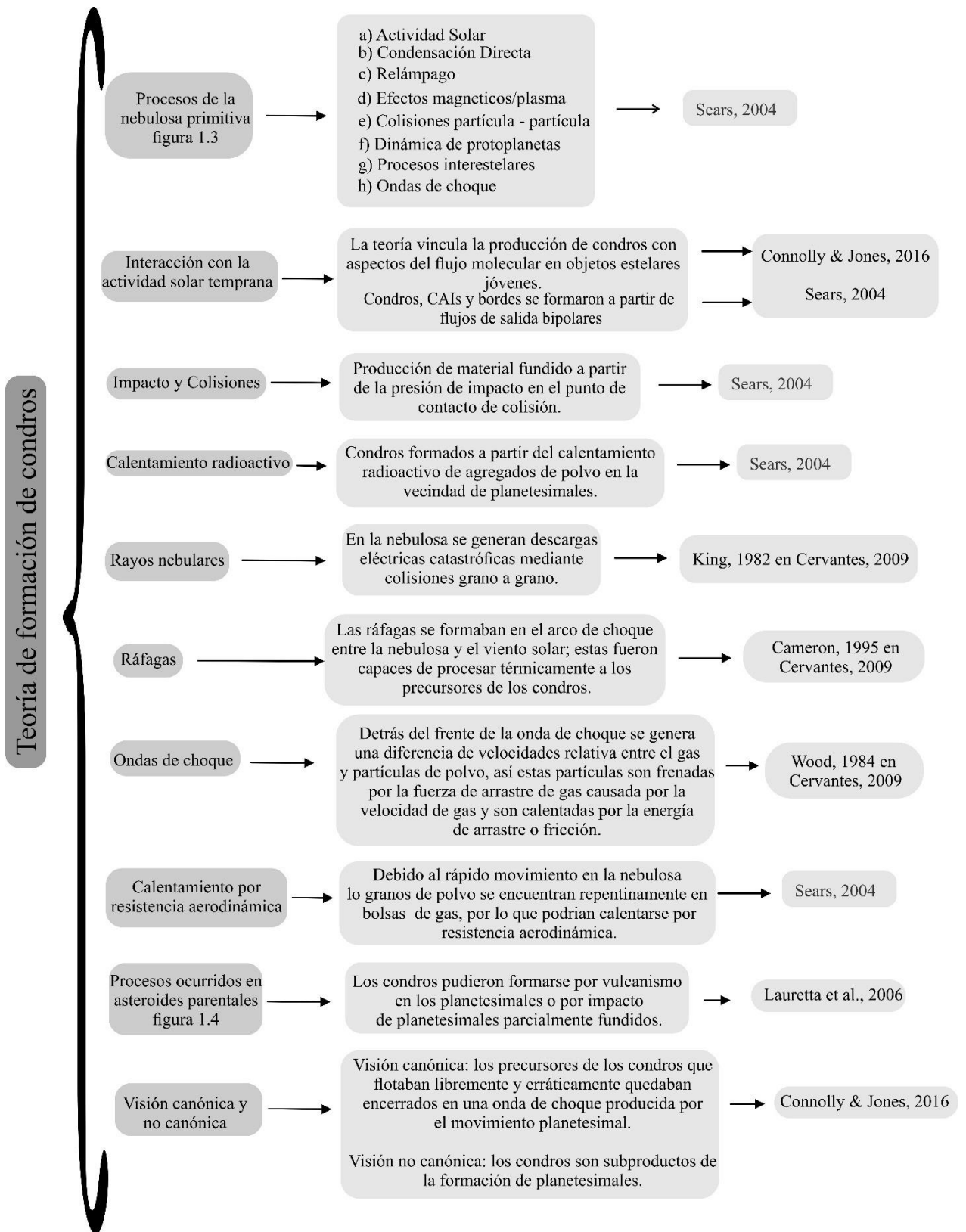


Figura 1.2. Teorías de formación de condros.

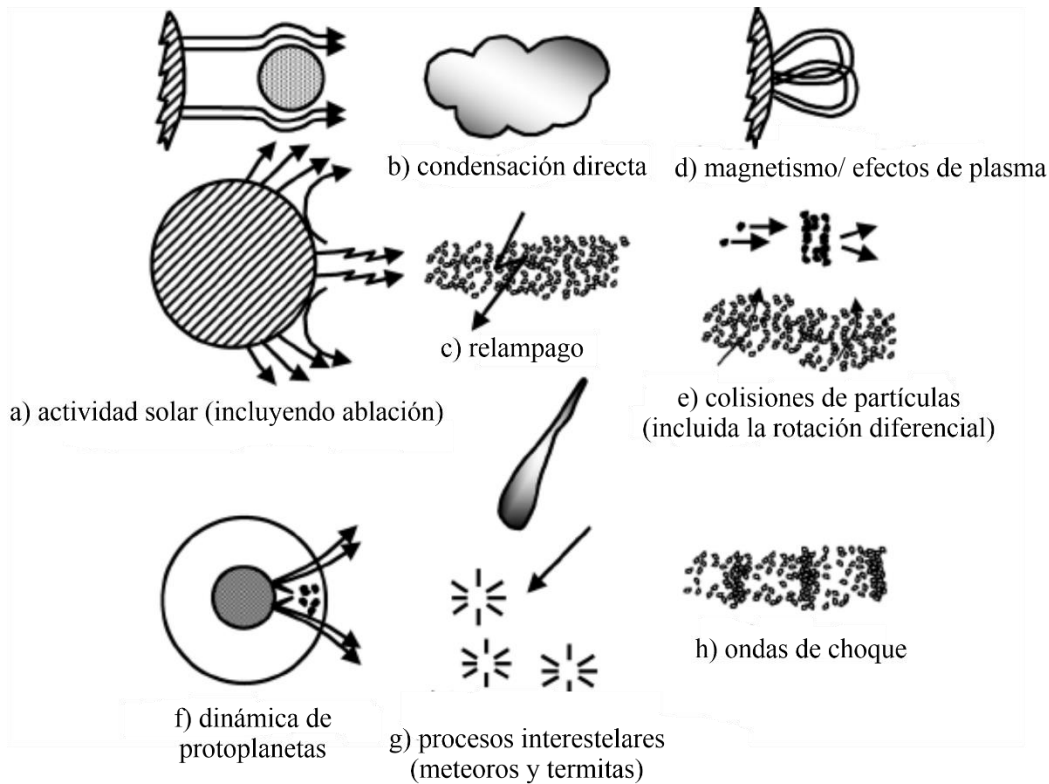


Figura 1.3. Procesos de formación de condros ocurridos en la nebulosa solar primitiva. Tomada de (Sears, 2004).

La Figura 1.3 esquematiza los diferentes procesos por los cuales se formaron los condros en la nebulosa solar primitiva: a) sugiere que los condros son resultado de la fusión debida a eyecciones solares; b) los condros se forman a partir de la condensación directa de un gas solar; otra variante dice que se formaron a partir del calentamiento prolongado de los materiales precursores por encima de la temperatura de líquido; c) los condros se formaron cuando descargas eléctricas atravesaron polvo en la nebulosa solar primitiva; d) formación de condros a causa de procesos que involucran campos magnéticos y plasma; e) los condros son resultado de la colisión o fricción entre partículas en la nebulosa; f) los sólidos que caían en el interior del protoplaneta joviano producían condros en forma de fusión por impacto que escaparían y se trasladarían al cinturón de asteroides; g) formación de condros a partir de polvo interestelar al entrar en la nebulosa; otra teoría dice que los radicales inestables sufrían reacciones exotérmicas que los calentaban al entrar en el interior; h) las ondas de choque en la nebulosa produjeron condros.

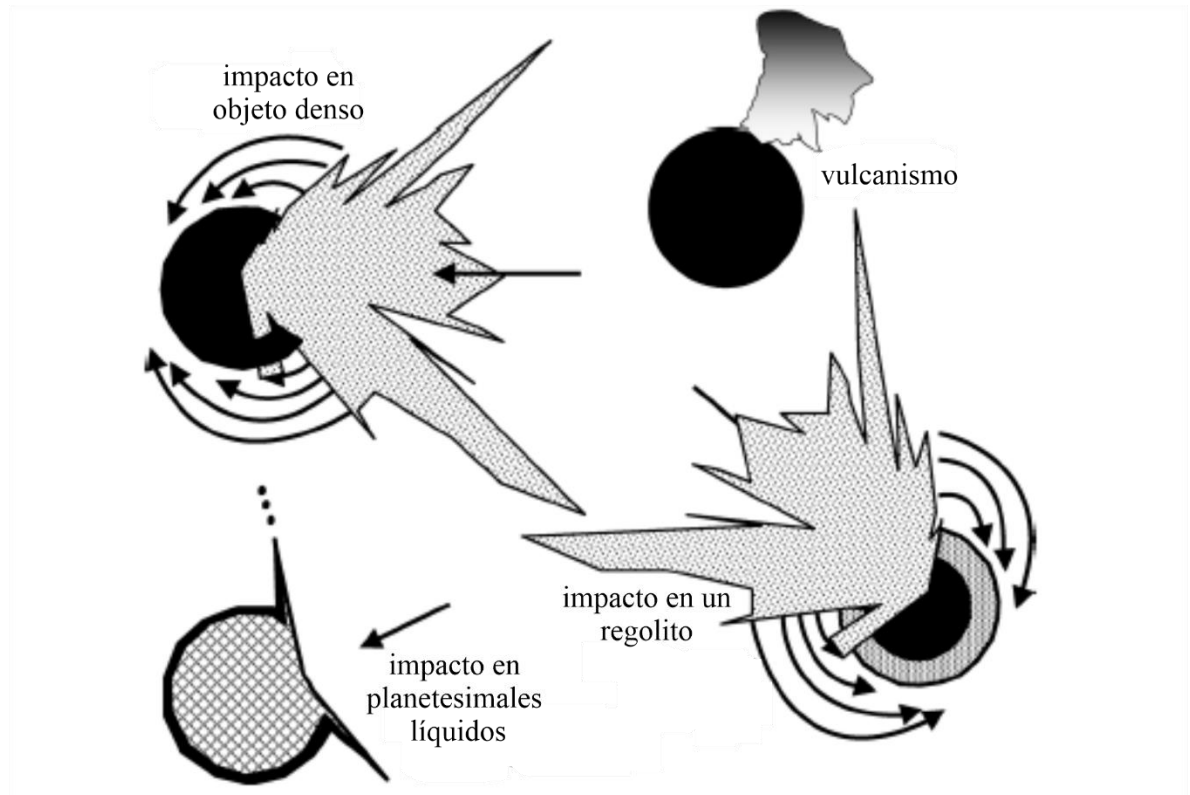


Figura 1.4. Procesos de formación de condros que ocurrieron en los cuerpos parentales. Tomada de (Sears, 2004).

### 1.3 Geoquímica

El sistema solar se formó como resultado del colapso gravitacional de una porción de una nube molecular. Se asume que el Sol, los planetas y los demás objetos del sistema solar se formaron a partir de esta nube con una composición química e isotópica bien definida (Lodders, Palme, & Gail, 2009).

La temperatura de formación de los componentes meteoríticos es la principal responsable de la composición química variable de los meteoritos primitivos; los elementos principales se condensan como minerales, mientras que los elementos secundarios y traza se condensan en soluciones sólidas dentro de las fases principales (Lodders et al., 2009).

El modelo de equilibrio amortiguado entre fases explica el fraccionamiento químico entre las condritas y sus componentes. Este modelo asume que los minerales se condensaron o se equilibraron en una nube solar homogénea a diversas temperaturas; este modelo es importante a la hora de comprender la composición química de las condritas y sus

componentes, ya que la firma de la nube queda grabada en su química y mineralogía, Scott y Krot (2014) en (Holland & Turekian, 2014).

Las variaciones químicas de las condritas se atribuyen a la acumulación de las diferentes proporciones en sus diferentes componentes (figura 1.5):

- Elementos refractarios: los elementos que se condensan por encima de 1450 K son los elementos que se encuentran en los CAIs, existiendo una correlación entre las concentraciones totales de los elementos y las inclusiones refractarias.
- Silicatos de magnesio: la forsterita y enstatita son los principales minerales de los condros, se forman en el rango de temperaturas de 1450 a 1350 K. Una correlación entre las relaciones Mg/Si y refractario/Si de los grupos de condritas sugiere que los refractarios están parcialmente asociados con forsterita.
- El Fe-Ni metálico: se condensan en el mismo rango de temperatura que los silicatos de Mg, está estrechamente asociado con los condros.
- Elementos moderadamente volátiles: el agotamiento gradual de estos elementos con la disminución de la temperatura se puede atribuir a la pérdida de polvo fino rico en volátiles, a la condensación incompleta debido al aislamiento de las fases condensadas, y/o a la evaporación antes o durante la formación del condro.
- Elementos altamente volátiles: es posible que estos elementos no hayan podido acumularse desde la nebulosa debido a las altas temperaturas ambientales durante la acumulación o la acumulación insuficiente de polvo rico en volátiles o haberse perdido durante el metamorfismo del asteroide. Comprenden elementos con afinidades geoquímicas muy diferentes como el Pb y I.
- Elementos ultravolátiles: tienen temperaturas de condensación inferiores a las del hielo de agua; incluyen al H, C, N, O y los gases nobles.

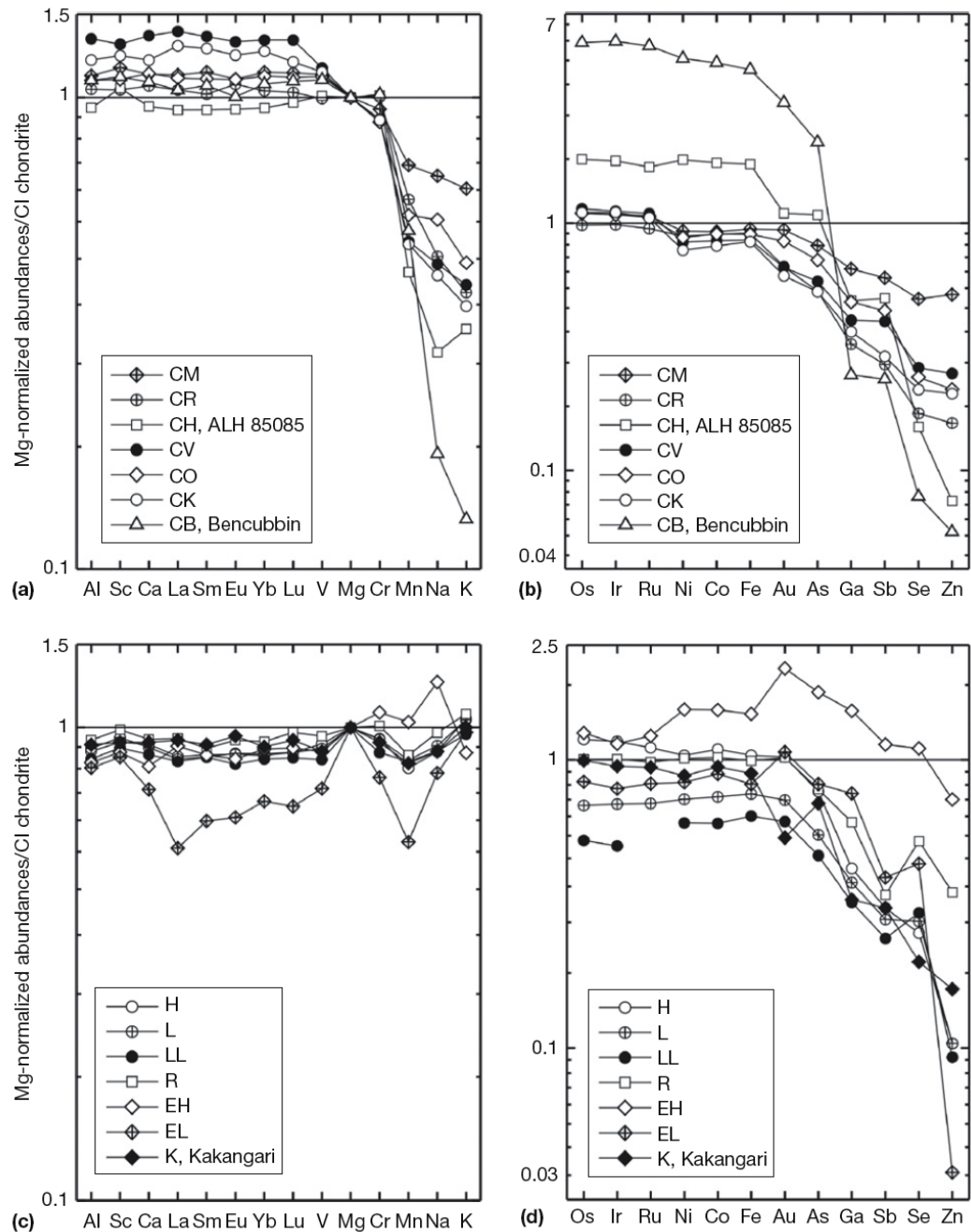


Figura 1.5. Abundancias medias de elementos litófilos normalizados a condritas CI y silicio dispuestos en orden de volatilidad creciente en grupos de condritas. Los refractarios (elementos que se condensan por encima de V) se enriquecen uniformemente en condritas CO, CM, y CV y se empobrecen en condritas H, L y EH. Los elementos moderadamente volátiles (que se condensan por debajo del Mg y Si) están todos empobrecidos en relación con la condrita CI. Estos fraccionamientos están relacionados de manera poco conocida con la formación de CAI y condros. Figura tomada de Scott y Krot (2014) en (Holland & Turekian, 2014).



### Variaciones químicas en meteoritos condriticos

- Relación Al/Si: indica la fracción del componente refractario con la fracción de elementos principales en los grupos de condritas.
- Relación Mg/Si: es casi igual para casi todos los tipos de condritas carbonáceas; para las condritas ordinarias y de enstatita el Mg es significativamente menor.
- Relación Fe/Si: esta relación presenta dos comportamientos distintos; los subgrupos de condritas carbonáceas descubiertos recientemente muestran excesos o mermas de Fe, lo que indica que el metal presenta un comportamiento independiente; algunos grupos están empobrecidos en Fe, otros enriquecidos, independientemente de otras propiedades.
- Las condritas CI presentan las relaciones más altas de elementos moderadamente volátiles y altamente volátiles y tiene el contenido más alto de oxígeno de todos los meteoritos condriticos.

La imagen 1.6 ejemplifica las relaciones antes descritas.

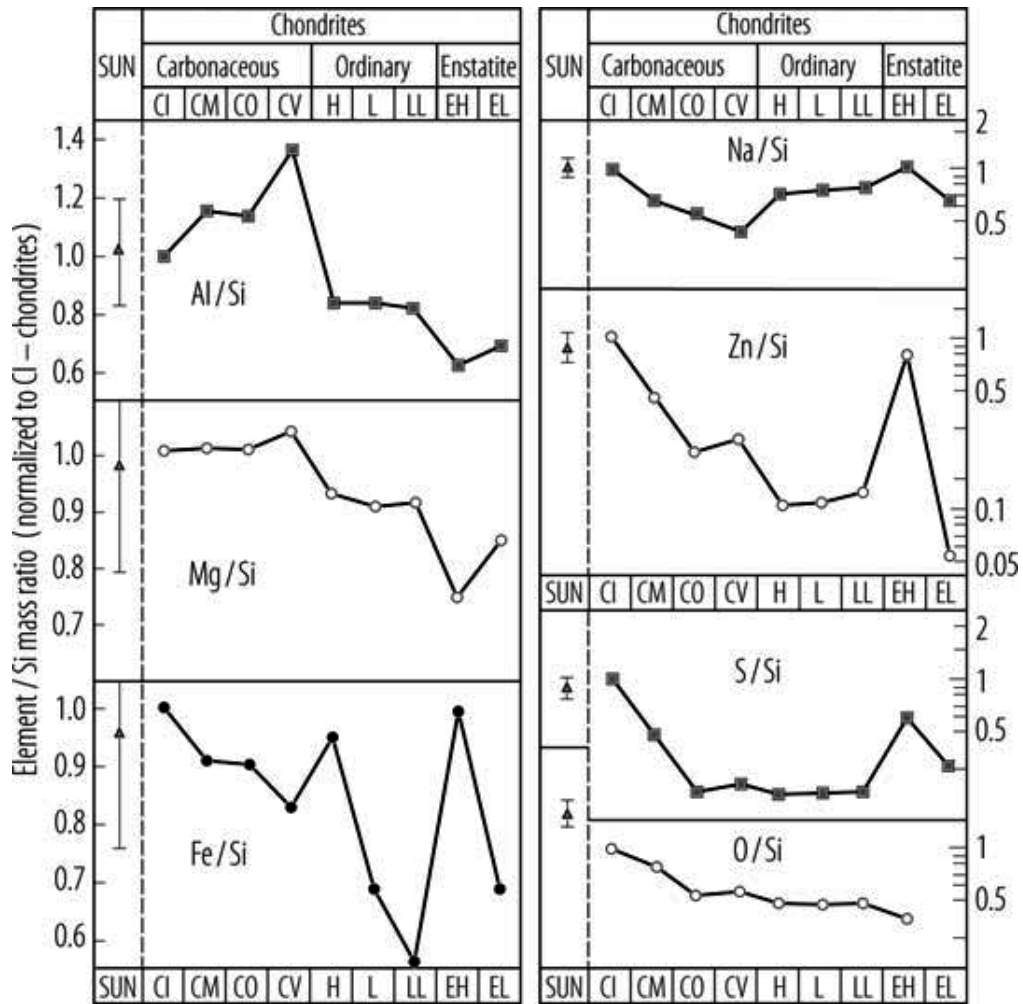


Figura 1.6. Relaciones elemento/Si característicos de cada grupo de meteoritos condriticos. Cada grupo se organiza a partir del contenido de oxígeno decreciente; el componente refractario está representado por Al; el Mg representa a los silicatos de Mg, el Fe representa al componente metálico y el Na, Zn y S representan a los elementos moderadamente volátiles. Sólo las condritas CI se ajustan con las abundancias fotosféricas indicadas en el lado izquierdo. Figura y descripción tomada de (Lodders et al., 2009).

## **Capítulo 2: Metodología**

El material utilizado corresponde a las condritas ordinarias Nuevo Mercurio, Cosina, Aldama, Allende, NWA CV3, NWA 869, Escalón, Gold Basin, El Pozo y Libia<sup>1</sup>. La condrita Libia es un hallazgo facilitado por el Dr. Andrea Zerboni (Università degli Studi di Milano).

Se realizó un análisis petrográfico y la obtención de imágenes se realizó con ayuda de los microscopios: Olympus BX50 del Instituto de Investigaciones en Ciencia de la Tierra, UMSNH y Olympus SZX7 perteneciente al Laboratorio de Separación de Minerales de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES) Unidad Morelia. Con las imágenes obtenidas se conformó un mosaico en donde se identificaron y cuantificaron los condros.

Para que un condro fuera seleccionado en el conteo debía estar completo o contar con < 80% de su circunferencia. Los condros fueron digitalizados en el software ArcMap 10.1. Finalizada la digitalización el mosaico fue procesado en ImageJ (ver anexo 3). Finalmente, los datos obtenidos en ImageJ son procesados en CSDCorrections (ver anexo 3 para más información), es aquí donde se obtienen los datos necesarios para poder realizar los histogramas. El tamaño de los condros es reportado en micrómetros  $\mu\text{m}$ , tal y como son reportados en (Friedrich et al., 2015).

El análisis EDS se realizó en el Laboratorio de Microscopia (LAMIC) de la ENES unidad Morelia. La finalidad de este análisis es conocer cuáles son los principales elementos que conforman los diferentes puntos analizados, principalmente los condros, desafortunadamente fue difícil identificar a los condros en la muestra debido a su tamaño, grado de alteración e impacto y bajo contraste con la matriz, por lo que sólo se analizó secciones de la matriz y Fe-Ni metálico.

El análisis de óxidos mayores fue realizado en el Laboratorio Universitario de Geofísica Ambiental (LUGA) del Instituto de Geofísica con un equipo espectrómetro portátil de dispersión de energía (ED-XRF, por sus siglas en inglés) Genius 7000 XRF de Skyray Instruments, tubo Rh y detector de berilio. Se realizaron cuatro tiros con pistola sobre la galleta completa del meteorito (sin destrucción): El estándar utilizado es el de una andesita, ya que no hay estándares para meteoritos.

---

<sup>1</sup> Los ejemplares de Aldama, Allende, Nuevo Mercurio, Cosina, Escalón, El Pozo: facilitados por el Instituto de Geología, UNAM. Los ejemplares de NWA CV3, NWA 869 y Gold Basin: compradas con vendedores de rocas.

En la Figura 5.9 y 5.11 se reportan dos valores de LDF (*Libya Desert Find*), el análisis reportado en el recuadro azul se realizó en el Instituto de Geología a partir de Fluorescencia de Rayos X con perla – tableta: espectrómetro secuencial de rayos X (Rigalu Primus II) equipado con tubo de rodio y ventana de berilio de 30 micras. Debido a que este análisis sugiere sobre estimación en el contenido de Fe y S, no se muestran en el resto de las gráficas.

El análisis tridimensional se realizó a partir de las imágenes de microtomografía de rayos X, realizadas en el Laboratorio Universitario de Microtomografía de Rayos X, Juriquilla. Las imágenes se obtuvieron a partir de un cilindro de  $0.251 \text{ cm}^3$  (0.8 cm diámetro, 0.5 cm altura). El objetivo principal del análisis 3D era poder reconstruir el arreglo interno de los condros en la condrita, sin embargo, los pocos condros que se lograba observar presentaban valores de vóxel similares a la matriz y el programa no lograba hacer la discriminación entre uno y otro, por esa razón, se realizó el análisis de Fe-Ni metálico, ya que era más sencillo identificar sus valores de vóxel, y porque los valores y porcentajes de partículas de Fe-Ni también son indicadores del tipo de condrita.

# **Capítulo 3: Resultados: Petrografía**

Se cuenta con un total de 10 muestras de condrita, nueve de ellas cuentan con estudios petrológicos previos ((Cervantes, 2009; Corona-Chávez et al., 2018; Metzler et al., 2011; Reyes-Salas et al., 2010; Rubin & Wasson, 1987; Szurgot & Krzysztof, 2007), las cuales 2 son de tipo carbonácea, 3 de tipo L, 4 de tipo H. No hubo ningún criterio específico para seleccionar las muestras, ya que eran las que estaban disponibles y las que ya contaban con sección delgada. Se examinó una sección delgada por cada condrita, algunas de ellas contaban con muestra testigo (briqueta) (NWA CV3, Libia, Gold Basin, NWA 869). Los meteoritos hallados son 7 y 3 son caídos. Seis son caídos/hallados en México y 4 en otros países (Tabla 3.1).









El meteorito que aquí hemos llamado Libia es una muestra hallada en el desierto de Libia en 2017 y que aún no está clasificada ni publicada, por lo que es descrita por primera vez en el presente trabajo. La muestra denominada NWA-CV3 tampoco está publicada o no se tiene la certeza de su nombre ya que fue adquirida con un comerciante de rocas, al igual que NWA -869 y Gold Basin.

Tabla 3.1. Características principales de las condritas estudiadas de acuerdo con el ("Meteoritical Bulletin: Search the Database," n.d.)

Condrita	Clasificación	Hallazgo / caída	Descripción general
a) <b>Gold Basin</b>	L4	Hallazgo	Se encontró en Mohave, Arizona, USA (35° 52' 30" N, 114° 14' W) en noviembre de 1995 por el profesor Jim Kriegh; fue descrito por D. Kring. Se recuperó una masa total de 61 kg y un área de ~130 km <sup>2</sup> , presenta un grado de intemperismo W2-3.
b) <b>El Pozo</b>	L5	Hallazgo	Encontrada en Chihuahua, México (26° 56' N, 105° 24' W) en el verano de 1998. Descrito por primera vez en el año 2000. Se recuperó una masa total de 460 g.
c) <b>NWA -869</b>	L3-6	Hallazgo	Fue encontrada en el 2000, al noroeste de África. Descrita por primera vez en el año 2006 como una condrita L4-6. Es una brecha fragmentaria, con un grado de intemperismo W1 y una clasificación de choque S3. Se han recolectado alrededor de 2 toneladas métricas
d) <b>Escalón</b>	H4	Hallazgo	Encontrado en Chihuahua, México (27° N, 104° W) en 1979 por el Dr. Luis Maeda- Villalobos. Fue descrita por primera vez en el año 1994. Se recuperó una masa total de 54.3 g.
e) <b>Nuevo Mercurio</b>	H5	Caída	Cayó en Nuevo Mercurio Zacatecas, México (24° 18' N, 102° 8' W) en 1978; descrita por primera vez en 1980. Su caída fue visible en un radio de al menos 200 km. Se conocen más de 300 ejemplares con un peso total de ~5 kg.
f) <b>Cosina</b>	H5	Caída	Cayó en loma Cosina en Dolores Hidalgo, Guanajuato, México (21° 10' N, 100° 52' W) en 1844; descrita por primera vez en el año 2000. Se recuperó una masa total de 1.2 kg.
g) <b>Aldama</b>	H5	Hallazgo	Encontrado en Chihuahua, México (25° 3' N, 106° W) en 1996; descrito por primera vez en 1998. Presenta una clasificación de choque S2 y un grado de intemperismo W3. Se recuperó una masa total de 66.5 g.
h) <b>Allende</b>	CV3	Caída	Cayó en Pueblito de Allende, Chihuahua, México (26° 58' N, 105° 19' W) en 1969; la primera clasificación fue en 1969 como C3. La masa total de la muestra es de 100 kg.
i) <b>NWA</b>	CV3	s/d	Sin descripción formal
j) <b>Libia</b>	Sin clasificación	Hallazgo	Sin descripción formal



## Continuación de la Tabla 3.1.

Muestra	Origen	# condros contados (Distribución de tamaños)		
Gold Basin	Vendedor rocas	64	 <p>a) Gold Basin [L4]</p>	 <p>b) El Pozo [L5]</p>
El Pozo	Instituto de Geología, UNAM	104		
NWA -869	Vendedor rocas	143	 <p>c) NWA -869 [L3-6]</p>	 <p>d) Escalón [H4]</p>
Escalón	Instituto de Geología, UNAM			
Nuevo Mercurio		197		
Cosina		111		
Aldama		116		
Allende		90		
NWA	Vendedor rocas	89	 <p>e) Nuevo Mercurio [H5]</p>	 <p>f) Cosina [H5]</p>
Libia	Dr. Andrea Zerboni	154		
			 <p>g) Aldama [H5]</p>	 <p>h) Allende [CV3]</p>

### 3.1 Petrografía y análisis bidimensional:

En esta sección además se muestran las características petrográficas más sobresalientes y los resultados del análisis dimensional de la distribución de tamaños aparentes de los condros. En las gráficas anexas se muestra la distribución normalizada de la densidad de población versus el tamaño en micras de los condros obtenida con el software ImageJ (ver detalles en el Anexo 3).

**Gold Basin – L4:** (Szurgot & Krzysztof, 2007) reporta condros de diferentes texturas, como: barrado de olivino (BO), porfídicos de olivino (PO), porfídicos de piroxeno (PP), radial de piroxeno (RP), granulares (G) y algunos condros con bordes; lo que es totalmente concordante con este estudio.

Megascópicamente: La muestra testigo y la lámina delgada presenta una notable oxidación, por lo que presentan una coloración rojiza, amarillenta y tonos cafés, debido a esto, no se observan muchos condros completos. Presenta fracturas que atraviesan toda la lámina.

Microscópicamente: Se encuentra una relación 88.31% matriz – 11.69% condros. La matriz presenta vidrio rellenando los espacios vacíos, al igual que se presenta en el relleno de las fracturas.

Los condros reconocidos son: 1) barrados de olivino (BO), los cuales representan el 6.25% del total, la gran mayoría de estos no presentan formas definidas, a excepción de un condro, el cual presenta un borde compuesto principalmente de olivino. 2) condros porfídicos (PO) (57.81% en volumen), siendo estos los de mayor concentración en la muestra, se presentan con formas poco definidas, y con apariencia de disgregación, 3) granulares (21.9% en volumen), y 4) condros radiales (14.06% en volumen), estos últimos dos tipos de condros presentan las mismas características que los condros porfídicos.

Existen agregados cristalinos sin formas aparentes compuestos principalmente de olivino. La mayor concentración del tamaño de diámetro se encuentra en un rango 680 – 736  $\mu\text{m}$ ; se observa un segundo rango importante en 1260  $\mu\text{m}$  (figura 3.2).

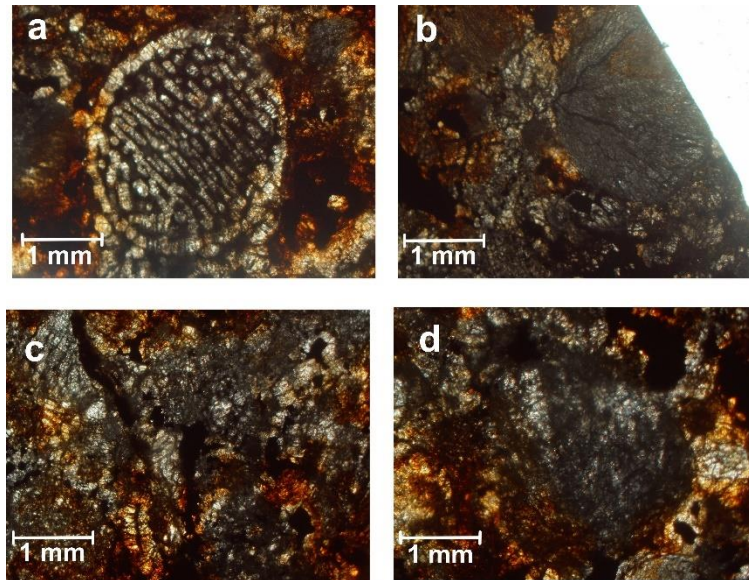


Figura 3.1: a) Condro barrado de olivino (BO), se puede observar la presencia de un borde de grano grueso (borde ígneo), los minerales presentes en el son los mismos que componen las barras del condro; b y d) condros radiales de piroxeno (RP); c) agregados cristalinos de olivino y piroxeno.

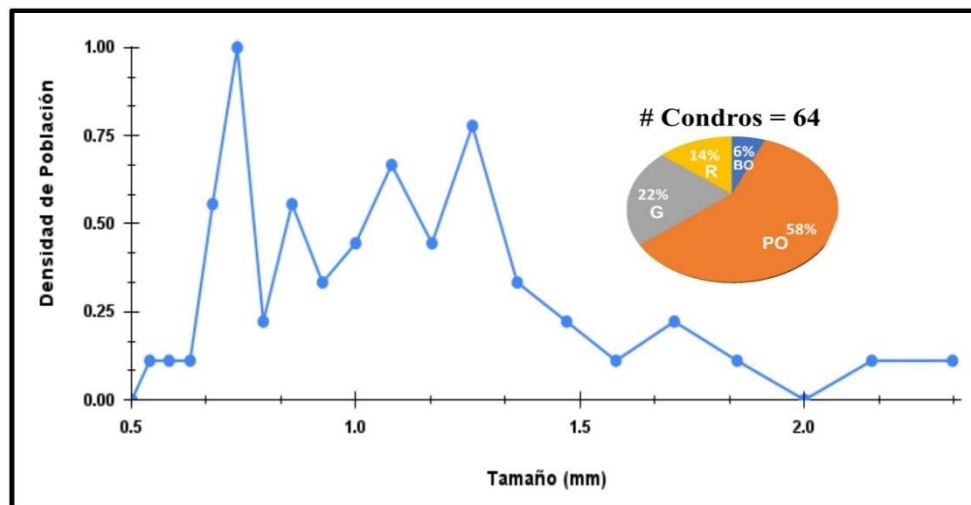


Figura 3.2. Distribución y abundancia relativa de tamaño y tipos de condro de la condrita ordinaria Gold Basin.

**El Pozo – L5:** en 2018, Corona Chávez et al., describen a esta condrita como L5 con una etapa de choque baja (S2-S3) y un grado de intemperismo W2-3. Describen venas con formas irregulares y relativamente subparalelas causadas por el choque, las cuales han fracturado los componentes principales; este sistema de venas puede ser equivalente a las fracturas rellenas de vidrio descritas anteriormente; el sistema de venas está relleno de troilita en lugar de vidrio. Calculan un porcentaje aproximado del 30 – 45% de condros, fragmentos

de condros y/o reliquias de condros bien conservados. La matriz la describen como granular de grano mediano, compuesta principalmente de olivino y en menor medida de ortopiroxenos.

Describen que los condros presentan formas esféricas a elipsoides; tienen presencia de bordes ígneos y de acreción, fuertemente soldados. En este trabajo no se observaron bordes ígneos en los condros. Se reportan texturas como: porfídicos de olivino  $\pm$  piroxeno (PO  $\pm$  POP), granular de olivino (GO), barrado de olivino (BO), radial de piroxeno (RP) y criptocristalinos (C). Estas texturas son similares a las observadas en este trabajo, con excepción de los condros RP y los condros POP, los cuales no fueron distinguidos.

Megascópicamente: presenta una notable oxidación en toda su superficie, presenta coloración amarilla, naranja y tonos café debido a la oxidación. Existe la presencia de fracturas rellenas de vidrio.

Microscópicamente: Presenta una relación matriz – condros del 76.67% - 23.33%, respectivamente. La textura de los condros es: 1) barrado de olivino (BO) el cual representa el 3.84% del total, estos condros presentan formas bien definidas. 2) condros porfídicos de olivino (PO) representan el 58.65% del total, las formas de estos condros son claramente observables. 3) granulares de olivino (GO) representan el 29.81% del total, sus formas son distinguibles, sin embargo, los bordes de los condros parecen disgregarse, posiblemente por el estado de oxidación de la muestra. Algunos presentan texturas masivas, 4) criptocristalinos (C), representa el 7.7% del total, sus formas están bien definidas, algunos presentan fracturas, las cuales están rellenas del mismo material presente en la matriz.

Se encuentran agregados cristalinos sin alguna forma aparente, porfídicos muy fracturados compuestos principalmente de olivinos. Las fracturas están rellenas de vidrio. En los condros no se observan bordes. La mayor concentración del tamaño de diámetro se encuentra en un rango amplio, el cual abarca desde 640 – 702  $\mu\text{m}$  (figura 3.4).

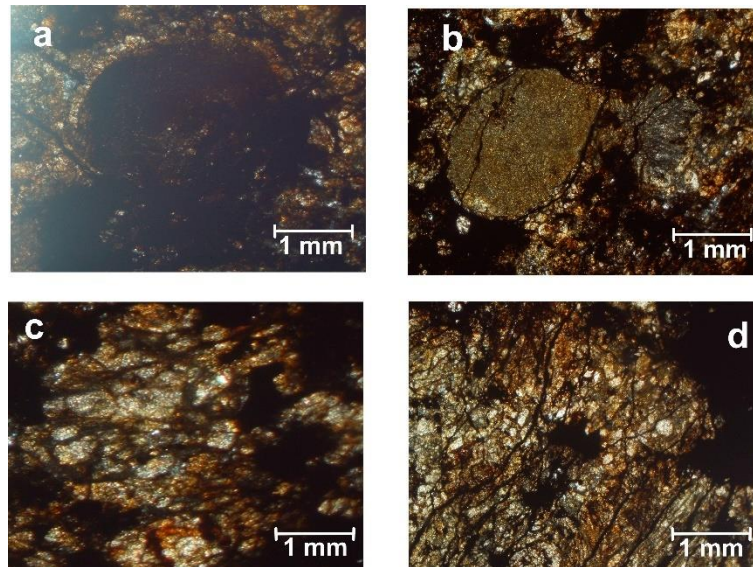


Figura 3.3. a) Condro criptocristalino (C); b) del lado izquierdo se observa un condro criptocristalino de piroxeno (C), del lado derecho se observa un condro radial de piroxeno (RP); c) condro porfídico de olivino (PO); d) agregado cristalino porfidico de olivino y piroxeno.

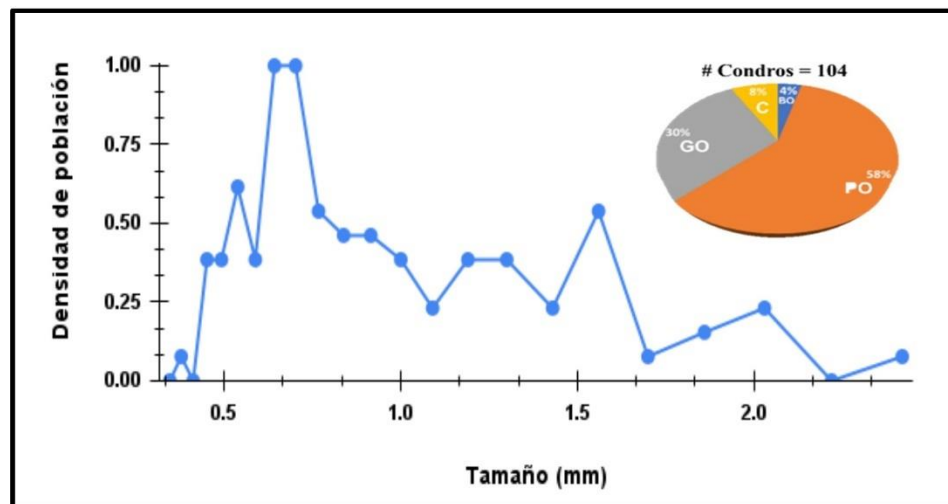


Figura 3.4. Distribución y abundancia relativa de tamaño y tipos de condro de la condrita ordinaria El Pozo.

**NWA 869 – L6:** en 2011 Metzler et al., identifican más de 27 litologías conformando la brecha, las cuales presentan clastos de condritas desequilibradas y equilibradas. La matriz es parcialmente clástica, sin embargo, también presenta una mezcla de grano fino provenientes de las litologías que la conforman (Metzler et al., 2011).

Describen un grado de meteorización W1 y una clasificación de choque S3. Los distintos clastos que la conforman son de diferentes tipos petrológicos. Los condros se

encuentran mezclados en la matriz, presentan formas externas bien definidas y en ocasiones con mesóstasis vítrea. Se encuentran condros ricos en olivino y piroxeno, los condros en los clastos de mayor grado petrológico presentan texturas de recristalización.

Megascópicamente: la muestra presenta claros signos de oxidación, con coloración en tonos grises y algunos rojizos en las partes que están oxidados, los espacios vacíos en la matriz esta rellena de vidrio producido por impacto. No se observan fracturas en los condros, al igual que no se encuentran bordes en estos. Se puede distinguir fracturas en la matriz, las cuales están rellenas por vidrio.

Microscópicamente: Presenta una relación 78.83% matriz – 21.17% condros, aproximadamente. Se puede encontrar: 1) condros porfídicos (PO) principalmente, los cuales representan el 44.7% del total, estos condros presentan formas bien definidas, 2) barrados (BO) con el 4.9%; 3) los condros granulares de olivino (GO) principalmente, representan el 46.9% siendo estos los más abundantes en la muestra. 4) condros criptocristalinos (C) representan solo el 3.5% del total, estos condros se presentan en formas bien definidas. También se observan agregados cristalinos porfídicos y radiales de olivino y piroxeno. Una mayor concentración del tamaño de diámetro se encuentra en un rango amplio, el cual abarca desde 540 - 630  $\mu\text{m}$ . Se observa un pico en el rango 790  $\mu\text{m}$  (figura 3.6)

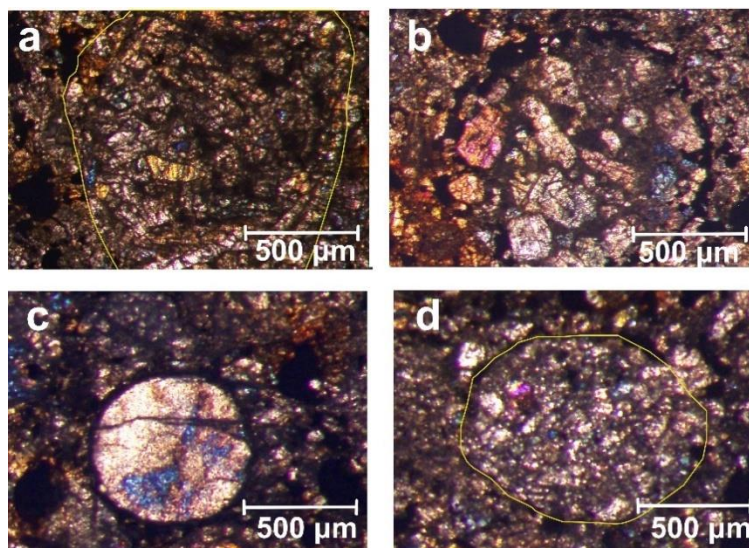


Figura 3.5. a) Condro barrado de olivino (BO); b) condro porfídicos de olivino (PO); c) condro criptocristalino (C) con forma bien definida; d) condro granular de olivino (GO).

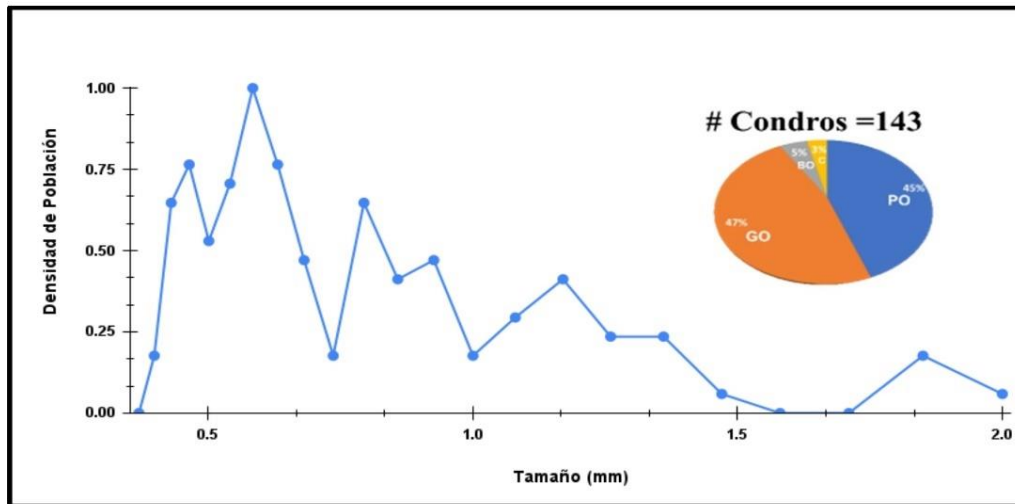


Figura 3.6. Distribución y abundancia relativa de tamaño y tipos de condro de la condrita ordinaria NWA 869 - Brecha.

**Escalón - H4:** Reyes – Salas et al., (2010) describen a Escalón como una condrita ordinaria H4. La muestra presenta una corteza de fusión de color negro. En la muestra descrita se observan condros con formas bien definidas y abarcan aproximadamente el 60% de la masa total de la condrita. Los tipos texturales de los escasos condros observados son: BO, POP, GP y C. También se pueden encontrar condros con texturas transicionales de barrado a radial, los que probablemente se reconocen en este trabajo como radiales de piroxeno. Los condros tienen un porcentaje de vidrio de 10 – 29% y aproximadamente 5% de matriz (Reyes-Salas et al., 2010).

Megascópicamente la muestra observada en este trabajo es muy pequeña (aproximadamente 33.75 mm<sup>2</sup>) y el conteo de condros no es representativo. Son pocos los condros que se encuentran bien definidos, algunos están fragmentados y otros disgregados en los bordes. Se observa un material oscuro en toda la matriz rellenando espacios.

Microscópicamente: 1) los condros porfídicos de olivino (PO) ocupan el 45% del total, estos condros no presentan formas bien definidas y 2) los condros radiales de piroxeno (RP) ocupan solo el 5% del total, se encuentran fragmentados, aun así, se alcanza a observar su forma; 3) condros granulares de olivino (GO) constituyen el 45%, estos condros se presentan en formas bien definidas, algunos de estos presentan disgregación en los bordes,

4) el 5% restante lo ocupan los condros criptocristalinos. Algunos condros y agregados cristalinos presentan minerales diminutos de formas geométricas.

A pesar de que la cantidad de condros es pequeña, se logró obtener los siguientes diámetros: 450  $\mu\text{m}$ , 560  $\mu\text{m}$ , 700  $\mu\text{m}$ , y 1000  $\mu\text{m}$ .

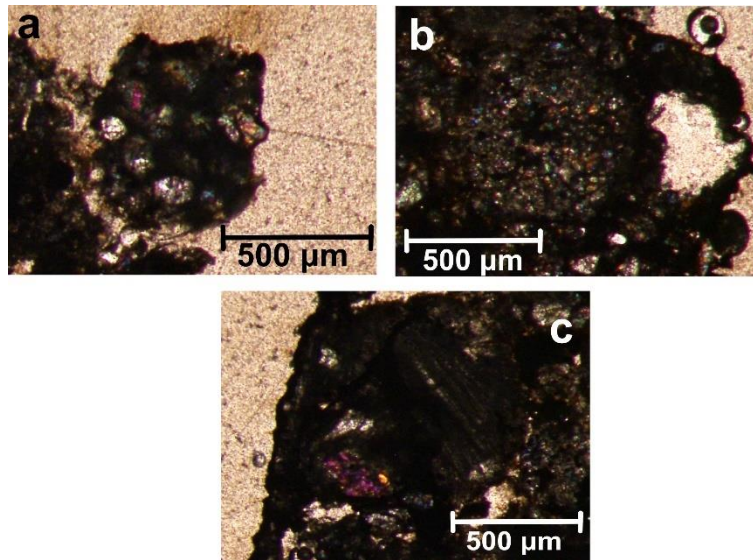


Figura 3.7. a) Condro porfídico de olivino (PO); b) condro granular de olivino y piroxeno; c) condro radial compuesto principalmente de piroxeno (RP).

**Nuevo Mercurio – H5:** Cervantes (2009) describe a esta condrita como una H5 con un grado de metamorfismo de impacto S1. Describe una corteza de fusión que cubre toda la roca, de color negra y textura porosa. Los condros son soportados por una matriz de cristales cementados por vidrio parcialmente desvitrificado y minerales opacos.

Describe texturas como: barrado de olivino (BO, 30.3%), granulares de olivino y piroxeno (GOP, 12%), radiales de piroxeno (RP, 6.1%) y criptocristalinos (C, 5.5%); porfídicos de olivino (PO, 29.8%), porfídicos de olivino y piroxeno (POP, 10.2%), porfídicos de piroxeno (PP, 6.1%). Los últimos tres tipos texturales no se identificaron en este trabajo.

Megascópicamente presenta oxidación en la totalidad de la muestra, se observa una estructura masiva con colores amarillos, naranjas y café. Se observan cristales individuales de distintos tamaños, algunos son tan pequeños que es complicado identificarlos.

Microscópicamente: presenta una relación 85.38% matriz – 14.62% condros.



1) Los condros porfídicos de olivino (PO) son los más abundantes con un porcentaje del 52.28%, presentan formas bien definidas. 2) los condros granulares de olivino (GO) representan el 35.53% del total, presentan formas bien definidas, en el espacio entre los minerales tienen un material de color oscuro, muy parecido al material presente en la matriz, algunos condros presentan fracturas. 3) los condros radiales formados principalmente de piroxeno (RP) representan el 2.54% del total, 4) condros criptocristalinos (C) abarcan 6.1% del total de la muestra, 5) finalmente barrados de olivino (BO) los cuales representan el 3.55%. Se identificaron cristales aislados euhedrales y sub-euhedrales de olivino y piroxeno. El diámetro aparente de los condros se encuentra entre los 370 - 2220  $\mu\text{m}$ , con una media en un rango de 450 – 580  $\mu\text{m}$ , aproximadamente. Existe otro rango importante en 760  $\mu\text{m}$  (figura 3.9).

Debido al grado de oxidación de la muestra es difícil identificar si los condros poseen bordes o no. La mayor parte de los condros parecen estar disgregándose, tanto en el centro como en los contornos de estos, sin embargo, siguen siendo perceptibles sus formas. Los espacios de la matriz están rellenos de vidrio principalmente

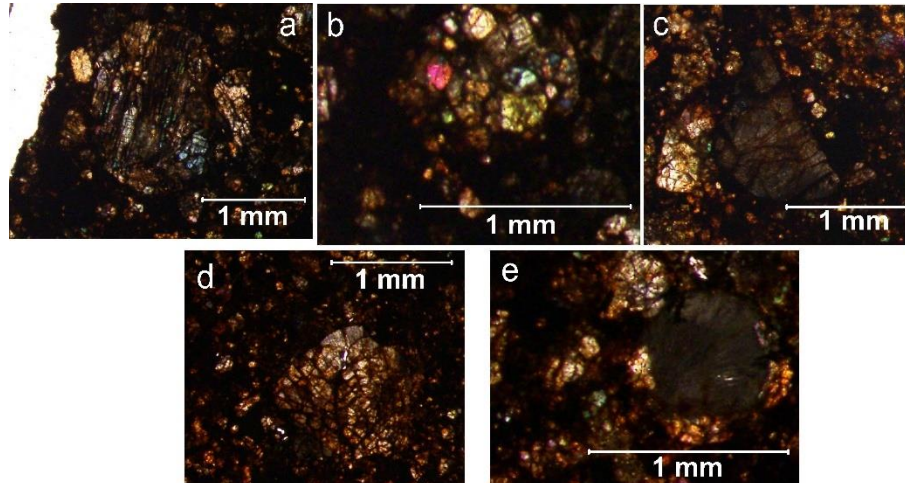


Figura 3.8. a) Condro barrado de olivino (BO); b) condro porfídico de olivino (PO), c) condro criptocristalino, presenta varias fracturas rellenas del vidrio presente en la matriz (C); d) condro granular principalmente de olivino (GO); e) condro radial de piroxeno (RP).

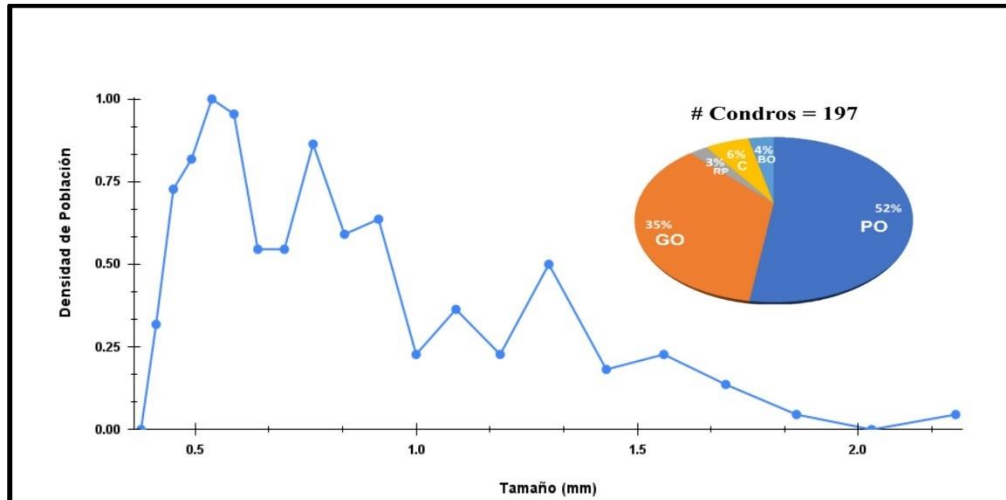


Figura 3.9. Distribución y abundancia relativa de tamaño y tipos de condro de la condrita ordinaria Nuevo Mercurio.

**Cosina- H5:** Cervantes (2009) describe a Cosina como una condrita H5, con un metamorfismo de impacto S1. La muestra presenta una corteza de fusión color pardo, la cual cubre aproximadamente el 60% de la muestra.

Los condros representan aproximadamente el 50% de la muestra, los cuales presentan texturas como: POP (20%), BO (17%), PO (15%), C (14%), GOP (14%), RP (11%) y PP.

Megascópicamente la muestra presenta colores grises, con tonalidades café – anaranjadas en las secciones oxidadas; el porcentaje de oxidación en esta muestra es bajo ~20%. Esta muestra presenta una gran cantidad de minerales individuales, de tamaños distintos, por esto, algunos condros son difíciles de identificar ya que se confunden con los cristales individuales.

Microscópicamente: Presenta una relación matriz – condro del 81.16% - 18.82%, respectivamente.

Los condros encontrados son: 1) granulares de olivino (GO) son los más abundantes, presentando un porcentaje del 46%, estos condros presentan formas bien definidas. 2) algunos condros completos radiales de piroxeno (RP, 6.3%) presentan fracturas rellenas por vidrio, presentan una coloración oscura en la mesostasis, con formas bien definidas. 3) condros porfídicos de olivino (PO), representan el 32.4% del total, presentan formas

irregulares, y una mesostasis de color gris; al igual que los condros GO, se llegan a confundir entre los cristales individuales. 4) Los condros criptocristalinos (C) representan el 10.8% del total, presentan formas bien definidas, en algunos condros se pueden observar bordes; 5) condros barrados de olivino y piroxeno (BOP, 4.5%). Se encontraron condros de 370 – 2030  $\mu\text{m}$ . La mayor concentración de la medida de los diámetros se encuentra entre 490 – 580  $\mu\text{m}$ , principalmente. Se puede observar otro valor importante en 830  $\mu\text{m}$  (figura 3.11).

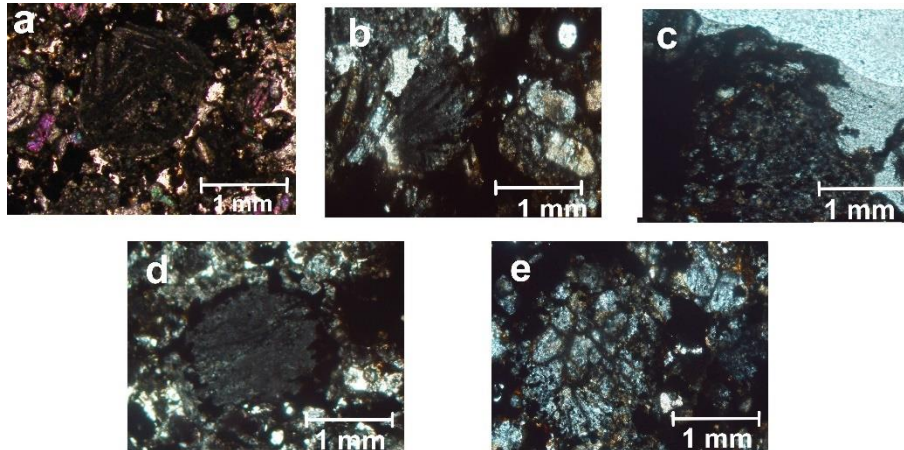


Figura 3.10. Condro barrado de olivino y piroxeno (BOP), b) a la izquierda e la imagen se puede observar un condro radial de piroxeno (RP), del lado derecho se observan cristales individuales euhedrales de olivino; c) condro granular compuesto principalmente de olivino (GO); d) condro criptocristalino (C) con borde de vidrio; e) condro porfídico de olivino (PO).

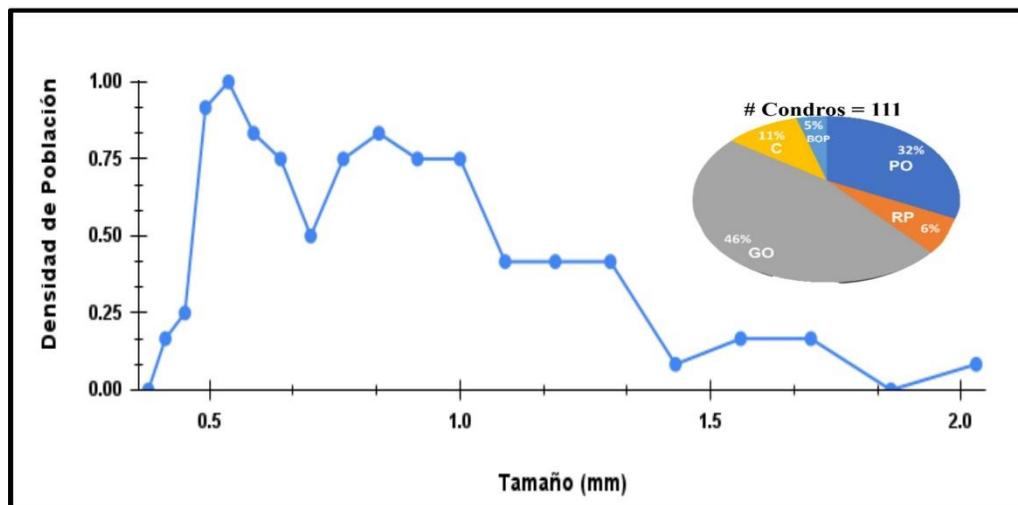


Figura 3.11. Distribución y abundancia relativa de tamaño y tipos de condro de la condrita ordinaria Cosina.

**Aldama - H5:** Megascópicamente la muestra tiene un grado alto de oxidación, presentando coloraciones rojizas, café y amarillentas; la matriz está conformada de vidrio y óxidos. Todos los condros se encuentran fracturados, estas fracturas se encuentran rellenas del mismo material de la matriz.

Microscópicamente: Se calcula una proporción 82.16% matriz – 17.84 % condros, aproximadamente. 1) se encuentran condros porfídicos de olivino (PO) estos representan el 48.27% del total de la muestra, se presentan con formas bien definidas y fracturas dentro de los condros, algunos de ellos muestran presencia de oxidación radial. 2) los condros granulares están compuestos principalmente de olivino (GO) estos representan el 38.8% del total, se encuentran con formas bien definidas y fracturas dentro de los condros. 3) condros criptocristalinos (C) abarcan el 6.9%, al igual que los demás tipos presentan formas bien definidas y fracturas en su interior. Finalmente, 4) los condros barrados de olivino (BO) representan solo el 6.03% del total, se encuentran con formas bien definidas. No se encontraron bordes en los condros.

Algunas de las fracturas presentan un relleno de un mineral de color gris, parecido al mineral presente en los condros criptocristalinos. Además, se observan agregados cristalinos en los bordes de la muestra, estos presentan cristales individuales de olivino principalmente. Además, se encuentra una media del tamaño de diámetro en el rango de 490 – 530  $\mu\text{m}$ , siendo este el rango principal; se encuentran otras dos medias importantes en 640  $\mu\text{m}$  y 760  $\mu\text{m}$  (figura 3.13).

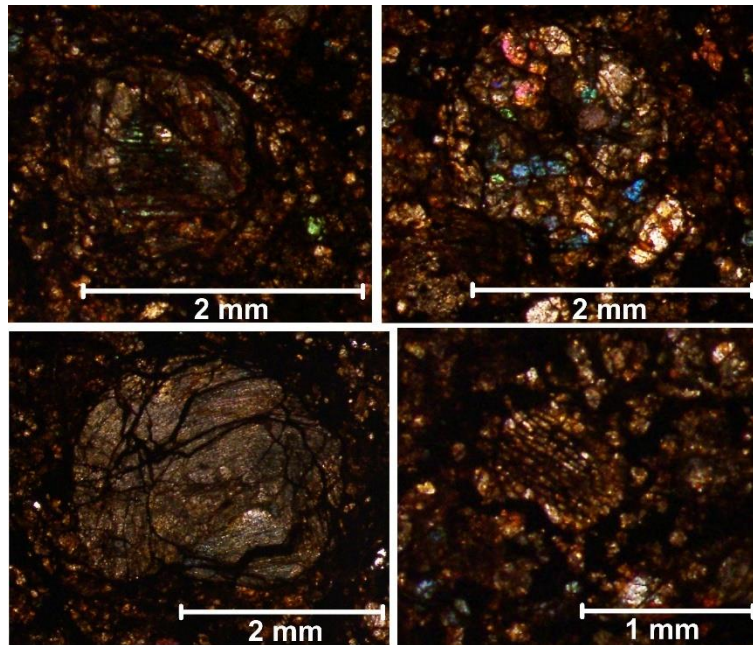


Figura 3.12. a) Condro porfídico de olivino (PO) con presencia de oxidación radial; b) condro granular de olivino (GO); c) condro criptocristalino fracturado de piroxeno (C), las fracturas están rellenas óxidos/vidrio; d) condro barrado formado de olivino principalmente (BO).

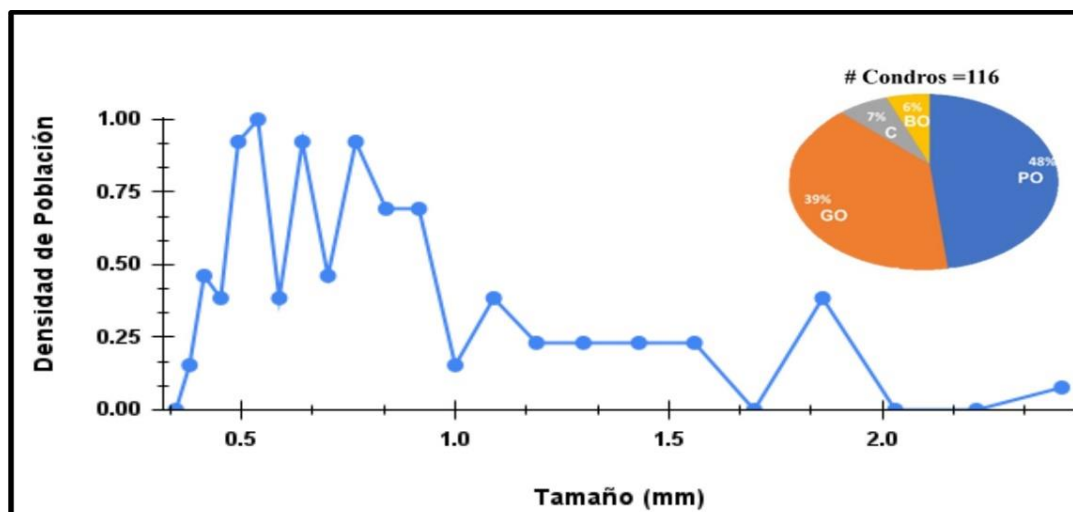


Figura 3.13. Distribución y abundancia relativa de tamaño y tipos de condro de la condrita ordinaria Aldama.

**Allende (CV3):** Rubin y Wasson (1987) describen que los condros de Allende presentan bordes de grano grueso, con textura homogénea, lo cual sugiere una formación a partir de granos más finos. La matriz presenta características similares a los bordes de grano grueso, por lo que sugiere una formación de reservorios de composición similar de polvo

nebular. Los componentes principales del meteorito Allende son los condros (~45% en volumen), inclusiones refractarias y material de matriz de carbono. Se distinguen los siguientes tipos texturales en condros: PO, PO, PP, BO, RP y C.

En este trabajo solo se reconocieron dos tipos texturales de los seis reconocidos por (Rubin & Wasson, 1987).

Megascópicamente la muestra presenta una coloración oscura debido al material orgánico que se encuentra embebida en la matriz. Todos los tipos de condros (con excepción de los condros criptocristalinos) presentan formas ben definidas, contrariamente, los CAIS presentan formas irregulares esparcidas por toda la muestra.

Microscópicamente: presenta una proporción condro – matriz de 12.3 % - 87.7%, respectivamente. Se analizaron un total de 90 condros, de los cuales 1) el 46.7% son condros granulares (GO). 2) condros porfídicos de olivino (PO) bien definidos, representan el 44.4% del total, 3) los condros criptocristalinos (C) abarcan el 8.9% de la muestra, los cuales parecen estarse disgregando; presencia de CAIs. No se observó la presencia de bordes ni de fracturas. El diámetro aparente se encuentra entre 260 – 2220  $\mu\text{m}$ , con una media en 580 – 700  $\mu\text{m}$  (figura 3.15).

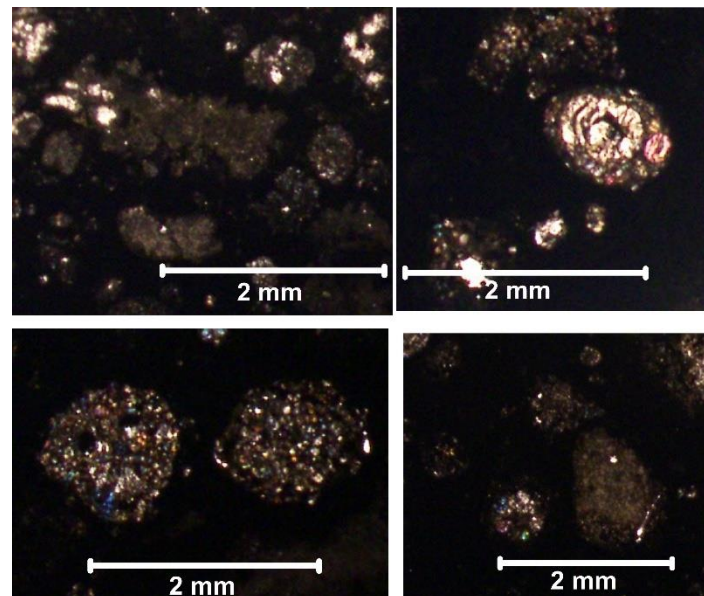


Figura 3.14. a) CAI (*calcium – aluminium – rich inclusion*); b) condro porfídico de olivino (PO); c) condros granulares de olivino (GO); d) en el lado inferior izquierdo se encuentra un condro porfídico de olivino (PO), del lado derecho de este se encuentra un condro criptocristalino (C).

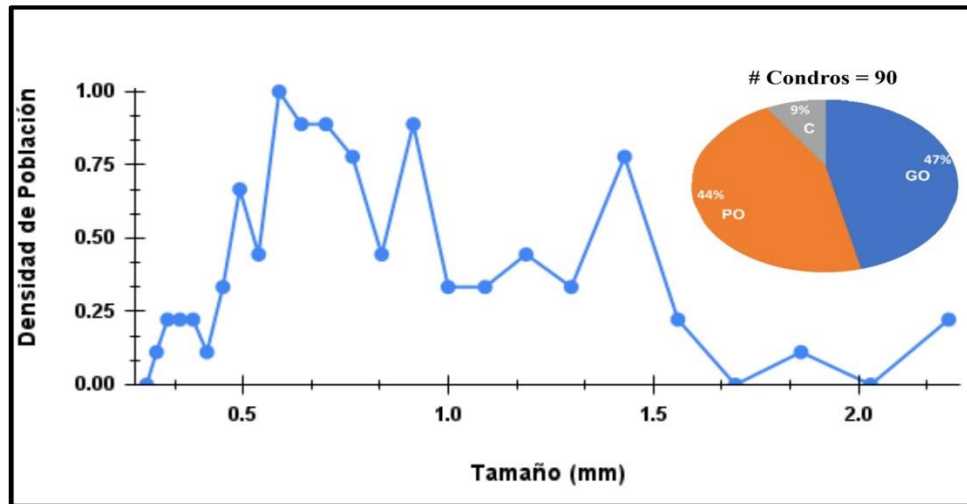


Figura 3.15. Distribución y abundancia relativa de tamaño y tipos de condro de la condrita carbonácea Allende.

**NWA - CV3** (Sin descripción formal en el *Meteoritical Bulletin Database*): Megascópicamente la coloración de las muestras es principalmente en tonos marrones; condros compuestos principalmente de olivino. La muestra presenta oxidación principalmente en los bordes de la lámina. Los condros y algunos CAIs (*calcium – aluminium – rich inclusions*) son visibles tanto en muestra de mano como en lámina delgada. La matriz es color oscuro.

Microscópicamente: Presenta una proporción condro 15% - matriz 85%, aproximadamente. Se analizaron un total de 89 condros, de los cuales los más abundantes 1) son los granulares de olivino (GO) con un porcentaje aproximado del 42.7%, estos condros presentan formas bien definidas, algunos de ellos cuentan con bordes. 2) los condros porfídicos de olivino (PO) representan el 51.7% del total, no se perciben bordes en ellos, algunos de estos condros presentan fracturas, las cuales no presentan algún relleno, tampoco se observa que estas fracturas extiendan por la matriz. 3) los condros radiales de olivino (RO) componen solo el 5.6% del total, algunos de estos condros están disgregados, por lo que no tienen una forma bien definida, de igual manera, se pueden identificar algunos bordes en este tipo de condro. El diámetro aparente tiene un rango bastante amplio, 260  $\mu\text{m}$ – 1860  $\mu\text{m}$ , con una media en 642 - 760  $\mu\text{m}$ , aproximadamente (figura 3.17).

Los CAIs se encuentran esparcidos a lo largo de la matriz y entre los condros.

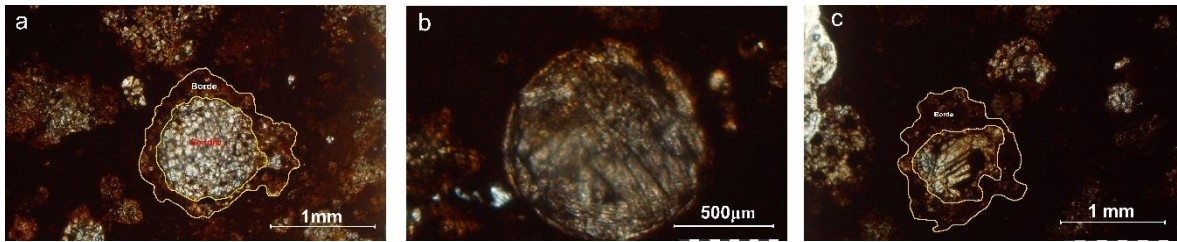


Figura 3.16. a) Condro granular de olivino (GO) con borde de grano fino (acrecional); b) condro radial de piroxeno (RP) sin borde aparente; c) condro radial de olivino (RO) muestra un borde grueso, de grano fino (acrecional).

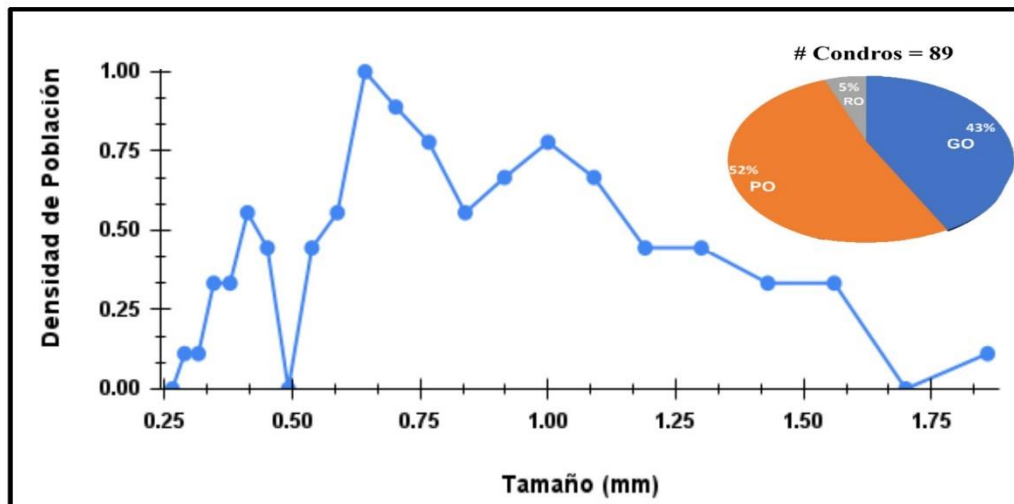


Figura 3.17. Distribución y abundancia relativa de tamaño y tipos de condro de la condrita carbonácea NWA CV3.

**Libia** (Sin descripción formal en el *Meteoritical Bulletin Database*): Megascópicamente a causa del grado de oxidación de la muestra, presenta una coloración roja, amarilla y tonos marrón, casi en su totalidad, la matriz está formada de vidrio, principalmente, al igual que el relleno de las fracturas.

Microscópicamente: Se estima una relación 85% matriz – 15% condros y agregados cristalinos. Se observan: 1) condros porfídicos (P) con una distribución aproximada del 49%, 2) condros criptocristalinos (C) con el 13% del total, 3) granulares (G), representan el 35% y 4) barrado (B) abarcan solo el 3%, del total. También se observan agregados cristalinos granulares, en estos se llegan a distinguir algunos condros bien definidos. No se observan condros con bordes, sin embargo, en un condro criptocristalino se puede identificar un borde muy delgado de color oscuro.



Cabe destacar que todos los condros están fragmentados. A causa de la oxidación de la muestra es complicado identificar qué tipo de minerales componen los condros y los agregados cristalinos, los minerales que son perceptibles principalmente son el olivino y algunos piroxenos. También, debido a la oxidación y el grado de fracturamiento de la lámina es posible que algunos condros tengan una clasificación distinta a la descrita en este texto (figura 3.18). La mayor concentración del tamaño de diámetro se encuentra en dos rangos importantes, 490 -580  $\mu\text{m}$  y 702 – 830  $\mu\text{m}$ , respectivamente (figura 3.19).

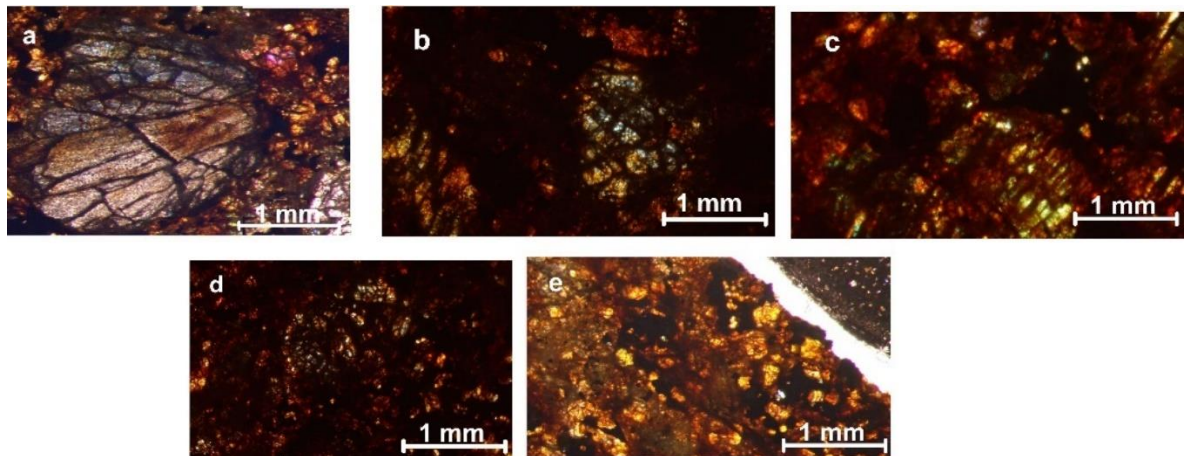


Figura 3.18. a) Condro criptocristalino (C) fracturado, sus fracturas están rellenas de vidrio, también presenta un pequeño borde de color oscuro; b) condros porfídico (P); c) condro barrado (B); d) condros granulares (G); e) agregados cristalinos.

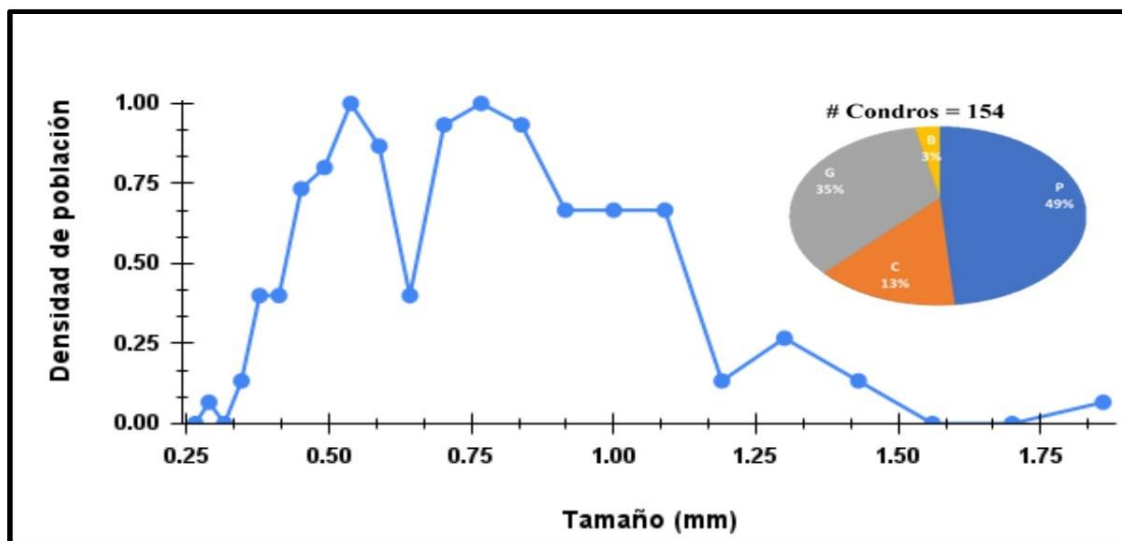


Figura 3.19. Distribución y abundancia relativa de tamaño y tipos de condro de la condrita ordinaria Libia.

### 3.2 Analisis EDS en la condrita Libia

En algunos puntos de la muestra, se realizó un análisis EDS (Espectroscopia de Energías Dispersiva) de cuatro secciones de la matriz, para poder identificar los principales elementos que componen la matriz. Los elementos más abundantes son: O, Na, Mg, Al, Si, Fe y S. De acuerdo con la descripción de varios autores en diferentes condritas ordinarias, uno de los componentes de la matriz generalmente es vidrio o vidrio desvitrificado lo que gracias a la porción analizada en el MEB se pudo identificar al O y Si como los elementos de mayor predominancia (figura 3.20), sugiriendo así que la matriz está compuesta principalmente de vidrio; el P, Cl, K, Ca Ti, Mn, Ag, Cu, Cr y Ni, se encuentran en menor proporción en los puntos analizados, el Cu y el Ni se encuentran en pequeñas manchas o rellenando fisuras.

También, se muestran manchas blancas, las cuales presentan una gran concentración de Fe y Ni, indicando la presencia de Fe -Ni metálico (figura 3.20).

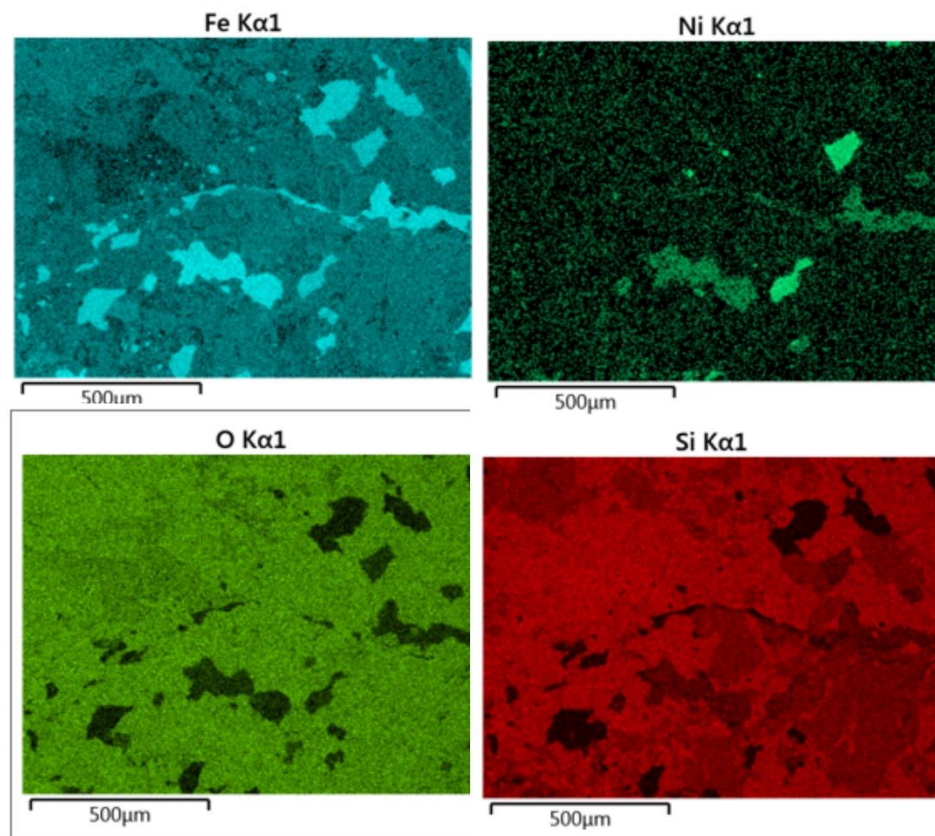


Figura 3.20. Concentración elemental de las secciones analizadas.

Se pudieron reconocer dos condros a los que también se les realizó el análisis elemental, el Al, Na, Ca y Fe fueron los principales elementos que componen a estos condros. Individualmente, uno de los condros, presenta una concentración mayor de Mg y Si (figura 5.4).

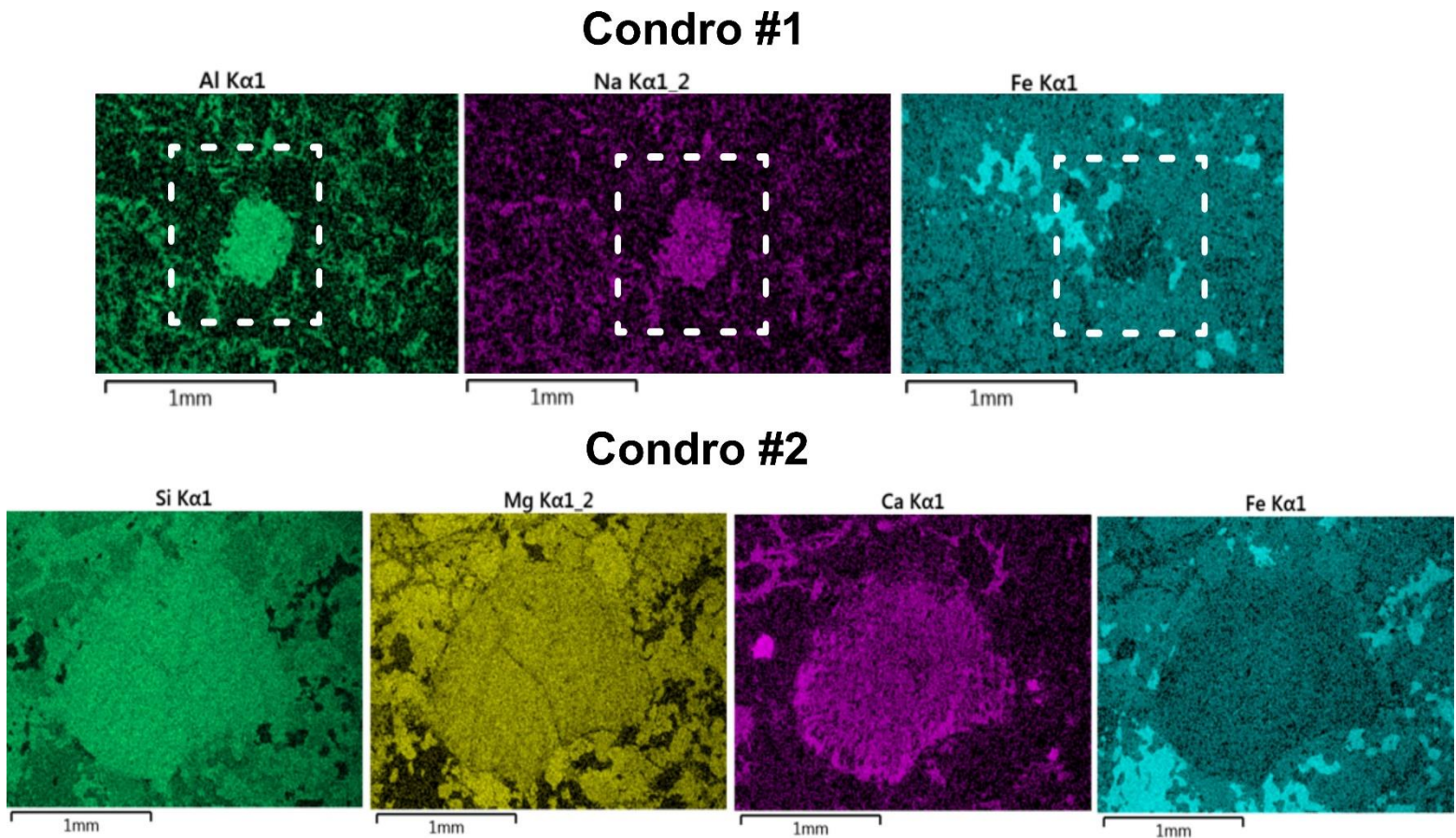


Figura 3.21. Concentración elemental de los condros de Libia. En el condro #1 la abundancia de Na y Al en las mismas regiones se asocia a la presencia de plg sódica, mientras que el Fe metálico se localiza en granos dispersos formando una corona en el condro. En el condro #2 la abundancia de Si, Mg, y Ca se asocia a presencia de piroxenos y el Fe metálico nuevamente se agrupa como granos al borde del condro.

## **Capítulo 4: Análisis dimensional 3D**

La textura es el conjunto de relaciones de tamaño y forma de los cristales o clastos que conforman una roca. En la textura pueden existir variaciones en la distribución del tamaño de grano y la abundancia relativa, por lo que esto suele determinarse mediante métodos cuantitativos (Castro Dorado, 2015).

En este trabajo, se utilizará la técnica de Distribución de Tamaños de Cristales (DTC) o *Crystal Size Distribution* (CSD, por sus siglas en inglés. Esta técnica describe dos procesos esenciales en la formación de una roca cristalina: nucleación (formación de una nueva fase en un punto dado del sistema) y el crecimiento de los cristales (un cristal preexistente se hace más grande a medida que se agregan más moléculas o iones a su red cristalina). Este tipo de análisis se desarrolló en los procesos industriales y es aplicable a las rocas debido a que las cámaras magmáticas se asemejan a los reactores industriales de producción de cristales (Castro Dorado, 2015).

Los resultados de la técnica DTC se reportan en el capítulo 3, sección 3.1, en las imágenes 3.2, 3.4, 3.6, 3.9, 3.11, 3.13, 3.15, 3.17 y 3.19. En estas imágenes se presenta la distribución de los tamaños de condros de cada condrita analizada. Se encontraron rangos de 490 – 580  $\mu\text{m}$ , 580 – 700  $\mu\text{m}$  y 580 – 640  $\mu\text{m}$ , para las condritas H, L y CV, respectivamente. El análisis realizó a partir de las imágenes obtenidas de las secciones delgadas de cada muestra.

#### **4.1 Aplicaciones de análisis 3D en el estudio de los meteoritos:**

En el caso de los meteoritos, el uso de la técnica tridimensional también permite la cuantificación de los componentes de las condritas, los condros, CAI's, inclusiones y agregados en general. Las imágenes de MTRX (Microtomografía de Rayos X) permite generar la representación 3D del análisis DTC, mayormente utilizada cuando no se cuenta con una sección delgada de la muestra y no se desea o no es posible afectar la muestra.

Hezelet et. al. 2013 (en (Hanna & Ketcham, 2017)), realizaron un análisis petrográfico 3D de dos condritas (Allende y Mokoia) en donde obtuvieron abundancias modales 3D de condros, CAIs, condros compuestos, matriz, sulfuros, metal y porosidad, utilizando el software PhaseQuant.

Hanna y Ketcham (2015), realizaron la medición 3D de los bordes de grano fino en la condrita CM Murchison; pudieron discriminar los bordes alrededor de los condros, debido a su menor contenido de Fe en relación con la matriz que los rodean.

Tait et al., 2014, realizaron un análisis petrográfico 3D de una red interconectada de plagioclasas en una condrita H7 (figura 3.1). Dentro de la sección 2D, las plagioclasas presentaban una apariencia aislada, aunque en realidad se presentan interconectadas en gran medida. Se descubrió que más de 60% de los nodos presentan una coordinación de 3 o 4, lo que sugiere que la plagioclasa ha pseudomorfizado una red de fusión con soporte de grano.

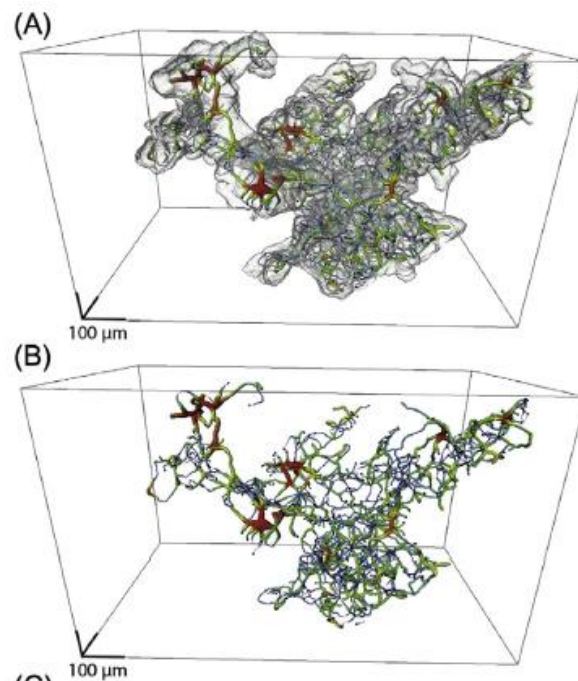


Figura 4.1. A) plagioclasa representada en gris. B) red esquelética coloreada donde los colores más cálidos simbolizan los segmentos más gruesos. Figura tomada de (Hanna & Ketcham, 2017).

#### 4.2 Modelo 3D de las fases Fe-Ni metálico en la condrita Libia:

El modelo 3D se realizó a partir de las imágenes obtenidas por MTRX utilizando el Software libre Blob3D (Ver Anexo 3 para los detalles de la metodología).

Se analizó un pequeño cilindro de  $0.251 \text{ cm}^3$ , de 0.8 cm de diámetro y 0.5 cm de altura. Se tiene un total 1014 imágenes, sin embargo, debido a la limitada capacidad de cómputo, solo se pudieron procesar 400 imágenes.

Inicialmente se intentó reconstruir la distribución espacial de los condros, sin embargo, estos no fueron fáciles de reconocer, ya que los valores de vóxel son similares a los valores de la matriz, por lo que el software no logra hacer una distinción entre estos dos componentes, por lo tanto, se optó por realizar un modelo del Fe-Ni metálico, los cuales se distinguen fácilmente en las imágenes (representados como áreas blancas en las imágenes, recordando que la escala de los grises va desde los más oscuros hasta los más claros en proporción directa con el peso atómico de los elementos). El objetivo de este modelo es reconocer la estructura interna que presentan estos dentro de la condrita (figura 4.2).

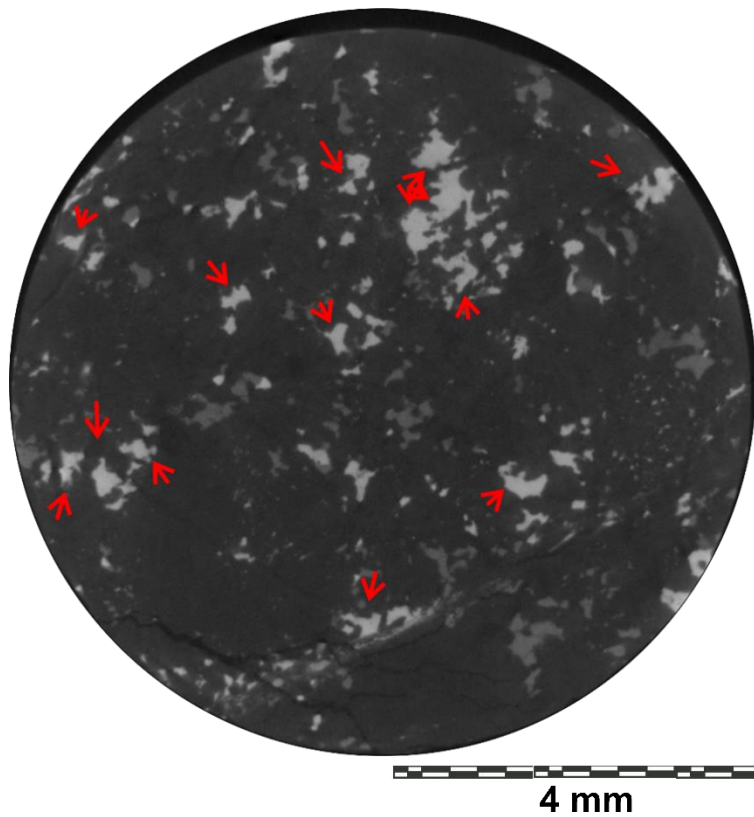


Figura 4.2. Imagen de MTRX de la condrita Libia, las áreas blancas corresponden al Fe-Ni metálico, señalados por las flechas rojas.

De acuerdo con los datos de la corrida en el equipo de tomografía, el espacio entre pixeles es de 0.00493096647 mm y el espacio entre cortes es de 0.0005 mm.

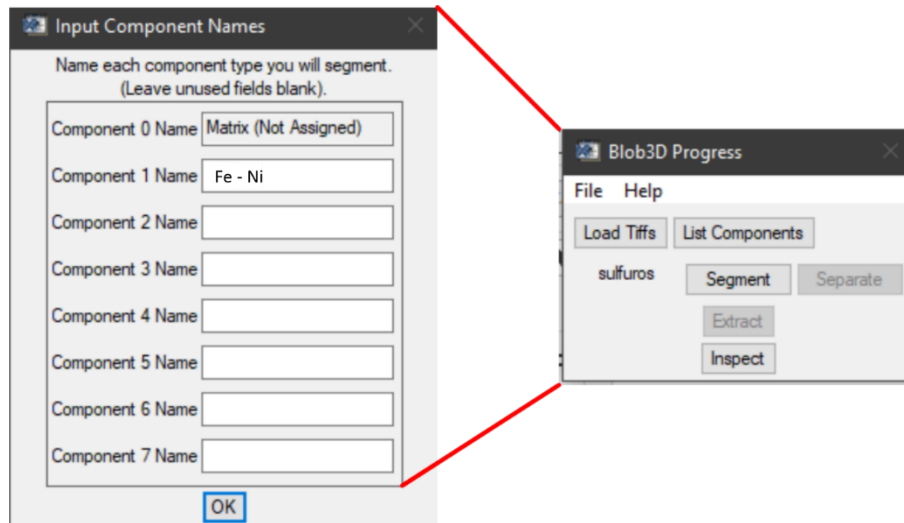


Figura 4.3. Las fases minerales que se representaron en 3D en la condrita Libia, son cristales de Fe-Ni.

Con ayuda de la herramienta “*Draw Line Region*”, se identificó los valores de vóxel en el que se encuentra la fase analizada.

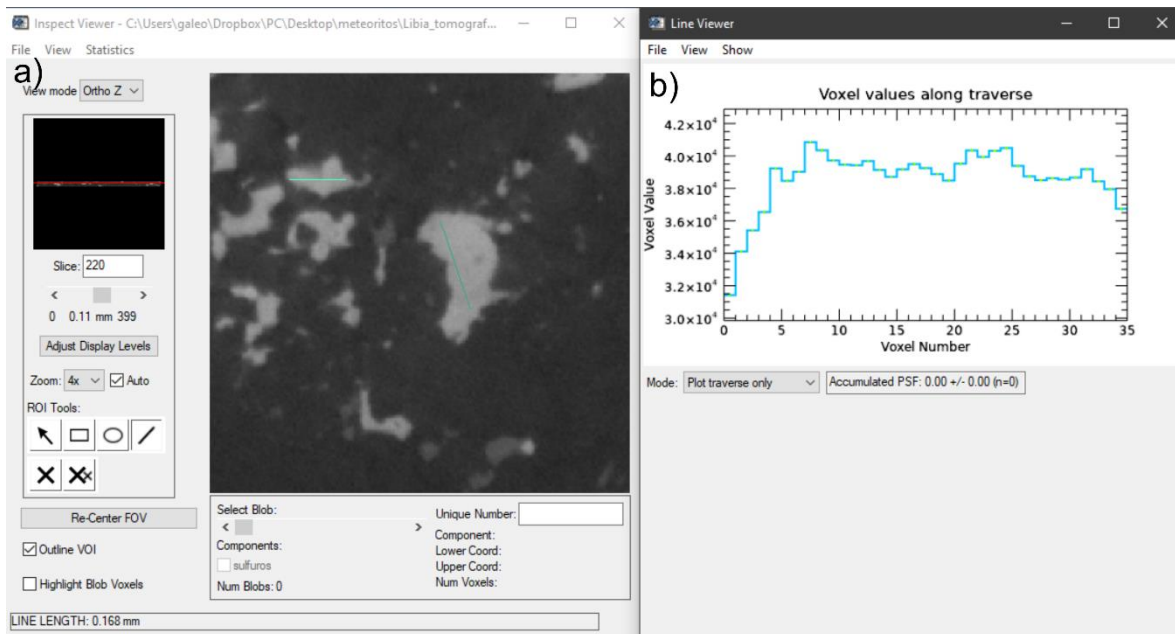


Figura 4.4. a) Se utilizó la herramienta *Draw Line Region* para conocer los valores de vóxel de la región de interés. b) se puede observar en la gráfica los valores de vóxel se encuentran entre  $3.2 \times 10^4 - 4.2 \times 10^4$  voxeles, sin embargo, con este último valor, había algunas regiones que no quedaban cubiertas, por lo que se optó por aumentar el valor hasta  $4.4 \times 10^4$ .

En la sección de segmentación, los valores de vóxel obtenidos anteriormente se introdujeron en la función *General Threshold* (figura 4.5).



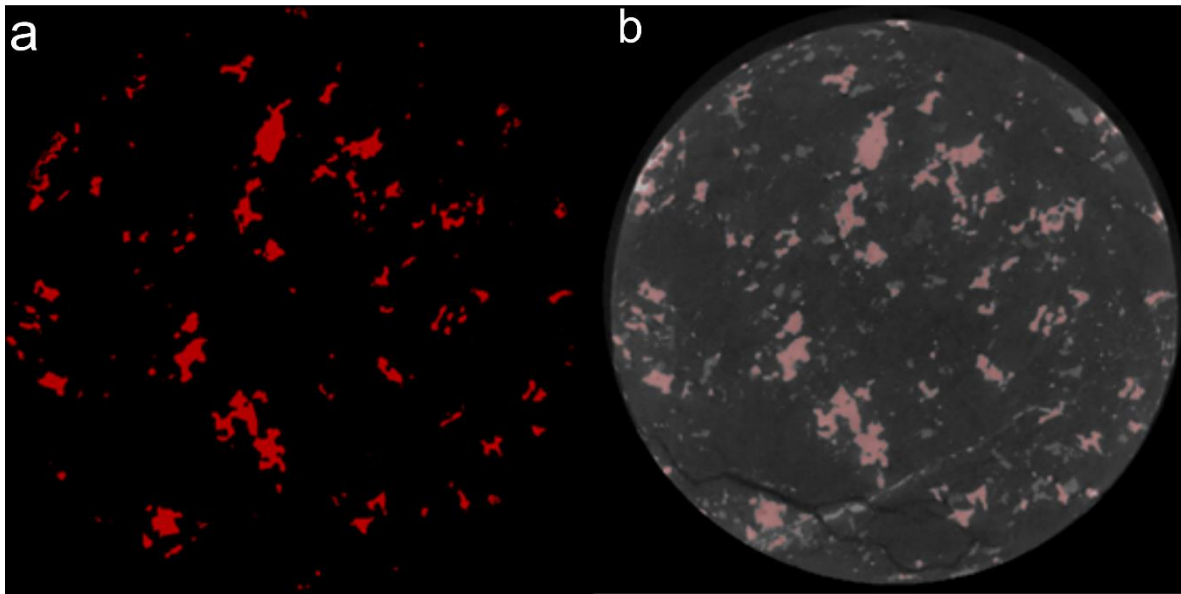


Figura 4.5. a) las áreas rojas muestran la identificación del Fe-Ni metálico basado en los valores de vóxel que se introdujeron en la función *General Threshold*; b) estas mismas áreas rojas se muestran en la imagen original, mostrando su posición.

Se obtuvo un total de 2784 blobs, los cuales representan cristales de Fe-Ni y sus diferentes formas dentro de la condrita. Desafortunadamente debido al tamaño del cilindro analizado, los modelos 3D no muestran un eje Z bien desarrollado. A continuación, se mostrarán cinco de los modelos generados por Blob3D.

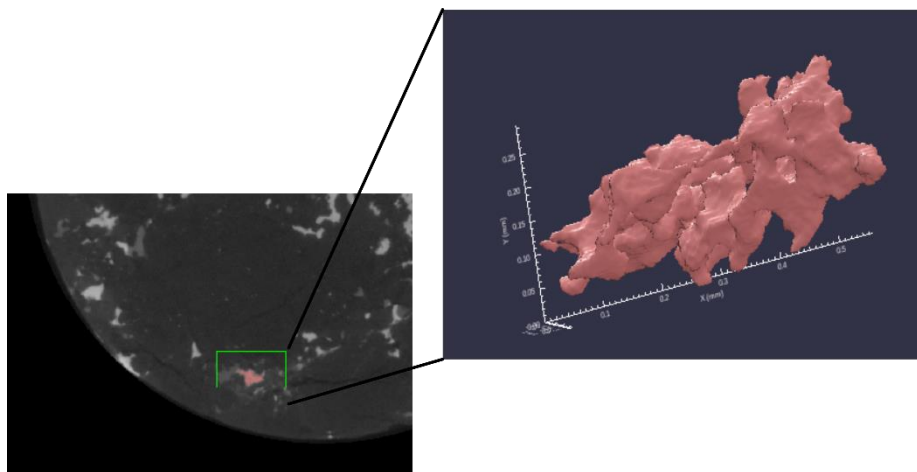


Figura 4.6. Este blob se encuentra en la esquina inferior izquierda, cuenta con dimensiones de 0.6 x 0.3 x 0.03 mm.

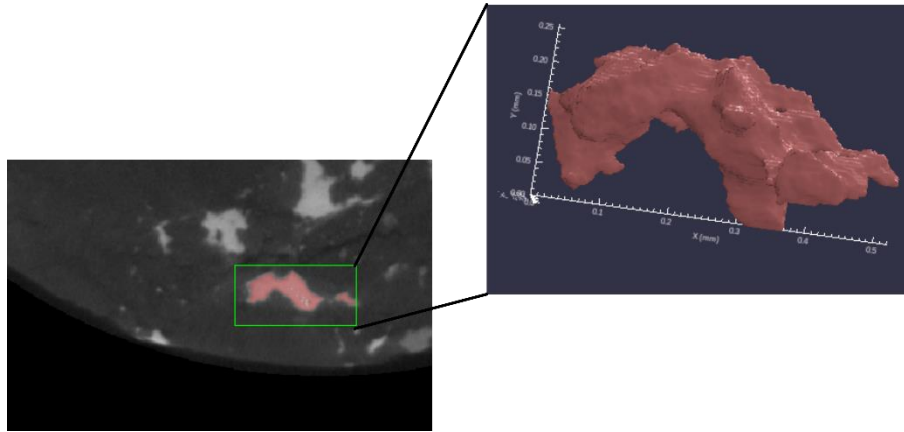


Figura 4.7. El blob se encuentra en la parte inferior de la imagen, cuenta con dimensiones de  $0.6 \times 0.3 \times 0.025$  mm.

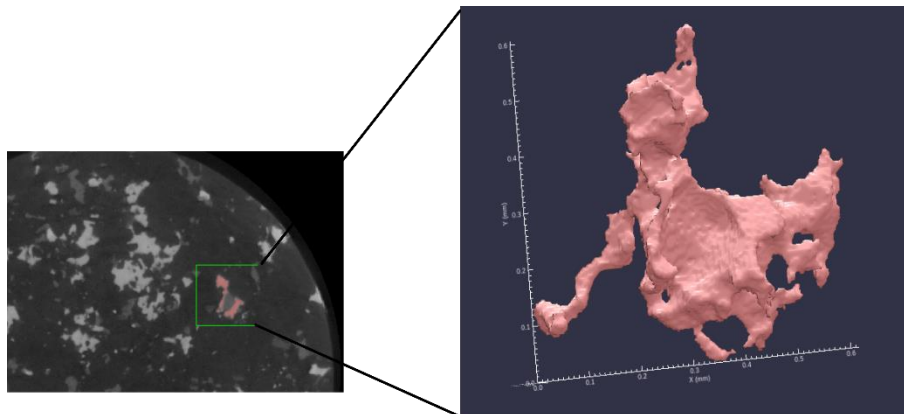


Figura 4.8. Este blob se encuentra en la esquina superior derecha, cuenta con dimensiones de  $0.6 \times 0. \times 0.05$  mm, este blob cuenta con una pequeña cavidad en la parte central de este, en la imagen original se muestra que en esta cavidad se encuentra una pequeña mancha de color gris, la cual, es otro mineral o bien, dada su forma redonda un fragmento de condro, es decir, el metal está cubriendo el condro.

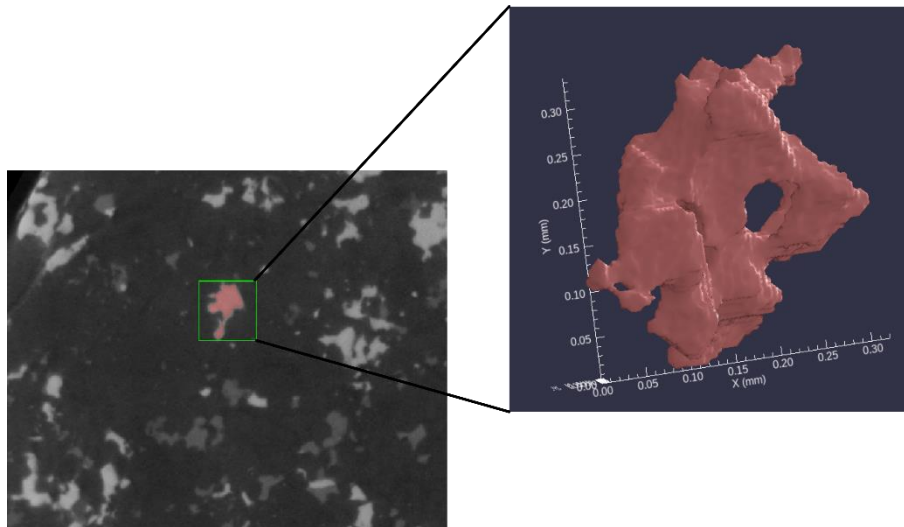


Figura 4.9. Este blob se encuentra en la esquina superior izquierda, cuenta con dimensiones de  $0.3 \times 0.3 \times 0.03$  mm.

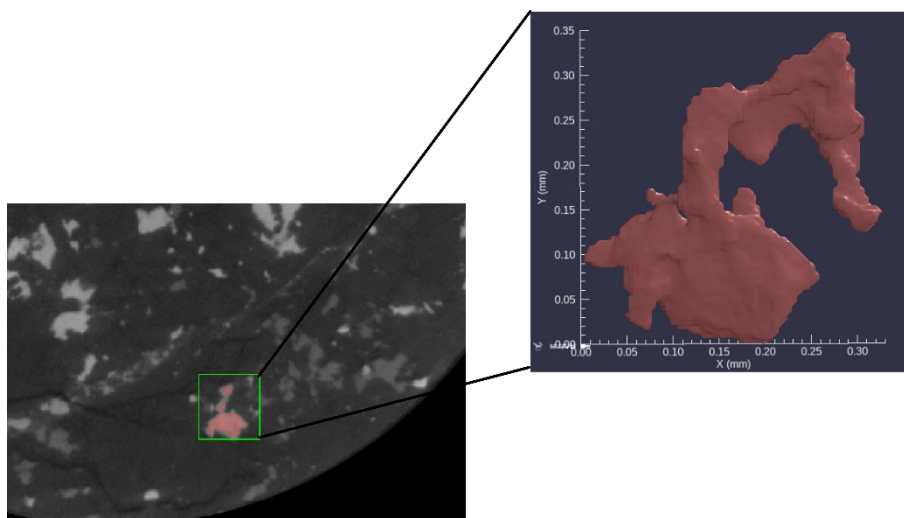


Figura 4.10. Este blob se encuentra en la inferior, cuenta con dimensiones de  $0.4 \times 0.3 \times 0.03$  mm.

## **Capítulo 5: Discusión.**

El análisis del diámetro relativo de los condros es de suma importancia, debido a que cada grupo de condritas posee una distribución de frecuencia de tamaño distinta, de igual manera, reconocer las propiedades físicas de los condros es vital a la hora de realizar desarrollo de modelos astrofísicos para la formación de condros, así como, comprender cómo utilizar los recursos de asteroides en la exploración espacial (Trigo - Rodríguez & Martínez - Jiménez, 2013). Por estos motivos, se realizó un análisis de distintas condritas ordinarias del grupo H (Nuevo Mercurio [H5], Cosina [H5], Aldama [H5]), L (NWA- 869 [L3-6], El Pozo [L5], Gold Basin [L4]) y carbonáceas del grupo CV (Allende y NWA [CV3]). Además, se analizó una condrita sin clasificación (Libia) con el fin de poder asignarla a un grupo a partir de la distribución de frecuencia de tamaño de condros.

Para las condritas H, se encontró que la media se encuentra en el rango de 490 – 580  $\mu\text{m}$ , como se muestra en la figura 5.1.

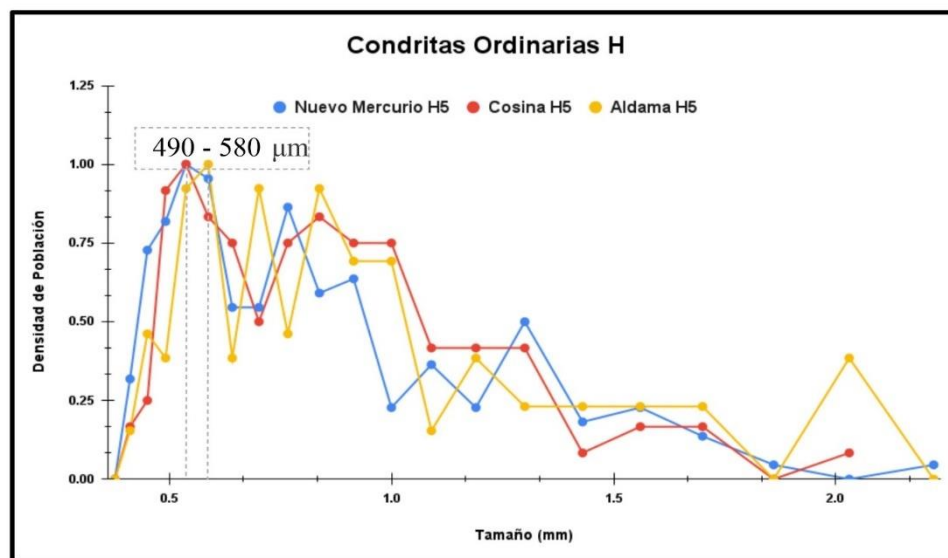


Figura 5.1. Distribución relativa del tamaño de condro y media determinada para cada condrita ordinaria H.

Las condritas ordinarias L, presentan una media en el rango de 580 – 700  $\mu\text{m}$  (figura 5.2).

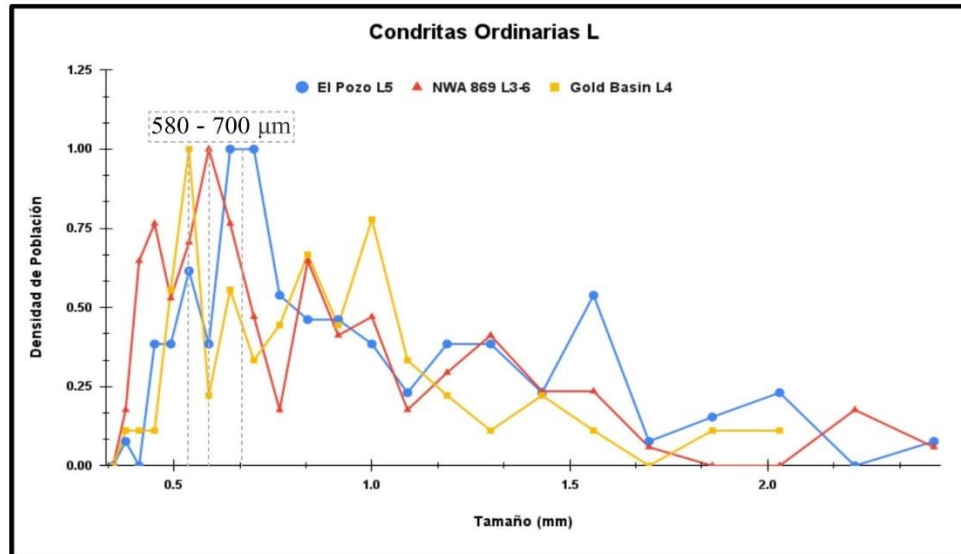


Figura 5.2. Distribución relativa del tamaño de condro y media determinada para cada condrita ordinaria L.

Las condritas carbonáceas CV presentan una media en el rango  $\sim 580 - 640 \mu\text{m}$ .

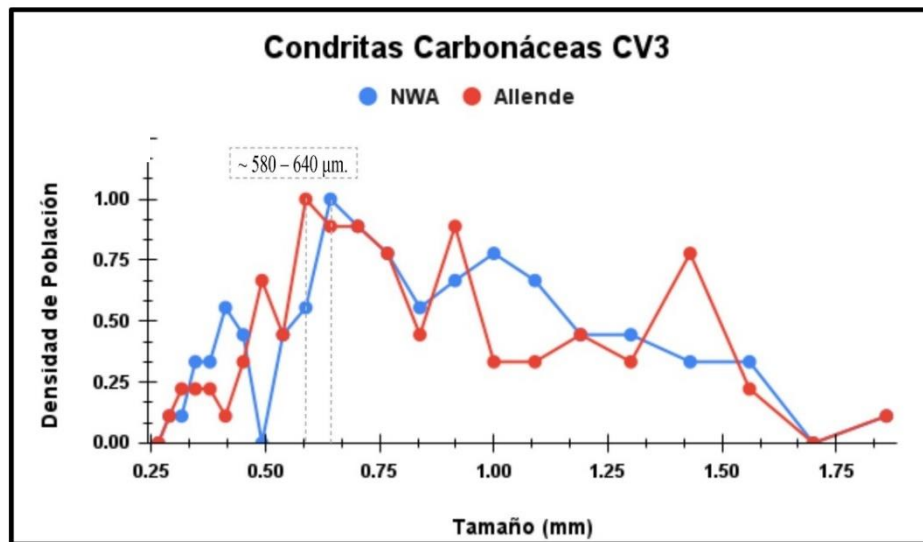


Figura 5.3. Distribución relativa del tamaño de condros y media determinada de las condritas carbonáceas CV3.

En todas las muestras observadas se buscaron relaciones entre el tipo de condro y el tamaño, sin embargo, no se encontró ninguna relación aparente.

### 5.1 Comparación:

Friedrich et. al. (2015) realizan una recopilación de datos de diámetros relativos de los condros obtenidos de diferentes autores, para los diferentes tipos de condritas. Los

métodos de selección de condros en los artículos presentados consideran datos de condros completos, también, incluyeron datos de tamaños combinados sobre los granos de silicato y/o fragmentos de condros (estos datos en ocasiones se encuentran intrínsecamente sesgados). La mayoría de los trabajos publicados analizados en Friedrich 2015, seleccionan los condros a partir de un análisis bidimensional en lámina delgada, otros son seleccionados manualmente (muestra disgregada físicamente. Debido a que este es un artículo reciente (2015) y trabaja una parte fundamental presentada en este trabajo, se tomó como artículo principal de referencia para realizar la comparación de los resultados de los artículos presentados por Friedrich con los datos obtenidos en este trabajo.

Para los resultados presentados en esta tesis, la selección de los condros se realizó a partir del análisis bidimensional de lámina delgada y un posterior reconocimiento visual y digitalización en ArcMap; el conteo se consideró únicamente a los condros enteros; en caso de contar con una gran población de condros fragmentados, solo se tomó en cuenta a aquellos que no presentaran más del 20% de faltante. Por último, Friedrich incluyó estudios en donde se hizo alguna corrección (corrección numérica – teórica, estereológica de Eisenhour, 2D – 3D), en este trabajo no se realizaron este tipo de correcciones por lo que no serán mencionados.

Condritas H: en Dodd (1976) se estudiaron los condros y fragmentos de condros de ocho condritas, informando un diámetro medio de 330  $\mu\text{m}$ , sin embargo, ellos incluyeron dos condritas intermedias H/L, por lo que al eliminar sus datos se obtuvo un tamaño medio de  $320 \pm 50 \mu\text{m}$ .

Martin y Mills (1978) estudiaron 1256 condros separados físicamente de la condrita Allegan H5, encontrando un diámetro medio de 570  $\mu\text{m}$  con una mediana de 600  $\mu\text{m}$ .

Gooding et al. (1978) analizaron 65 condros separados físicamente de una variedad de condritas H3 y 4. Debido a la selección sesgada por el tamaño se obtuvo un rango de diámetro de 900 – 1030  $\mu\text{m}$ . En 1981 Lux et al., analizaron la correlación entre la composición y textura de varias condritas H y H/L, obteniendo un diámetro medio de 420  $\mu\text{m}$ .

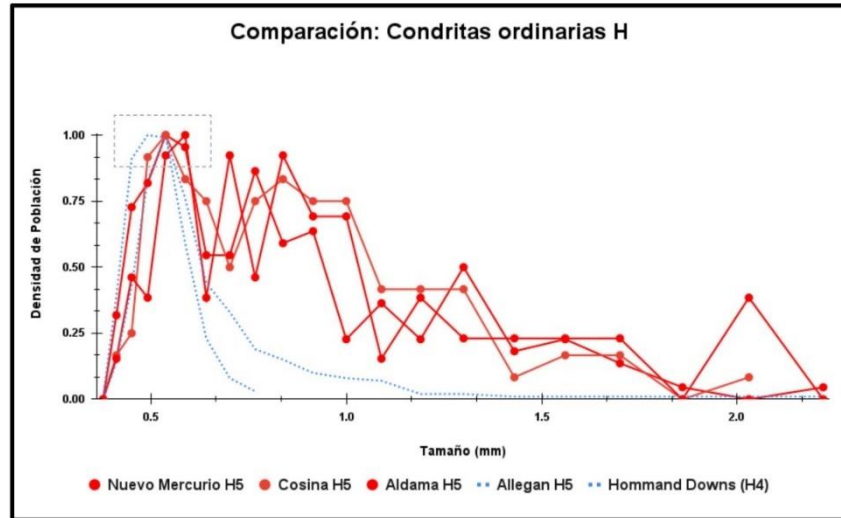


Figura 5.4. Comparación de los datos presentados en (Friedrich et al., 2015) (líneas azules) con los datos obtenidos en este trabajo (líneas rojas).

Condritas L: Dodd (1976) analizó seis condritas L, incluyendo fragmentos de condros, encontrando un diámetro medio de 460  $\mu\text{m}$ .

Gooding et al. (1978) analizaron 56 condros seleccionados manualmente, se obtuvo un diámetro medio de 1020  $\mu\text{m}$ , aunque el resultado está sesgado debido a la recolección manual.

King y King (1979) estudiaron dos condritas no equilibradas, en una de ellas se analizaron 132 condros, obteniendo un diámetro aparente medio de 620  $\mu\text{m}$ . Para la segunda condrita, se analizaron 58 condros, obteniendo un diámetro aparente medio de 490  $\mu\text{m}$ .

Nagahara (1981) analizó un total de 108 condros, estimando un diámetro aparente de  $\sim 800 \mu\text{m}$ .

Rubin y Keil (1984) hicieron una distinción de diámetros a partir de cada tipo de condro, 163 condros BO arrojaron un diámetro medio de 625  $\mu\text{m}$ , 70 RP y C con un diámetro medio de 622  $\mu\text{m}$ . Posteriormente Rubin y Grossman (1987) reportaron un diámetro medio de 479  $\mu\text{m}$  para todos los condros.

Grossman y col. (1988) citaron los datos de Rubin y Keil (1984) y King y King (1979) para reportar un diámetro medio de las condritas L en un rango de 600 – 800  $\mu\text{m}$ . Weisberg y col. (2006) determinaron un punto medio en el rango de Grossman, determinando 700  $\mu\text{m}$



como diámetro medio para estas condritas. Paque y Cuzzi (1997) reportaron un diámetro medio de 720  $\mu\text{m}$ , para la condrita ALH 85033 L4.

Metzler (2012) examinó uno de los clastos de la condrita desequilibrada NWA 869, midiendo 67 condros y obteniendo un diámetro medio de 520  $\mu\text{m}$ .

Friedrich propone un incremento en el tamaño de los condros de  $H < L$ . Teniendo como medias  $\sim 450 \mu\text{m}$  para las condritas H. En este trabajo se reporta una media en el rango de 490 – 580  $\mu\text{m}$ , lo cual es un poco mayor a lo propuesto por Friedrich. En la figura 5.4 se observa la comparación entre los datos presentados por Friedrich y los datos obtenidos en este trabajo, se puede notar que se tiene una concordancia de los datos.

Para las condritas L propone una media de  $\sim 500 \mu\text{m}$ ; en este trabajo se tiene una media en el rango de  $\sim 580 - 640 \mu\text{m}$  (figura 5.5). el valor de la media obtenida en este trabajo es mayor a la media de Friedrich et al., 2015. Adicionalmente, Friedrich y colaboradores acotan la media de las condritas ordinarias al valor de  $500 \pm 100 \mu\text{m}$ .

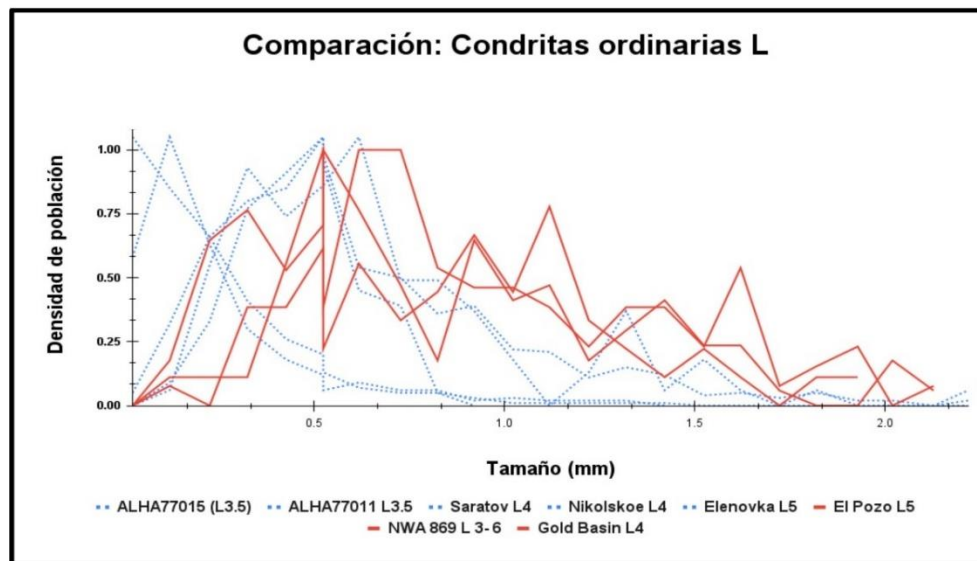


Figura 5.5. Comparación de los datos presentados en (Friedrich et al., 2015) (Líneas azules) con los datos obtenidos en este trabajo (líneas rojas).

En el caso de las condritas CV, Friedrich propone un diámetro medio de 900  $\mu\text{m}$ , un valor muy por encima al reportado en este trabajo.

Si bien menciona Friedrich, algunos de los resultados analizados están sesgados por el método de separación, aun así, los diámetros encontrados en este trabajo son consistentes a las gráficas propuestas en el artículo (con excepción de las condritas CV). De igual manera, no se puede excluir la posibilidad de que algunos de los datos reportados en este trabajo estén sesgados debido al método de selección.

(Cervantes, 2009) realiza un análisis detallado de las siguientes condritas: para Nuevo Mercurio reporta una moda en el intervalo 500 – 707  $\mu\text{m}$  y un diámetro mediano en 460  $\mu\text{m}$ , los datos son casi idénticos a los encontrados en este trabajo (moda en el intervalo 450 – 760  $\mu\text{m}$ ).

Para Cosina reporta una moda en el intervalo 354 – 500  $\mu\text{m}$ , con un diámetro mediano de 393  $\mu\text{m}$ . De acuerdo con los datos obtenidos en esta tesis, la moda se encuentra en el intervalo 490 – 580  $\mu\text{m}$ . El límite superior es un poco más elevado al reportado por Cervantes, sin embargo, son casi iguales. Posiblemente esta variación se deba al estado de la sección delgada, ya que, como se mencionó anteriormente, los condros se llegaban a confundir con los minerales individuales que presentaba la matriz, lo que hace probable que se hayan pasado desapercibidos algunos condros.

En el caso de la condrita ordinaria El Pozo L5, se realizó la comparación de los datos con el artículo de Corona – Chávez et al., (2018), en el cual reportan que los condros poseen formas relativamente esféricas o elipsoidales; obtuvieron diámetros desde los 200 a 1000  $\mu\text{m}$ . Encuentran condros rotos debido al evento de choque, también hay fragmentos y/o reliquias de condros. En esta tesis, la moda se encuentra en el rango de 640 – 760  $\mu\text{m}$ ; en nuestra muestra analizada, se pueden identificar todas las características antes mencionadas, así como, condros colisionados por otros condros (figura 5.6).

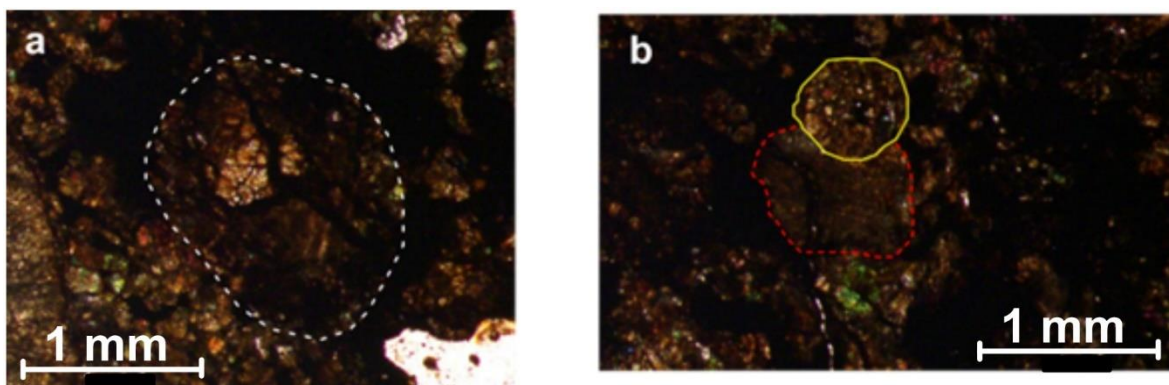


Figura 5.6. a) Condro reliquia, en la imagen completa, el contorno de este condro es confuso y no se logra distinguir con claridad, por lo que se muestra el contorno con una línea blanca punteada; b) condro “colisionado” por otro condro, la línea roja punteada muestra al condro que fue afectado.

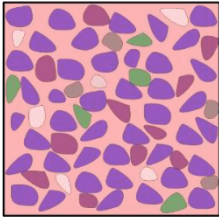
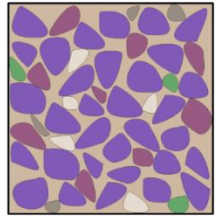
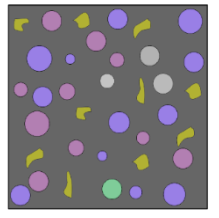
Metzler (2012) examinó uno de los clastos de la condrita desequilibrada NWA 869, midiendo 67 condros y obteniendo un diámetro medio de 520  $\mu\text{m}$ . Para esta condrita se tiene una moda en el rango 540 – 630  $\mu\text{m}$ ; siendo valores similares. Para este trabajo no se tiene la certeza de cuál de las litologías de la brecha fue analizada, ya que la muestra es pequeña.

Para la condrita ordinaria Gold Basin (L4) Szurgot & Krzysztof (2007) reportan una moda en el rango de 600 – 800  $\mu\text{m}$ , y un diámetro medio de 460  $\mu\text{m}$ . En este trabajo se obtuvo un rango un poco más reducido, sin embargo, aún está dentro del rango propuesto por estos autores (680 -730  $\mu\text{m}$ ).

#### Características

La siguiente tabla fue construida a partir de las similitudes encontradas en las diferentes condritas analizadas y de la literatura consultada; estas características pueden ser utilizadas como una guía para identificar en primera instancia a una condrita sin clasificación.

Tabla 5.1. Características observadas en las condritas analizadas.

Tipo	Rango tamaño de condros característico	Moda (Tamaño de condro)	Tipo predominante de condros	Morfología de condros	Principal componente de la matriz	Minerales primarios	Minerales secundarios	Porcentaje matriz – condro	Representación gráfica
H	340 -2400 $\mu\text{m}$	490 – 580 $\mu\text{m}$	Porfídicos	Esférica – elipsoide con contornos bien definidos	Principalmente vidrio desvitrificado. Matriz recristalizada	Olivino y piroxeno	Kamacita, troilita, taenita, tetrataenita, cromita, aleaciones Fe -Ni, corindón, apatito.	83 – 17 %	
L	340 – 2400 $\mu\text{m}$	580 -700 $\mu\text{m}$	Porfídicos	Esférica – elipsoide con contornos difusos	Granular	Olivino y piroxeno	Aleaciones de Fe – Ni (kamacita / taenita), troilita e hidróxidos.	81 – 19 %	
CV3	260 – 2200 $\mu\text{m}$	580 – 640 $\mu\text{m}$	Porfídicos y granulares	Esféricas con contornos bien definidos	Granular carbonosa	Olivino y piroxeno	Espinela, magnetita	86 – 14 %	



## 5.2 Condrita Libia:

Como se mostró anteriormente, la condrita Libia presenta dos rangos importantes de tamaño de condros, el primero se encuentra en 490 – 580  $\mu\text{m}$ , el cual corresponde completamente al rango establecido para las condritas H; el segundo rango se encuentra entre 700 – 830  $\mu\text{m}$ , el cual está por encima del rango propuesto para las condritas L.

Usando los datos de óxidos de elementos mayores de la condrita Libia, se grafican y se comparan con los descritos por Lodders et al (2009) (figura 1.6).

Las siguientes gráficas (figuras 5.7 - 5.10) presentan un arreglo de los valores mayores a los valores menores de los cocientes Mg/ Si, Al/Si, Fe/Si y Al/Mg, los datos son presentados en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Datos del análisis geoquímico de óxidos elementos mayores. La fila color azul corresponde a los datos obtenidos en el Instituto de Geología, la fila de color naranja corresponde a los datos obtenidos en el Instituto de Geofísica.

	<b>Mg/Si</b>	<b>Al/Si</b>	<b>Fe/Si</b>	<b>Fe/Mg</b>	<b>Na/Si</b>	<b>Al/Mg</b>
<b>CI</b>	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1
<b>CM</b>	0.98	1.12	0.94	0.96	0.68	1.14
<b>CO</b>	0.99	1.10	0.90	0.91	0.55	1.11
<b>CV</b>	1.01	1.37	0.87	0.86	0.45	1.36
<b>H</b>	0.90	0.82	0.94	1.05	0.81	0.91
<b>L</b>	0.87	0.81	0.67	0.77	0.81	0.92
<b>LL</b>	0.88	0.77	0.56	0.64	0.79	0.88
<b>EH</b>	0.69	0.59	1.00	1.46	0.87	0.86
<b>EL</b>	0.82	0.69	0.68	0.83	0.67	0.84
<b>LDF-IGL</b>	0.67	0.58	0.68	1.01	0.50	0.87
<b>LDF-IGF</b>	0.94	0.91	0.41	0.43	0.59	0.97

Los valores se reportan como LDF (*LIBYA DESERT FIND*). El análisis se realizó en el Laboratorio Universitario de Geofísica Ambiental (LUGA) del Instituto de Geofísica (recuadro naranja) a partir de Fluorescencia de Rayos X con pistola, se realizaron cuatro tiros con pistola sobre la galleta completa del meteorito (sin destrucción): espectrómetro portátil de dispersión de energía (ED-XRF, por sus siglas en inglés) Genius 7000 XRF de Skyray Instruments, tubo Rh y detector de berilio.

En la Figura 5.8 y 5.10 se reportan dos valores de LDF, el análisis reportado en el recuadro azul se realizó en el Instituto de Geología a partir de Fluorescencia de Rayos X con perla – tableta: espectrómetro secuencial de rayos X (Rigalu Primus II) equipado con tubo de rodio y ventana de berilio de 30 micras. Se considera que estos valores sobreestiman el contenido de Fe y S, por lo que no se muestran en las siguientes graficas.

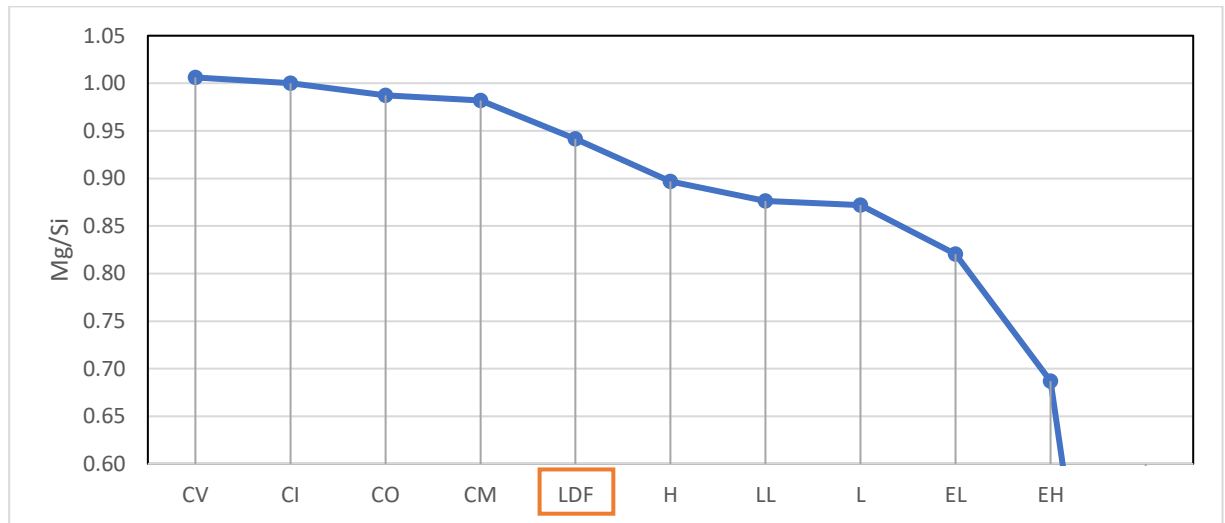


Figura 5.7. Para la relación Mg/Si, el valor de Libia cae entre los valores de las condritas carbonáceas CM y las condritas ordinarias H (valores graficados a partir de Lodders et al., 2009).

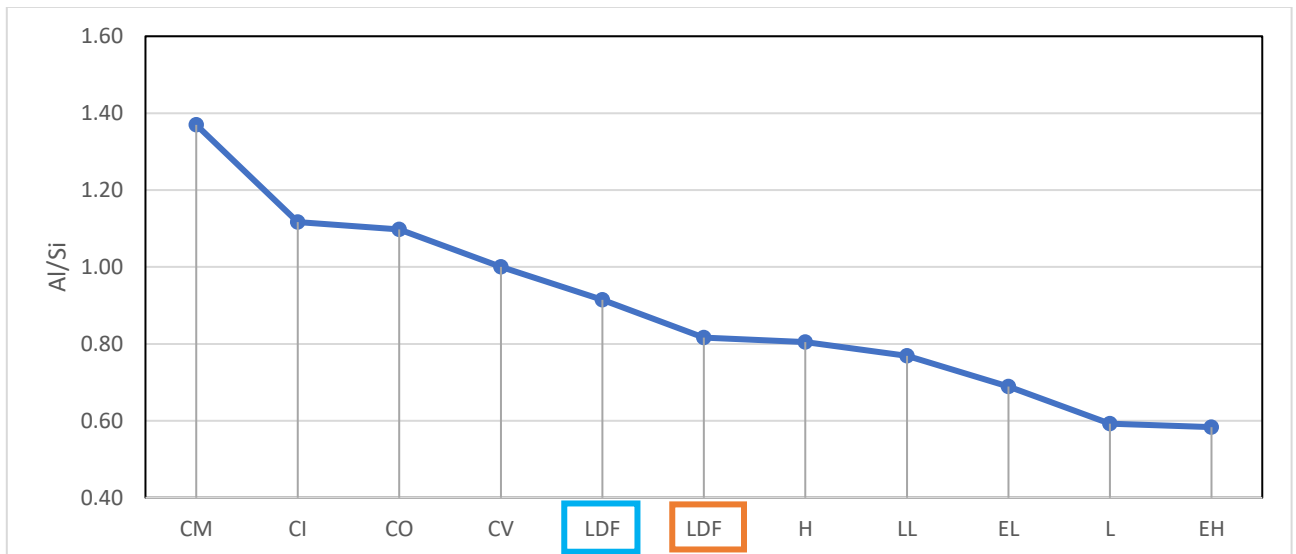


Figura 5.8. En el caso de la relación Al/Si, es el único caso en el que los valores obtenidos en ambos laboratorios se encuentran juntos (debido a que el valor del Al no es afectado de la misma forma que el valor de Mg por el contenido de Fe), encontrándose entre los valores de las condritas CV y las condritas H ((valores graficados a partir de Lodders et al., 2009).

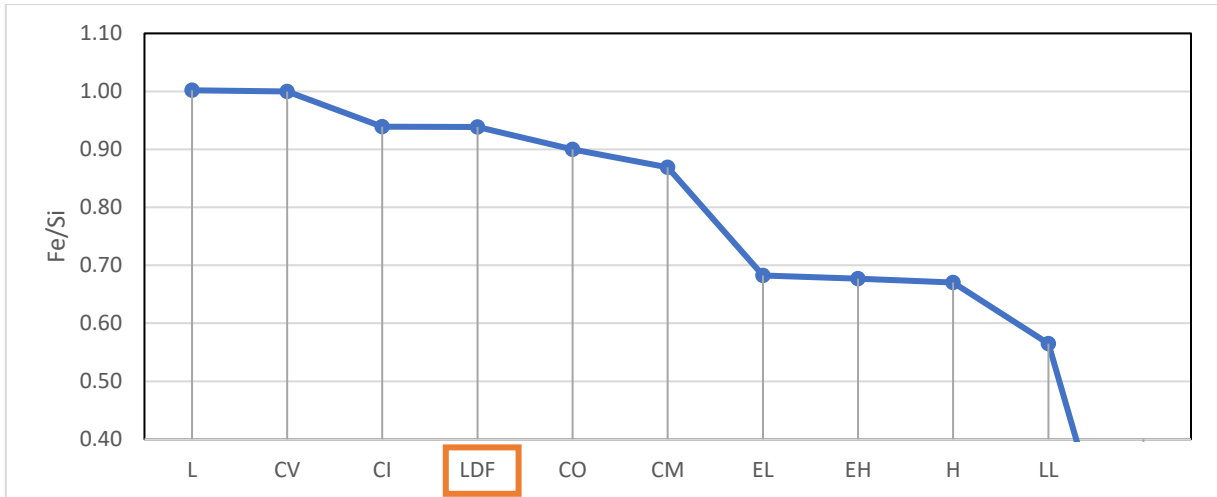


Figura 5.9. Los valores de la relación Fe/Si caen entre las condritas carbonáceas CI y CO.

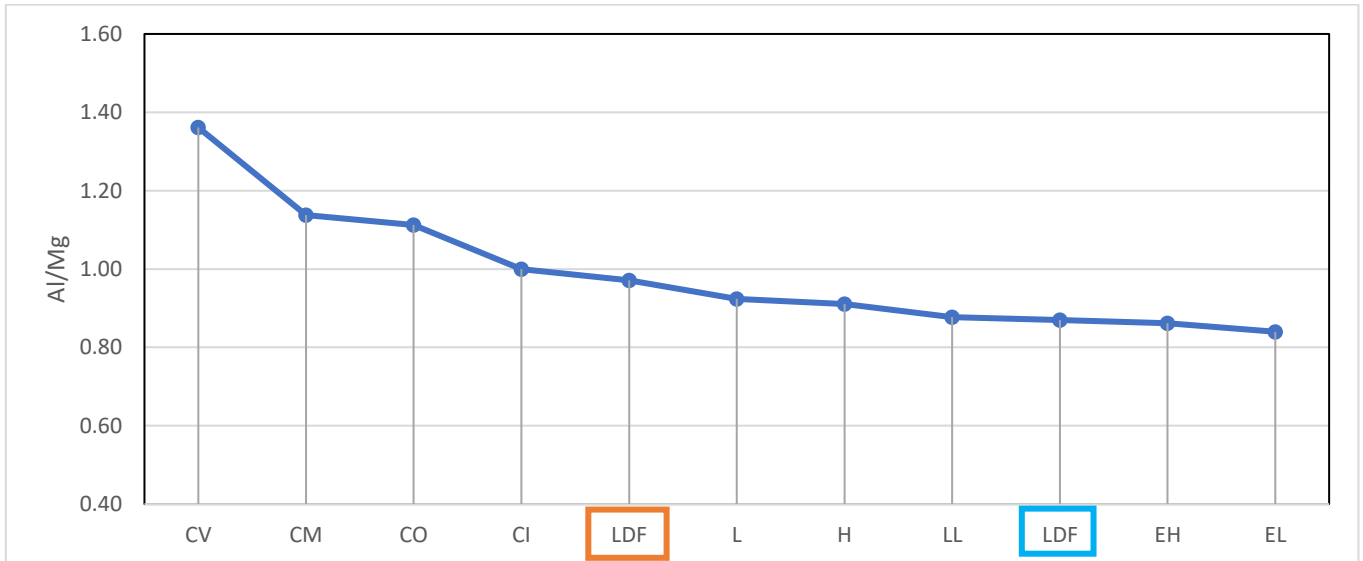


Figura 5.10. Por último, los valores de la relación Al/Mg, cae en medio de los valores de la condrita carbonácea CI y la condrita ordinaria L.

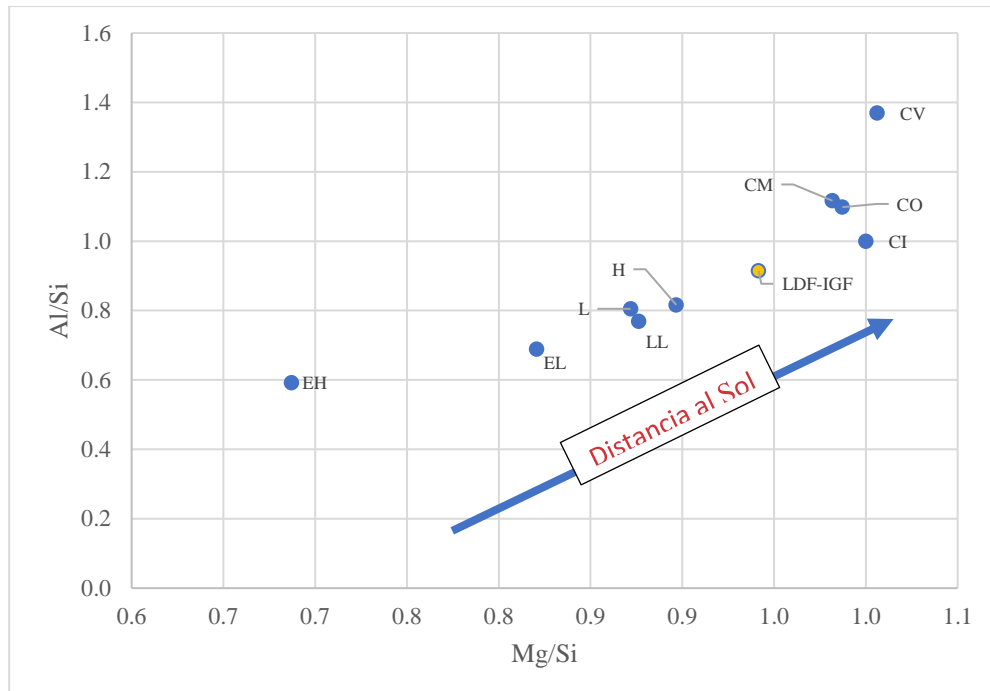


Figura 5.11. Adicionalmente, se realizó una gráfica Al/Si vs Mg/Si, en las que se puede identificar un patrón, los valores más altos corresponden a los valores de las condritas carbonáceas y los más bajos corresponden a los valores de las condritas de enstatita, los valores de LDF – IGF caen entre los valores de las condritas carbonáceas y las condritas ordinarias H; esto puede tener relación con la posición respecto al Sol de cada una de las condrita (Las enstatitas se encuentran más cerca del Sol y las condritas carbonáceas más lejos de él).

Conocer la abundancia de las fases de los meteoritos, especialmente de las condritas es importante debido a que esto permite calcular la abundancia de un elemento a partir de los resultados de análisis de fases separadas. Diversos estudios han evidenciado que las condritas presentan una amplia gama en el contenido de Fe-Ni metálico, y a su vez, se presentan dos máximos importantes. Brown y Patterson (1948), demostraron que existe una correlación positiva entre la cantidad de Fe- Ni y el contenido de Fe total, posteriormente Urey y Craig (1953), observaron dos grupos de condritas, uno con alto contenido de Fe total y uno con bajo (H y L respectivamente), por lo tanto es posible determinar por integración planimétrica del contenido de Fe – Ni metálico de una condrita si esta pertenece al grupo H o L (Keil, 1962) si la condrita presenta menos del 13% en peso de Fe-Ni metálico esta pertenece al grupo L; si se presenta más del 13% en peso de Fe-Ni metálico la condrita pertenece al grupo H.



En el caso de la condrita Libia, se notó una abundancia importante de Fe-Ni metálico (áreas blancas en la figura 4.2) (Los cristales se encuentran dispersos por toda la muestra analizada, y se observan rodeando algunos condros), por lo que se determinó a partir de la metodología ya descrita de los software ImageJ y Blob3D el porcentaje en peso que estos ocupan; se obtuvo un porcentaje del 7.7% en volumen (15.75% en peso), por lo que se estima que Libia pertenece al grupo H.

Petrográficamente la condrita Libia presenta varias similitudes con varias de las condritas estudiadas, principalmente del grupo H y L, a continuación se describirán algunas de ellas:

- Uno de los componentes de la matriz de Nuevo Mercurio es vidrio parcialmente desvitrificado, en la condrita Libia se pensaba que el componente principal eran óxidos, sin embargo, gracias al análisis elemental EDS se determinó que el componente principal de la matriz es vidrio, aunque no se descarta la presencia de óxidos. Sin embargo, realizando un análisis visual más detallado, se encuentra que los condros no presentan las mismas características; en Libia los condros son difíciles de identificar, ya que sus contornos son difusos y por el grado de alteración de la muestra es complicado reconocer los minerales presentes en los condros, también se presentan agregados cristalinos de forma irregular ; en Nuevo Mercurio los contornos de los condros están bien delimitados y no es complicado poder identificarlos, los agregados cristalinos son escasos y se identifica bien a la matriz (figura 5.13).

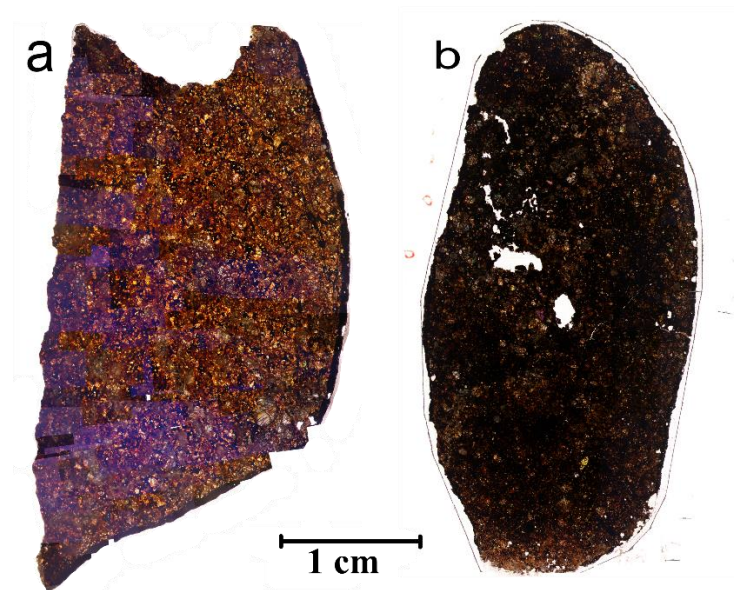


Figura 5.12. Comparación visual de las condritas a) Libia y b) Nuevo Mercurio.

- En la condrita ordinaria El Pozo se observó un mayor contenido de agregados cristalinos, también se encontraron condros colisionados, algunos de los condros presentan contornos bien definidos, sin embargo, un gran porcentaje de ellos presentan contornos que parecen estar fundidos por lo que se unen a los contornos de otros condros o con agregados cristalinos. Libia comparte todas estas características, como se mencionó antes presenta una gran cantidad de agregados cristalinos sin forma, también se encontró un par de condros colisionados, por último, se tiene la idea de los contornos difusos de los condros están fundidos, por esta razón se unen con los agregados cristalinos y con otros condros, formando una masa irregular en toda la muestra.

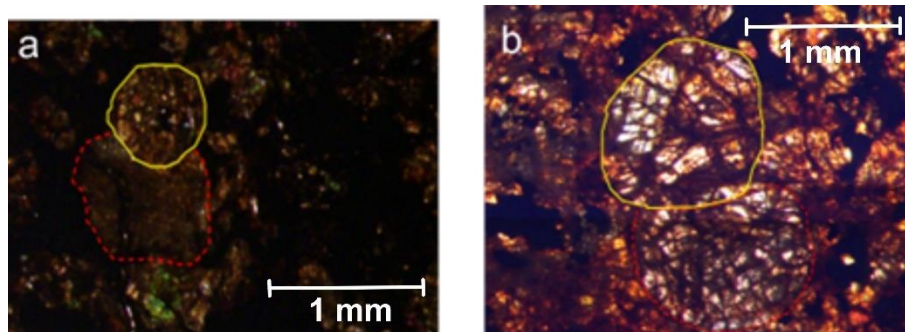


Figura 5.13. a) condros colisionados de la condrita El Pozo; b) condros colisionados de la condrita Libia. En ambas imágenes el condro afectado se muestra con la línea punteada de color rojo.

- Como se ha comentado, el análisis de bidimensional del tamaño de condros de la condrita Libia muestra dos rangos importantes, el primero ajusta bien en el rango presentado para las condritas ordinarias H; el segundo rango se encuentra por encima del rango presentado para las condritas ordinarias L.

En las muestras disponibles en este estudio no contamos con condritas LL, por lo que con los mismos métodos de análisis dimensional descritos antes se realizó el análisis de tamaño de condros de la condrita ordinaria LL3 *Frontier Mountain* 03011 (las imágenes para el análisis de esta condrita fueron obtenidas de *Atlas of Meteorites in Thin Section* (Musolino & Folco, 2010); se obtiene una moda de 736  $\mu\text{m}$ , este valor se ajusta con el segundo rango obtenido para Libia (700 – 830  $\mu\text{m}$ ).

A partir de las descripciones hechas y las similitudes encontradas petrográficamente, con análisis dimensional, comparación de tipos de condros, datos químicos de elementos mayores y abundancia en Fe – Ni metálico, Libia se clasifica como una condrita ordinaria H. El tipo petrológico de Libia se asignó a partir de la matriz, la cual es de aspecto opaca y recristalizada compuesta principalmente de vidrio. Se pueden distinguir algunos condros, con bordes mal definidos y condros pocos delineados; estas características se encuentran entre los tipos petrológicos 4 – 6 (de acuerdo con el criterio de Van Schmus y Wood, 1967).

La clasificación por metamorfismo de choque se asignó a partir de una asignación visual; la muestra presenta fracturas que recorren casi toda la muestra, sin embargo, su abundancia es mínima y al parecer estas fracturas están rellenas por el mismo material de la matriz y no se muestran fracturas posteriores a este proceso, por lo que se asigna una etapa de choque S1.

En cuanto al grado de meteorización terrestre se han observado pequeñas vetas de óxido por lo que se asignaría un grado W1 (de acuerdo con el criterio de Wlotzka, 1993).

# Capítulo 6: Conclusiones

El análisis dimensional del tamaño de condros ha demostrado que cada grupo de condritas presenta un rango de tamaño característico. Los resultados para la condrita Libia arrojan dos rangos característicos, el primero es similar a los valores reportados para las condritas H, el segundo concuerda con el rango de las condritas LL. Por otro lado, comparte similitudes tanto con la condrita Nuevo Mercurio H5 (siendo el más importante la presencia de vidrio en la matriz de ambas) y el Pozo L5 (principalmente la presencia de condros colisionados y agregados cristalinos abundantes).

El análisis geoquímico de óxidos de elementos mayores posiciona a Libia entre la composición de las condritas ordinarias H y las condritas carbonáceas.

Adicionalmente, como se mencionó antes, existe una relación positiva entre el contenido de Fe – Ni metálico y el Fe total presente en una condrita ordinaria (H o L). De acuerdo con el análisis de abundancia de Fe – Ni metálico en la muestra de Libia, se calculó un 15.75% en peso, identificándose como una condrita H.

Todos los análisis tienen como resultado común los parámetros que identifican a una condrita H.

El tipo petrológico de Libia se asignó a partir de la matriz, la cual es de aspecto opaca y recristalizada compuesta de vidrio y la integración matriz – condros, los cuales se encuentran entre las características: se pueden discernir algunos condros, bordes mal definidos y condros pocos delineados; estas características se encuentran entre los tipos petrológicos 4 – 6 (de acuerdo con el criterio de Van Schmus y Wood, 1967).

La clasificación por metamorfismo de choque se asignó a partir de una asignación visual; la muestra presenta fracturas que recorren casi toda la muestra, sin embargo, su abundancia es mínima y al parecer estas fracturas están rellenas por el mismo material de la matriz y no se muestran fracturas posteriores a este proceso, por lo que se asigna una etapa de choque S1.

En cuanto al grado de meteorización terrestre se han observado pequeñas vetas de óxido por lo que se asignaría un grado W1 (de acuerdo con el criterio de Wlotzka, 1993).

Se ha mostrado que el análisis dimensional del tamaño de condros es una herramienta útil para poder realizar una clasificación preliminar y básica de las condritas, sin embargo,

no se deben tomar como completas e infalibles, ya que las condritas presentan otras características que es importante cuantificar para poder asignar una clasificación completa, ya que, como en todo análisis, presenta un margen de error, ya sea por el método de selección o por los procesos en los diferentes algoritmos usados.

En cuanto al análisis tridimensional no fue posible recrear un modelo 3D de condros debido a que los valores de escalas de grises de los condros son muy similares a los valores que presenta la matriz por estar compuestos todos ellos de silicatos. Este problema se podría reducir incluyendo algunos filtros desde el momento que se adquieran las imágenes de tomografía para delimitar mejor los condros. Las fases de Fe – Ni no presentan una continuidad significativa dentro de la condrita; aparentemente no están interconectadas dentro de la condrita debido posiblemente a su abundancia (7.5% en volumen, 15.8 % wt).

Existen otros parámetros para poder clasificar una condrita (por ejemplo, el contenido de sulfuros), sin embargo, son muy poco los autores que tocan estos temas por lo que es complicado recabar información de las fases Fe-S-Ni para tener un panorama más amplio sobre el tema.

El análisis de imágenes es una propuesta sencilla para realizar una clasificación preliminar ya que permite cuantificar ciertas fases, sus dimensiones y abundancias, es una técnica no destructiva y relativamente económica. Esta metodología es útil para describir elementos texturales en meteoritos y para cualquier otro tipo de roca (ígneas, sedimentaria o metamórfica).

# Referencias

- Castro Dorado, A. (2015). *Petrografía de rocas ígneas y metamórficas* (1° edición). Madrid, España: Paraninfo.
- Cervantes, K. E. (2009). *Estudio petrológico de los condros de las meteoritas condriticas mexicanas Cuartaparte, Cosina, y Nuevo mercurio : origen y evolución de dichas estructuras*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4175.0640>
- Connolly, H. C., & Desch, S. J. (2004). *On the origin of the “kleine Kügelchen” called Chondrules*. 64, 95–125. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2003.12.001>
- Corona-Chávez, P., Hernández-Bernal, M. del S., Vignola, P., Lozano-Santacruz, R., Morales-Contreras, J. J., Reyes-Salas, M., ... Molina, J. F. (2018). Petrology, phase equilibria modelling, noble gas chronology and thermal constraints of the El Pozo L5 meteorite. *Chemie Der Erde*, 78(2), 248–253. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2017.12.003>
- Friedrich, J. M., Weisberg, M. K., Ebel, D. S., Biltz, A. E., Corbett, B. M., Iotzov, I. V., ... Wolman, M. D. (2015). Chondrule size and related physical properties: A compilation and evaluation of current data across all meteorite groups. *Chemie Der Erde*, 75(4), 419–443. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2014.08.003>
- Hanna, R. D., & Ketcham, R. A. (2017). X-ray computed tomography of planetary materials: A primer and review of recent studies. *Chemie Der Erde*, 77(4), 547–572. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2017.01.006>
- Hernández Reséndiz, P. (2020). *Estudios Experimentales Aplicados a La Meteorítica: Condros Y Micrometeoritos*. Universidad Nacional Autónoma De México.
- Holland, H. D., & Turekian, K. K. (2014). *Treatise on Geochemistry: Second Edition* (Second edi, Vol. 2). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00102-9>
- Keil, K. (1962). On the phase composition of Meteorites. *Journal of Geophysical Research*, 67(10), 4055–4061.
- Krot, A. N., Keil, K., Scott, E. R. D., Goodrich, C. A., & Weisberg, M. K. (2013). Classification of Meteorites and Their Genetic Relationships. In *Treatise on Geochemistry: Second Edition* (Vol. 1, pp. 1–63). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08->



095975-7.00102-9

- Lauretta, D. S., Nagahara, H., & Alexander, C. (2006). Petrology and origin of ferromagnesian silicate chondrules. *Meteorites and the Early Solar System II*, (January 2006), 431–459. Retrieved from <http://www.lpi.usra.edu/books/MESSII/9026.pdf>
- Lodders, K., Palme, H., & Gail, H. P. (2009). Abundances of the elements in the Solar System. In *Treatise on Geochemistry: First Edition* (Vol. 1, pp. 1–59). [https://doi.org/10.1007/978-3-540-88055-4\\_34](https://doi.org/10.1007/978-3-540-88055-4_34)
- Meteoritical Bulletin: Search the Database. (n.d.). Retrieved October 3, 2021, from <https://www.lpi.usra.edu/meteor/>
- Metzler, K., Bischoff, A., Greenwood, R. C., Palme, H., Gellissen, M., Hopp, J., ... Trieloff, M. (2011). The L3-6 chondritic regolith breccia Northwest Africa (NWA) 869: (I) Petrology, chemistry, oxygen isotopes, and Ar-Ar age determinations. *Meteoritics and Planetary Science*, 46(5), 652–680. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2011.01181.x>
- Moggi Cecchi, V., Pratesi, G., & Salvadori, A. (2006). Size and textural type distributions of chondrules in three new carbonaceous chondrites: Acfer 374, HaH 337 and Acfer 366. *Periodico Di Mineralogia*, 75(2–3), 217–232.
- Montoya Pérez, M. Á. (2016). *Caracterización morfológica y mineralógica de condros barrados de olivino presentes en la condrita Allende*. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Muñoz - Espadas, M. J. (2003). *Mineralogía , Texturas y Cosmoquímica de Cóndrulos en Condritas H4 , H5 , L5 y LL5*. Universidad Complutense de Madrid.
- Musolino, A., & Folco, L. (2010). *Atlas of Meteorites in Thin Section*.
- Reyes-Salas, A. M., Sánchez-Rubio, G., Altuzar-Coello, P., Ortega-Gutiérrez, F., Flores-Gutiérrez, D., Cervantes-de la Cruz, K., ... Linares, C. (2010). Petrography and mineral chemistry of escalón meteorite, an H4 chondrite, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 27(1), 148–161.

- Rubin, A. E., & 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*, 51.
- Sears, D. W. G. (2004). *The origin of chondrules and chondrites*. New York: Cambridge University Press.
- Szurgot, M., & Krzysztof, P. (2007). *Microscopic Investigations of gold basin and el hammami chondrites*. 28, 79–94.
- Trigo - Rodríguez, J. M., & Martínez - Jiménez, M. (2013). Las condritas y sus componentes primigenios. *Enseñanza de Las Ciencias de La Tierra*, 21(3), 263–272.

# **Anexo 1: Clasificación de meteoritos**

Texto basado principalmente en (Krot, Keil, Scott, Goodrich, & Weisberg, 2013).

Los meteoritos son cuerpos sólidos de origen extraterrestre que entran a la atmósfera y alcanzan la superficie terrestre. Si la caída del meteorito es observada se le conoce como “caída”; cuando la caída no es observada se conoce como “hallazgo”. Así mismo, existen otros materiales que son recolectados en la Tierra o en el espacio exterior como los IDPs (*Interplanetary Dust Particles* = partículas de polvo interplanetario), del tamaño de micrómetros, y los micrometeoritos; ambos se encuentran en los hielos polares y en la estratósfera interior y en los sedimentos marinos. Tanto los meteoritos como los IDPs provienen de fragmentos de asteroides, aunque los IDPs también pueden provenir de material cometario; algunos meteoritos son fragmentos de planetas (p. ej. Marte).

Se reconocen dos categorías principales de meteoritos: las condritas y las no condritas; estas últimas se subdividen en 1) acondritas; 2) metálicos pétreos y 3) meteoritos de hierro. Estas categorías se asignan en relación con la composición total y con la textura de cada meteorito.

### **A1.1 Condritas:**

Se pueden reconocer 4 componentes principales: condros; inclusiones de Fe-Ni metálico, inclusiones refractarias (constan de inclusiones ricas en Ca – Al (CAIs) y agregados de olivino ameboide (AOA) y matriz de grano fino. Las condritas no experimentaron procesos de fusión y diferenciación ígnea, por lo que preservan información de procesos físicos y químicos de la Nebulosa Solar.

Los condros son estructuras esféricas ígneas de 1 a 2 mm de diámetro, aunque pueden ser microscópicas, que pueden constituir hasta el 80% de la condrita. Su forma esférica característica la adquieren a partir de gotas de material fundido en condiciones de ingravidez; antes de formar parte de la condrita. En un principio estas estructuras existen de manera independiente por lo que se considera que son más antiguas que la condrita total. Los minerales más abundantes que constituyen a los condros son: silicatos (piroxenos, plagioclasas y olivinos), aleaciones de Fe-Ni (kamacita y taenita), troilita, óxidos (cromita) y vidrio (Tormo - Cifuentes, 2013).

Las condros ferromagnesianos son los más comunes, estos están formados de cristales de olivino y piroxeno, principalmente, y en menor proporciones menores de cromita, troilita y granos de aleación de Fe-Ni; otras composiciones menos frecuentes son: ricos en aluminio,

cromita, vidrio y sílice; finalmente, se pueden encontrar condros formados únicamente por vidrio, rico en Al, Na y Si, sin embargo, son extremadamente raros. Suelen estar empobrecidos en elementos volátiles y siderófilos respecto a las condritas CI, sin embargo, su composición total, la mayoría de las veces es parecida a estas condritas. Su composición total varía dentro de cada grupo de condritas y del tipo ferromagnesiano. El material que se encuentra entre los condros es llamada mesostasis, la cual, en condros equilibrados, está recristalizada y en condros desequilibrados, es vítrea (Muñoz - Espadas, 2003).

Los condros ferromagnesianos se clasifican en función de su textura y composición. En cuanto a la textura, consta de dos grupos: 1) porfídicos (P): contienen fenocristales, rodeados de abundante mesostasis. De acuerdo la proporción de los minerales se denominan como porfídicos de olivino (PO), de piroxeno (PP), o ambos (POP); 2) no porfídicos: estos presentan texturas uniformes de grano fino, e incluyen condros criptocristalinos (C), radiales de piroxeno (RP), granulares de olivino y/o piroxeno (GO, GP y GOP) y barrados de olivino (BO) (Muñoz-Espadas, 2003).

La segunda clasificación combina rasgos mineralógicos y texturales con datos composicionales y se aplica principalmente a condros porfídicos para identificar aquellos que son pobres en FeO (tipo I) y ricos en FeO (tipo II) (McSween, 1977); la diferencia entre ambos tipos radica en el contenido y el tamaño de los olivinos. Una subdivisión de estos tipos se forma a partir de la abundancia de olivino (A) y piroxeno (B); si la relación en volumen olivino / (olivino + piroxeno) es mayor de 0.80 y menor de 0.20, respectivamente (Muñoz-Espadas, 2003). Además de esta subdivisión se pueden identificar rasgos texturales: el tipo I presenta olivinos poiquilíticos incluidos en piroxenos, esencialmente en el borde del condro, contiene troilita, así como cantidades menores de granos metálicos de Fe-Ni (Muñoz-Espadas, 2003); el tipo II contiene olivinos porfídicos euhédricos, cristales pequeños de hercinita de Cr euhedrales y vidrio oscuro rico en anortita (McSween, 1977). Hay que considerar que no todos los condros se pueden clasificar a partir de este sistema.

Teniendo como premisa que los condros registran el metamorfismo de los cuerpos parentales, se propuso un sistema de calificación adicional; este sistema se basa principalmente en la respuesta a la catodoluminiscencia (CL) de cada condro, subdividiéndose en CL intensa (grupo A) y CL débil (grupo B). A su vez, estos grupos se

subdividen a partir de la intensidad y el color de la CL de los cristales de los condros y la mesostasis: de A1 a A5 y de B1 a B3; estos grupos evolucionan de A - B.

Tabla A1.1: Relación de color de CL con el contenido de FeO y CaO de los olivinos y la mesostasis cada grupo. Tomada de (Muñoz - Espadas, 2003; Sears, Jie, Benoit, Dehart, & Lofgren, 1992).

Mesostasis			Olivino		
Catodoluminiscencia		Composición normativa (% en peso)	Catodoluminiscencia	% FeO	% CaO
A1	Amarilla	Plg (An>50)	Rojos	<2	>0.17
A2	Amarilla	Plg (An>50)	Ninguna / rojizos	2 – 4	0.1 – 0.2
A3	Azul	Plg (An>50)	Rojos	<4	>0.2
A4	Azul	Plg (An>50)	Ninguna / rojizos	>4	0.16 – 0.3
A5	Azul	Plg (An<50)	Ninguna	>4	<0.25
B1	Ninguna	Qz>30	Ninguna	4 – 25	0.08 – 0.3
B2	Ninguna	Qz 30 – 50	Ninguna / rojizos	20 – 25	0.08 - 0.3
B3	Púrpura	Qz 15 – 30	Ninguna	15 – 25	<0.08

El último criterio está en función de la composición de los olivinos. Los olivinos de los condros tienen gran contenido de Al, Ti y Ca cuyos valores se grafican en diagramas, en función de los olivinos y la mesostasis de los condros (Figura 2). Para los condros que carecen de olivino, se utiliza el contenido de FeO y CaO en piroxenos, ya que estos elementos muestran el mismo comportamiento, pero con menor tasa de difusión; sin embargo, hasta el momento no existen diagramas para los piroxenos (Sears et al., 1992).

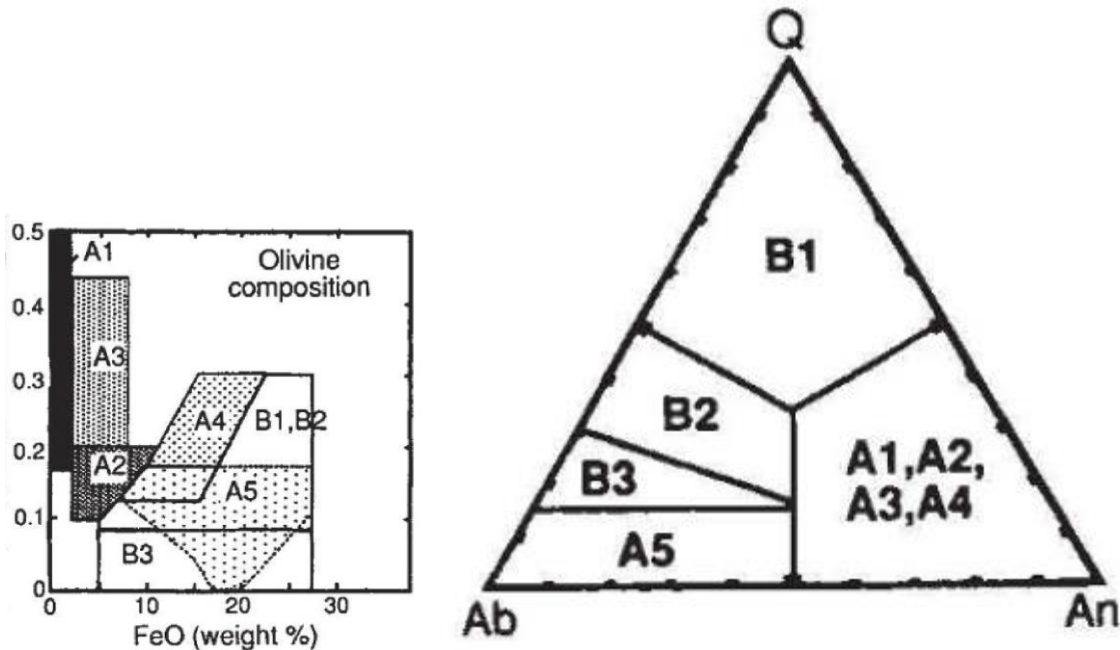


Figura A1.1. Diagrama de clasificación de condros. A) olivinos y B) mesostasis. Tomada de (Sears et al., 1992).

La matriz está constituida a partir de fragmentos de condros, óxidos refractarios, granos metálicos, grafito, materia orgánica, etc., de grano fino (Trigo - Rodríguez & Martínez - Jiménez, 2013). (Michel-Lévy, 1968) define a los CAIs como inclusiones ricas en Ca y Al, formadas a partir de minerales refractarios condensados a partir de un gas.

Los condros, el Fe-Ni metálico y los CAIs tienen su origen en la Nebulosa Solar, donde experimentaron alta temperatura, así como condensación y evaporación, metamorfismo térmico y de choque y alteración acuosa, antes y después de formar parte de las condritas.

La composición de las condritas es casi similar a la composición del Sol, con la excepción de los elementos ligeros (H, He, C, N, O), los cuales tienen mayor abundancia en el Sol; el Li y B son más abundantes en las condritas (McSween Jr, 1987). De igual manera, se debe considerar que cada uno de los grupos tiene un patrón de abundancia elemental característico y bien definido; esto se intuye a que debido a la distancia al Sol en la que se formaron; se cree que las condritas E y K, se formaron a distancias próximas al Sol; las condritas ordinarias y K a distancias intermedias y las condritas carbonáceas a distancias mayores; igualmente, se considera la presencia de heterogeneidades dentro del ambiente nebular (Muñoz-Espadas, 2003).

Para clasificar a los meteoritos se dividen en varios órdenes taxonómicos: 1) clan: categoriza a las condritas que presentan similitudes tanto mineralógicas, químicas, isotópicas y composición química total de elementos principales no volátiles; 2) clases: asociación de dos o más grupos que comparten características químicas primarias de roca total e isótopos de oxígeno (Ulloa - Gonzalez, 2017); 3) grupos: conjunto de al menos 5 condritas, las cuales comparten características petrológicas, mineralógicas, isotópicas y composición química similar; 4) subgrupos.

La química de roca total, la relación de isótopos de oxígeno, mineralogía, petrología y proporciones de componentes condriticos, permiten diferenciar 15 grupos de condritas, las cuales comprenden tres clases principales: carbonosas (C), ordinaria (O) y enstatita (E) y 2 clases menos frecuentes Rumuruti (R) y Kakangari (K).

Una de las diferencias más significativas entre las clases de condritas, es que cada una se formó a diferentes temperaturas; las condritas carbonáceas son las de menor temperatura y presentan mayor contenido de elementos volátiles; las condritas ordinarias y de enstatita se formaron a temperaturas más altas, presentando menor contenido de elementos volátiles (McSween Jr, 1987).

Algunas propiedades varían dependiendo a la distancia con el Sol; la densidad y la temperatura del gas y el polvo disminuye mientras más lejano se encuentre del Sol, resultando en condiciones progresivamente más oxidantes, e influyendo en el contenido de volátiles. A partir de estos criterios las condritas de enstatita y Kakangari serían las más próximas al Sol, las ordinarias y Ramuruti se encontrarías en distancias intermedias y las carbonáceas a mayor distancia.

A partir de las diferentes proporciones de los componentes refractarios, silicatos de magnesio, Fe-Ni metálico y elementos alta y moderadamente volátiles, se pueden identificar variaciones químicas en las condritas. La Tabla A1.2, resume los parámetros taxonómicos más utilizados para la clasificación de las condritas.



Tabla A1.2. Parámetros taxonómicos para la clasificación de las condritas. Tomada de (Muñoz-Espadas, 2003).

Clase	Grupo	Al/Si	Mg/Si	Ni/Si	Zn/Si	FeO <sub>x</sub> /FeO <sub>x</sub> +MgO	δ <sup>17</sup> O	δ <sup>18</sup> O
Carbonáceas		Relaciones normalizadas				% molar	‰	
	CV	1.34	1	0.85	0.25	35	-3	1
	CO	1.07	0.97	0.87	0.21	33	-4	0
	CM	1.10	0.97	0.92	0.48	43	1	7
	CI	~1	~1	~1	~1	45	9	17
Ordinarias	H	0.8	0.89	0.94	0.092	17	3	4.2
	L	0.78	0.84	0.64	0.088	22	3.5	4.6
	LL	0.75	0.84	0.53	0.080	27	3.8	4.9
Enstatita	EH	0.58	0.68	1.04	0.49	0.05	2.9	5.7
	EL	0.67	0.81	0.69	0.03	0.05	2.9	5.7

### A1.1.2 Carbonáceas

Su nombre hace referencia al contenido de carbono inorgánico (alcanos, bencenos y aminoácidos) en las condritas, sin embargo, sólo 3 grupos presentan un enriquecimiento considerable en carbono. Estas condritas son las más primitivas y su composición es parecida a la del Sol; presenta mayor contenido de volátiles y tierras raras (Muñoz-Espadas, 2003); los CAIs son abundantes.

Se reconocen 8 grupos de condritas carbonosas: CL, CM, CR, CH, CB, CV, CK y CO; la Tabla 6 describe las características de cada grupo. La segunda letra hace referencia a la condrita tipo con la que se le asocia, exceptuando a la condrita CH, la cual hace referencia al alto contenido de metales y alta concentración de Fe.

Los principales minerales que se pueden encontrar son el olivino ((Mg, Fe)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>) y piroxeno ((Al, Mg, Fe, Ca, Ti) (Si, Al) O<sub>3</sub>) empobrecido en Ca, troilita (FeS) y aleaciones de Fe – Ni (kamacita: contiene mayor proporción de Fe taenita: contiene mayor proporción de Ni). Cuando la matriz está alterada se puede encontrar filosilicatos como: clorita ((Mg, Fe, Li)<sub>6</sub>AlSi<sub>3</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>8</sub>), montmorillonita ((Na, Ca)<sub>0.3</sub>(Al, Mg)<sub>2</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>·nH<sub>2</sub>O) y serpentinita ((Mg, Al, Fe, Mn, Ni, Zn)<sub>2-3</sub>(Si, Al, Fe)<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>).

En cuanto a su composición, en general, estas condritas presentan un enriquecimiento en elementos litófilos respecto a las CI y un empobrecimiento en elementos litófilos volátiles (Muñoz-Espadas, 2003).

Tabla A1.3. Características de los diferentes grupos de condritas carbonosas. Formada a partir de (Krot et al., 2013; Muñoz-Espadas, 2003).

<b>Grupo</b>	<b>Año</b>	<b>Descripción</b>
<b>CI (Ivuna)</b>	1938	Carece de condros y CAIs, presenta el mayor contenido de volátiles y carbono; presentan una gran alteración acuosa; es el grupo menos denso y su composición es la más parecida al Sol; pueden presentar granos aislados de olivino y piroxeno; los fragmentos están cementados por redes de venas secundarias de carbonato y sulfato de Ca y Mg, posiblemente de origen terrestre. Es el grupo más primitivo.
<b>CM (Mighei)</b>	1889	Condros abundantes y pequeños, de diferente composición química y textura, los cuales son reemplazados parcialmente por filosilicatos. Alrededor de los condros se forman bordes de acreción de grano fino; ausencia de Fe-Ni metálico, presencia de CAIs y AOA; matriz abundante.
<b>CO (Ornans)</b>	1868	Contienen entre 35 – 45% de condros, estos son pequeños y redondeados; abundantes CAIs y AOA; abundancia relativamente baja de matriz; presentan minerales de alteración secundaria en los condros.
<b>CV (Vigarano)</b>	1910	Contienen entre 35 – 45% de condros de tamaño milimétrico con texturas parcialmente porfídicas, ricos en Mg, ~50% están rodeados de bordes ígneos de grano grueso.  Altas relaciones matriz/condros, presencia de nódulos en la matriz.
<b>CR (Renazzo)</b>	1824	Relativamente ricos en metales; contienen ~40 – 60% de condros, mayormente porfídicos, presentan bordes ígneos de grano grueso; inclusiones oscuras e inclusiones refractarias, todo esto en una matriz de grano fino rica en silicatos. Los olivinos de los condros son ricos en Cr; menor abundancia en CAIs y AOA.

<b>CK (Koroonda)</b>	1930	Gran variedad de minerales opacos (sulfuros), pueden contener pequeños cristales de olivino y pentlandita.
<b>CH (ALH 85085)</b>	1985	Matriz muy alterada a filosilicatos, con alto contenido de Fe total y Fe-Ni metálico con tendencia positiva de Ni vs Co; olivinos ricos en Cr. Condros y CAIs pequeños, ausencia de matriz y presencia de líticos fuertemente hidratados.  Bajo contenido en elementos volátiles y moderadamente volátiles.
<b>CB (Bencubbin)</b>	-	Contiene la mayor relación metal/silicatos, altamente rico en metales; agotado en $\delta^{15}\text{N}$ y en elementos litófilos moderadamente volátiles; alto contenido de Cr en olivinos, uniformidad de $^{16}\text{O}$ - empobrecidos en CAIs.

### **A1.1.3 Ordinarias:**

Esta clase es llamada así ya que son las más comunes, se dividen en tres grupos: H (high iron), L (low iron), LL (very low iron); cada una de las letras hace referencia al contenido de Fe total.

Las condritas ordinarias poseen contenidos intermedios de elementos volátiles; la matriz es de grano fino y representa sólo entre el 10 – 15% del volumen. Por otro lado, los condros son abundantes (65-75%), el contenido de elementos siderófilos decrece de H a LL y los CAIs son muy escasos (1%); y los elementos siderófilos decrecen de H a LL (Muñoz-Espadas, 2003).

Su composición isotópica de O, se grafica por encima de la TFL. Presentan gran contenido de condros, poca abundancia de CAIs y AOA; también presentan un amplio rango de tipos petrológicos. Los patrones de abundancia elemental de estas condritas son bastante planos y enriquecidos en litófilos y siderófilos refractarios, respecto a las condritas CI (Muñoz-Espadas, 2003).

Los minerales principales que se pueden encontrar son los olivinos, ortopiroxenos y aleaciones de Fe-Ni; en menor cantidad se encuentran la plagioclasa sódica ( $\text{Na}(\text{Al}, \text{Si})_3\text{O}_8$ ), troilita, cromita ( $\text{Fe}^{2+}\text{Cr}_2\text{O}_4$ ), clinopiroxeno, clorapatito ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$ ) y whitlockita ( $\text{Ca}_9\text{Mg}(\text{PO}_3\text{OH})(\text{PO}_4)_6$ ).

### **A1.1.4 Enstatita:**

Se pueden dividir dos grupos a partir del contenido de Fe metálico: EH (high iron) y EL (low iron), así mismo, existe una condrita tipo E que no está agrupada. Estos grupos muestran una mineralogía única; condros abundantes ricos en enstatita ( $\text{MgSiO}_3$ , piroxenos ricos en Mg), de texturas criptocristalinas y porfídicas, carecen de olivino y la sílice libre se puede encontrar como cuarzo, tridimita y cristobalita; los CAIs son raros, la matriz es de grano fino y es poco abundante. Esta clase es el menos primitivo de las tres clases principales y a su vez, es el que presenta mayor contenido de metales y elementos refractarios. Contienen aproximadamente el 30% en volumen de condros, presentando también una gran variedad de sulfuros de calcio (oldhamita ( $\text{CaS}$ )), magnesio (niningerita ( $\text{MgS}$ )), manganeso (alabandita ( $\text{MnS}$ )), zinc (esfalerita  $\text{ZnS}$ ) y hierro y cromo (daubreelita ( $\text{Fe}^{2+}\text{Cr}_2^{3+}\text{S}_4$ )). Son ricas en elementos refractarios y metales y presentan un carácter reductor (Muñoz-Espadas, 2003).

Las condritas EH se caracterizan por presentar una mayor abundancia de minerales opacos, niningerita (MgS) y varios sulfuros alcalinos; por otro lado, las condritas EL se caracterizan por contener alabandita (MnS).

Estas condritas tienen menor abundancia en elementos litófilos refractarios (Muñoz-Espadas, 2003).

#### **A1.1.5 Rumuruti y Kakangari**

Estas dos condritas son menos frecuentes y presentan gran contenido de metales. La condrita K es química e isotópicamente diferente a las clases ordinarias, enstatita y carbonosa, pero al mismo tiempo presenta propiedades relacionadas con cada uno de estos tipos.

Por su parte, la mayoría de las condritas R se encuentran metamorfoseadas y brechadas; presentan una estructura clara / oscura típica, y gases raros implantados por viento solar; el metal sólo aparece en cantidades traza, son ricas en olivino modal; el Ni se encuentra en sulfuros o como NiO en los olivinos. Estas condritas presentan los valores más altos en  $\delta^{17}\text{O}$ . Presentan un estado de oxidación similar a las condritas CO.

El olivino es el principal mineral que las compone, siguiendo con la plagioclasa y el piroxeno. Al igual que con las condritas ordinarias, estos dos grupos presentan abundancias elementales aplanadas y enriquecimiento en elementos litófilos refractarios respecto a la condrita CI ((Muñoz-Espadas, 2003).

### **A1.2 Clasificación primaria de condritas:**

#### **A1.2.1 Composición química de roca total:**

La fotosfera solar y la composición de roca total de las condritas presentan estrechas similitudes en su composición, a excepción de algunos elementos altamente volátiles y moderadamente volátiles, que presentan diferentes niveles de empobrecimiento. La composición total de la condrita CI se considera una medida promedio del sistema solar, por lo que se utiliza como referencia para muchos componentes del sistema solar. Los patrones de abundancia elemental único de cada condrita están bien definidos (siendo la excepción las condritas carbonosas CH y CB).

### **A1.2.2 Isótopos, C y N total y abundancia isotópica:**

Los isótopos de oxígeno, carbón y nitrógeno se agrupan y representan las tendencias de cada uno de los diferentes grupos de condritas, como, por ejemplo, en el diagrama de isótopos de oxígeno ( $^{17}\delta$  vs  $^{18}\delta$ ), las condritas carbonosas y K se sitúan por debajo de la *Línea de Fraccionamiento Terrestre* (TFL), mientras tanto, las condritas R, de enstatita y ordinarias se sitúan sobre o encima de la TFL; sin embargo, los límites entre cada grupo no están bien definidos. Al mismo tiempo las anomalías de isótopos estables marcan pautas importantes para relacionar genéticamente a los meteoritos, sin embargo, estos isótopos no son concluyentes para identificar las condritas de enstatita ya que sus concentraciones son muy parecidas a las de la Tierra.

### **A1.2.3 Estado de oxidación:**

El estado de oxidación en las condritas aumenta de la siguiente manera: de enstatita < ordinarias < condritas carbonosas + R, estando las condritas K y las ricas en metales en un orden intermedio entre las ordinarias y las de enstatita.

En las condritas ordinarias el estado de oxidación aumenta desde H a L hasta LL; esto es proporcional al aumento de la relación Fe/(Fe+Mg) de sus olivinos y piroxenos. Para las condritas carbonosas el estado de oxidación sigue la siguiente línea de aumento CB < CH < CR < CO < CK < CM < Cl. Casi todo el hierro presente en las condritas carbonáceas se oxida y combina para formar óxidos y silicatos; en las condritas ordinarias, el oxígeno se reduce y forma granos de metal; en las condritas de enstatita este se reduce a metal (McSween Jr, 1987).

## **A1.3 Clasificación secundaria de condritas:**

### **A1.3.1 Tipo petrológico:**

El tipo petrológico proporciona el grado de alteración térmica y acuosa que ha sufrido una condrita. Esta clasificación fue propuesta por Van Schmus y Wood (1967) (*in* Krot et. al., 2013). La secuencia del tipo 3 (en desequilibrio) al tipo 6 (en equilibrio) representa un incremento en el grado de equilibrio químico y recristalización textural, debida presumiblemente a metamorfismo térmico. El tipo 1 y 2 representan una alteración acuosa de alto grado, lo que se confirma gracias a la presencia de silicatos hidratados (arcillas); algunas veces el tipo 1 se asigna a las condritas que carecen de condros. En ocasiones cuando

las condritas ordinarias y enstatita presentan recristalización extensa y posible fusión, son asignadas como del tipo 7. La tabla A1.4 resume las características de cada uno de los tipos petrológicos.

### **A1.3.2 Alteración Acuosa:**

Se produce por reacción de las condritas con agua a temperaturas inferiores a 20 °C. Aparentemente no modifica la composición total de la condrita, sin embargo, si modifica las características mineralógicas y texturales primarias de la matriz, condros y CAIs (Muñoz-Espadas, 2003).

### **A1.3.3 Metamorfismo de choque y brechas:**

Este tipo de metamorfismo se establece a partir de la variación de los parámetros mineralógicos y texturales, basado en los efectos de choque en los olivinos y plagioclasas. Para el caso de la condrita de enstatita, la cual carece de olivino, la clasificación se extiende a los ortopiroxenos. La Tabla A1.5 describe los tipos y características de metamorfismo de choque.

A causa del impacto entre objetos del sistema solar, se producen fragmentos que se unen para formar una nueva litología, es así como se forman las brechas. En las brechas genómicas los clastos pertenecen al mismo grupo de meteoritos, pero con diferente tipo metamórfico; por otra parte, las polimícticas son brechas en la que los clastos pertenecen a distintos grupos de meteoritos. La tabla A1.6 resume los diferentes grupos de brechas y sus características.

Tabla A1.4 Tipos petrológicos. Tomada de (Krot, Keil, Scott, Goodrich, &amp; Weisberg, 2013).

Criterio	Tipo petrológico						
	1	2	3	4	5	6	7
Homogeneidad de la composición de olivino y piroxeno con bajo contenido de Ca	-	> 5% desviaciones medias/promedio		<5%	Homogéneo		
Estado estructural del piroxeno bajo en Ca	-	Predominantemente monoclinico		>20% monoclinico	<20% monoclinico	Ortorrómbico	
Feldespatos	-	Sólo granos primarios menores		Granos secundarios, <2 $\mu\text{m}$	Granos secundarios, 2-50 $\mu\text{m}$	Secundario, >50 $\mu\text{m}$	
Vidrio en condros	Alterado o principalmente ausente	Mayormente alterado, poco observable	Limpio, isotrópico	Desvitrificado	Ausente		
Contenido de Ni (% en peso) en el metal	-	Taenita menor (<20) o ausente	Kamacita y Taenita (<20) asociadas como exsolución				
Mínimo contenido de Ni (% en peso) en sulfuros	-	>0.5	<0.5				
Matriz	Grano fino, opaca	Principalmente de grano fino, opaca	Opaca a transparente	Transparente, recristalizada			
Integración matriz-condros	Sin condros	Condros bien definidos		Se pueden discernir algunos condros, bordes mal definidos		Condros poco delineados	Textura primaria destruida
Carbón (% en peso)	3 – 5	0.8 - 2.6	0.2 – 1	<0.2			
Agua (% en peso)	18 – 22	2 – 16	0.3 – 3	<1.5			



Tabla A1.5. Clasificación por metamorfismo de choque (impacto) en condritas. Tomada de (Krot et al., 2013).

Etapa de choque	Descripción	Efecto resultante por equilibrio del pico de presión			Presión de choque (GPa) <sup>a</sup>
		Olivino	Plagioclasa	Ortopiroxeno	
S1	No chocado o impactado		Extinción óptica aguda, fracturas irregulares		< 4 -5
S2	Chocado muy débilmente	Extinción ondulatoria, fracturas irregulares		Extinción ondulatoria, fracturas irregulares y algunas planas	5 – 10
S3	Chocado débilmente	Fracturas planares, extinción ondulatoria y fracturas irregulares	Extinción ondulatoria	Lamelas de clinoenstatita en (100), extinción ondulatoria, fracturas planas e irregulares	15 -20
S4	Moderadamente chocado	Mosaicismo débil, fracturas planares	Extinción ondulatoria, parcialmente isotrópico, características de deformación planar.		30 – 35
S5	Fuertemente chocado	Mosaicismo fuerte, fracturas planares, deformación planar	Maskelinita*		45 – 55
S6	Muy fuertemente chocado	Recristalización y tinción en estado sólido, ringwoodita, fusión	Fundido por choque (vidrio normal)	Majorita, fusión	75 – 90
	Fundido por choque	Fusión de roca entera (rocas de fusión por impacto y brechas fundidas)			

<sup>a</sup> presión de choque solo para las condritas ordinarias.  
\* transformación en estado sólido de la plagioclasa en vidrio.

Tabla A1.6. Descripción de las diferentes brechas. Tomada de (Krot et al., 2013).

<b>Brechas</b>	<b>Descripción / constituyentes</b>	<b>Ejemplos de meteoritos</b>
<b>Primitivas, brechas acrecionales</b>	Constituyentes (incluyendo clastos) ensamblados durante acreción.	Allende (CV3), Leoville (CV3), Sharps (H3)
<b>Brechas genómicas</b>	Clastos y matriz del mismo grupo composicional pero diferente tipo metamórfico o historia de alteración.	Millbillillie (eucrita), Noblesville (H4-6).
<b>Brechas de regolito</b>	Componentes litificados desde la superficie superior del cuerpo parental (contienen gases de viento solar, trazas de erupciones o llamaradas solares, etc.).	Adzhi – Bogdo (LL3-6), Kapoeta (howardita.), Murchison (CM2), Nogoya (CM2), Rumuruti (R3-6).
<b>Brechas fragmentarias</b>	Detritos fragmentarios sin propiedades de regolito (gases solares, trazas de llamarada solar).	Norton Country (aubrita.), Dhurmsala (LL6), Siena (LL5).
<b>Brechas fundidas por impacto</b>	Rocas fundidas por choque con clastos sin fundir.	Shaw (L6), Chico (L6), NWA 1498 (H4), Abee (EH4), DaG 896 (acondrita no agrupada)
<b>Brechas granulíticas</b>	Brechas metamorfoseadas.	Camel Donga (euc.) Asuka 881388 (eucrita), Cabezo de Mayo (L/LL6)
<b>Brechas polimícticas</b>	Fragmentos litificados de varios tipos: los clastos y/o matriz tienen diferente composición.	Howardites, eucrita polimíctica (p.ej., Petersburg).
<b>Brechas monomícticas</b>	Matriz y clastos son de la misma clase y tipo.	Norton Country (aub.), Bloomington (LL6), Stannern (eucrita).
<b>Brechas dimícticas</b>	Compuestas por dos distintas litologías.	Cumberland Falls (aub.) FRO 93008 (ureilita).
<b>Componentes</b>		
<b>Fragmentos xenolíticos</b>	Clastos no genéticamente relacionados con la roca encajonante.	Clastos CM en howardites (p.ej., Kapoeta, Lew 85300)

<b>Clastos cognados</b>	Clastos líticos relacionados con la roca encajonante.	Clastos de otros tipos petrológicos.
<b>Clastos fundidos de brecha de impacto</b>	Clastos de impacto se derriten con detritos cerrados sin fundir.	
<b>Clastos de fusión por impacto</b>	Fragmentos fundidos únicamente por impacto.	
<b>Inclusiones oscuras (fragmentos)</b>	Constituyentes ópticamente oscuros en algunas brechas sin significado genético (clastos de brechas de grano fino, fragmentos de clase C en brechas de meteoritos, etc.).	Clastos de C en meteoritos HED

#### **A1.3.4 Grado de meteorización terrestre:**

Esta clasificación se puede utilizar como un parámetro adicional para los hallazgos; comúnmente se aplica de dos formas. La primera se aplica para muestras de mano de meteoritos antárticos: A – oxidación menor; B – oxidación moderada; C – oxidación severa; y E – minerales evaporíticos observables a simple vista.

La segunda categoría es una clasificación de alteración progresiva, la cual se aplica a muestras en secciones pulidas (láminas delgadas); W0: no se observa alteración visible en el metal o en los sulfuros; W1: aparece la troilita, pequeñas vetas de óxido y bordes alrededor del metal; W2: oxidación de ~20-60% del metal; W3: fuerte oxidación del metal y la troilita (60-95% de reemplazo); W4: hay oxidación completa del metal y la troilita, pero no existe oxidación de silicatos; W5: comienza la alteración de los silicatos máficos, preferentemente a lo largo de las grietas; W6: reemplazo de silicatos por minerales arcillosos y óxidos.

### Clasificación de meteoritos Condritas

Clase	Carbonáceas								Ordinarias			Enstatita				
Grupo	CI	CM	CO	CR	CB-CM	CV	CK		H	L	LL		EH	EL	R	K
Tipo Petr.	1	1-2	3-4	1-2	3	3	3-4	3-6	3-6			3-6		3-6		
Subgrupo					CB <sub>a</sub>	CV <sub>oxA</sub>										
					CB <sub>b</sub>	CV <sub>oxB</sub>										
						CV <sub>R</sub>										

### Acondritas y meteoritos ígneos



Figura A1.2. Esquema de clasificación de las dos grandes clases de meteoritos. Tomada de (Krot et al., 2013).

#### A1.4 Mineralogía:

A continuación, la Tabla A1.7 presentan un resumen de los principales minerales que conforman los diferentes meteoritos.

Tabla A1.7. Minerales principales y secundarios de los diferentes tipos de condritas. Formada partir de (Krot et al., 2013; Muñoz-Espadas, 2003).

<b>Condritas</b>					
<b>Minerales y formula química</b>	<b>Carbonáceas</b>	<b>Ordinarias</b>	<b>Enstatita</b>	<b>Rumuruti</b>	<b>Kakangari</b>
<b>Olivino</b> (Mg, Fe) <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	x	x		x	x
<b>Piroxeno</b> (Al, Mg, Fe, Ca, Ti) (Si, Al) O <sub>3</sub>	x	x	x	x	x
<b>Troilita</b> (FeS)	x	x			x
<b>Aleaciones</b> Fe – Ni	x	x			
<b>Plagioclasa</b> (Na, Ca) (Al, Si) <sub>3</sub> O <sub>8</sub>		x		x	x
<b>Sreibersita</b> (Fe, Ni, Cr) <sub>3</sub> P					
<b>Cromita</b> (Fe <sup>2+</sup> Cr <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )		x			
<b>Clorita</b> (Mg, Fe, Li) <sub>6</sub> AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>	x				
<b>Montmorillonita</b> Na, Ca) <sub>0.3</sub> (Al, Mg) <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> ·nH <sub>2</sub> O	x				
<b>Serpentinita</b> (Mg, Al, Fe, Mn, Ni, Zn) <sub>2-3</sub> (Si, Al, Fe) <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	x				
<b>Sílice</b> (SiO <sub>4</sub> )			x		
<b>Espinela</b> (MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )					x

<b>Ferrihidrita</b> ( $\text{Fe}_4(\text{OH})_{12}$ a $\text{Fe}_5\text{O}_3(\text{OH})_9$ )					x
<b>Fosfatos (<math>\text{PO}_4</math>)</b>		x			
<b>Sulfuros</b> ( $\text{S}^{2-}$ )			x		

# **ANEXO 2: Técnicas Analíticas**



### A2.1 Fundamentos del análisis dimensional 2D – 3D:

La técnica CSD plantea ecuaciones que representan condiciones de equilibrio con posibilidad de identificar situaciones de no equilibrio. Una de las maneras de cuantificar la textura es medir el número de cristales ( $\mathbf{n}$ ) por unidad de volumen de roca que hay en un rango determinado de tamaños ( $\Delta\mathbf{L}$ ). A esto se le denomina densidad de población,  $\mathbf{n}(\mathbf{L})$ , siendo L la longitud de los cristales, medida en cualquier superficie de la roca o en una lámina delgada, la cual corresponde al diámetro del círculo o el eje mayor de la elipse cuya área es igual al área de la partícula de la sección estudiada (Castro Dorado, 2015).

En el caso de valores infinitesimales de  $\Delta\mathbf{L}$ , se tiene una curva de distribución de tamaños ( $d\mathbf{L}$ ) para cualquier roca, a partir de la cual se puede determinar la distribución acumulativa de tamaños  $\mathbf{N}(\mathbf{L})$  que se tiene hasta un valor de L determinado:

$$N(L) = \int_0^L n(L)dL \quad (1)$$

La densidad de población se obtiene derivando la ecuación (1):

$$n(L) = \frac{dN(L)}{dL} \quad (2)$$

La ecuación (2) se escribiría para un intervalo de tamaños dado (j):

$$n(L_j) = N(L_j)/W_j$$

Siendo  $n(L_j)$  la densidad de población en el intervalo j y  $W_j$  el ancho del intervalo tomado. La dimensión de la densidad de población es  $L^{-4}$  ( $\text{mm}^{-4}$ ), el cual resulta de dividir la densidad de partículas por unidad de volumen ( $L^{-3}$ ) y por unidad de longitud ( $L^{-1}$ ), que corresponde a la anchura del intervalo de tamaños.

Los diagramas CSD son la representación semilogarítmica de un diagrama cartesiano del logaritmo natural de la densidad de población,  $\ln |n(L)|$ , frente a L. En estos diagramas el valor de L es un *proxy* del tiempo, para una tasa de crecimiento constante, y el valor de  $n(L)$  es un *proxy* de la densidad de nucleación.

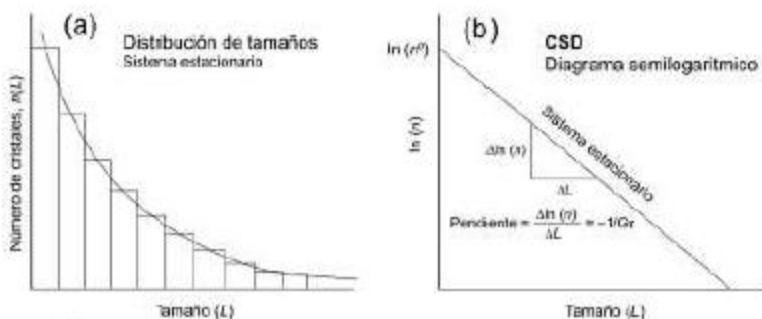


Figura A2.1. a) Histograma de tamaños para los rangos  $L$  (longitud) establecidos. Los cristales más gruesos son los menos abundantes. El tamaño de grano disminuye exponencialmente con el número de cristales, lo que corresponde a un sistema estacionario. b) Diagrama semilogarítmico del sistema estacionario anterior en el que la relación entre el logaritmo natural de la densidad de población de tamaños  $[\ln(n)]$  y el tamaño ( $L$ ) es una línea recta de pendiente negativa.

Realizar una interpretación 3D de una sección 2D no es sencillo, por lo que se deben tener en cuenta dos aspectos importantes: 1) efecto de corte y 2) efecto de probabilidad de intersección. El efecto de corte se refiere al hecho de que cualquier plano mostrará pocas secciones de partículas que pasen por el centro y ofrezcan el diámetro máximo del mineral, lo que causa que los minerales pequeños tengan poca probabilidad de ser cortados por un plano, dando lugar al efecto de intersección que también oculta la distribución real de los tamaños.

La manera más sencilla de obtener datos reales sobre el tamaño y abundancia de los minerales es mediante el análisis automático de imágenes por seccionamiento de escalas de grises.

### A2.1.1 Generación de rayos X:

Una de las maneras más sencillas de generar rayos X es bombardeando la muestra con un electrón de alta energía producido por un filamento incandescente; se produce un haz continuo de energías de rayos X debido a diversas interacciones de los electrones libres entrantes con electrones de enlace en el material objetivo, a esto se le conoce como radiación “*bremstrahlung*” en la cual los electrones incidentes se desaceleran debido a las interacciones con los núcleos de los materiales objetivo. Esto depende de la cantidad de energía cinética electrónica transferida por esta interacción, de esta manera la radiación de

rayos X emitida presenta un amplio espectro de energías (es decir, policromática) (Hanna & Ketcham, 2017).

La fuente de rayos X, puede ser mono o policromática. Debido a que la naturaleza policromática de la radiación puede causar “artefactos” de imagen, se usa un filtro de baja atenuación para remover algunos de esos rayos X de baja energía. Los rayos X policromáticos se generan a partir de una fuente puntual finita que diverge para iluminar un volumen de muestra. Un cono de energía de rayos X es detectado por un detector plano 2D compuesto de elementos discretos, cuyo número determina el tamaño máximo de la imagen final.

Otra fuente de rayos X se produce cuando un electrón incidente expulsa un electrón de capa interna de un átomo y un electrón de capa externa se mueve hacia adentro para llenar la vacancia. Ya que el electrón de la capa externa presenta un mayor estado de energía que el electrón de la capa interna, el cambio de estado de energía da lugar a una energía de rayos X característica. La producción total de la energía de rayos X es denominada flujo (fotones/segundo) (Hanna & Ketcham, 2017).

A pesar de que el sistema de tubos de rayos X, es una forma rentable de generar radiación de rayos X, el flujo es limitado y el espectro policromático puede conducir a errores en las imágenes, por lo que se puede utilizar una fuente de sincrotrón para reducir estas limitaciones. Este sistema utiliza un gran anillo de almacenamiento que acelera los electrones libres, generados por una pistola de electrones, a velocidades aún más altas. La radiación de rayos X se genera a partir de los electrones mientras cambian su trayectoria, ya sea mediante el uso de imanes de flexión o el uso de un dispositivo de inserción.

La potencia total de un tubo de rayos X es la que determina el volumen y el tipo de materiales en los que puede penetrar adecuadamente:

$$P = VI \quad (1)$$

Como se muestra en (1), la potencia está relacionada con la energía (voltaje V) y la corriente (I). El tamaño del punto es inversamente proporcional a la potencia para evitar daños en la muestra.

El detector de rayos X, está hecho de un material centellante, el cual produce fotones de luz visible en respuesta de la absorción de los fotones de rayos X. Los destellos producidos son contados y grabados por un dispositivo que digitaliza la señal (dispositivo de carga

acoplada (CCD)). De igual manera, se pueden utilizar chips complementarios, sin embargo, estos pueden afectar la calidad de la imagen.

### A2.1.2 Atenuación de Rayos X

El conjunto de datos  $\mu$ CT tridimensional, representa la atenuación de los rayos X en cada punto dentro del material analizado. Dicha atenuación es regida por la ley Lambert – Beer:

$$I = I_0 \exp(-\mu x) \quad (2)$$

I representa la intensidad de rayos X registrada,  $I_0$ , la intensidad inicial de rayos X,  $\mu$  representa el coeficiente de atenuación del material y  $x$  es la longitud de la trayectoria de los rayos X a través del material.

Debido a que los materiales no son homogéneos, se debe considerar la atenuación lineal de cada material ( $\mu_i$ ) y su extensión lineal ( $x_i$ ).

$$I = I_0 \exp \left[ \sum (-\mu_i x_i) \right] \quad (3)$$

Sin embargo, para esta última ecuación se necesita la firma completa del espectro de rayos X incidente, pero muy pocas veces se mide directamente y depende de varios factores (tipo de material, y el tipo de destino, voltaje de aceleración, corriente y cualquier filtro utilizado). La mayoría de los algoritmos suponen una sola energía efectiva.

En materiales planetarios, la atenuación de los rayos X a través de un material es el resultado de tres procesos, cuya influencia varía de acuerdo con la energía incidente y las propiedades de cada material: absorción fotoeléctrica, dispersión incoherente (Compton) y dispersión coherente (Rayleigh). En la absorción fotoeléctrica, un fotón de rayos X entrante libera un electrón de una capa interna dejando al átomo ionizado; el fotón original de rayos X se absorbe; esto depende de la energía del fotón y número atómico ( $Z$ ), del material absorbente.

En la dispersión del Compton, el fotón de rayos X incidente expulsa un electrón de una capa externa, mientras retiene parte de su energía y, como resultado, se dispersa como un fotón de menor energía; esto depende de la densidad electrónica del material.

Finalmente, la dispersión coherente, es un proceso elástico donde el fotón de rayos X entrante hace que un electrón vibre a la misma frecuencia, emitiendo un fotón de rayos X de la misma energía. El efecto general es que la radiografía incidente se dispersa, sin embargo, no se produce una pérdida de energía y el átomo afectado no cambia. La intensidad del efecto anterior es aproximadamente proporcional a  $Z^2$  y es más pronunciado con energías de rayos X más bajas.

La dependencia que existe entre proceso de absorción fotoeléctrica de  $Z$  con el dominio en las energías de rayos X hace que estas energías sean más ideales para distinguir ciertos minerales. Esto se logra a partir de la integración de los coeficientes de atenuación de todas las energías en ese rango.

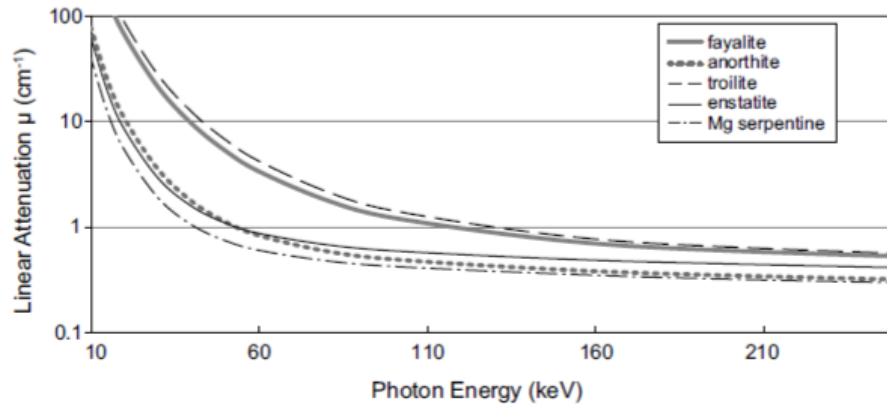


Figura A2.2. Coeficiente de atenuación lineal en función de la energía de rayos X para minerales comunes en meteoritos. Tomada de (Hanna & Ketcham, 2017).

### A2.1.3 Resolución espacial:

Es una función del ancho del haz, cuando este pasa por un punto focal a través del objeto a un elemento detector. A su vez, el ancho del haz es una función del tamaño del punto (s), el tamaño del elemento detector (d), la distancia entre la fuente y el objetivo (*distance between the source and object* = SOD) y la distancia entre la fuente y el detector (*distance between the source and the detector* = SDD):

$$BW = \frac{\sqrt{d^2 + [s(M - 1)]^2}}{M}$$

En donde:

$$M = \frac{SDD}{SOD}$$

A medida que aumenta s, aumenta el ancho del haz (*width of the beam* = BW), por lo que la resolución espacial disminuye (Figura 11, inciso a). Otra variable es el tamaño físico de los elementos del detector, ya que, a mayor d, BW es mayor, esto genera que se registre mayor número de rutas posibles. Generalmente, en los diferentes sistemas, d es grande en relación con s y el aumento geométrico se usa para variar la resolución espacial moviendo el objetivo en relación con la fuente (b). La mayor resolución se logra cuando se coloca la muestra más cerca de la fuente, minimizando la SOD.

Adicionalmente, algunos sistemas utilizan un aumento óptico (c), lo que reduce la dependencia de la resolución espacial de la SOD y permite una alta resolución y también una

mayor ampliación de subvolúmenes dentro de objetos grandes. En estos sistemas, los elementos de detección efectivos son más pequeños que la fuente, por lo que el objetivo se coloca más cerca del detector. En líneas de haz de sincrotrón también se utilizan los aumentos ópticos.

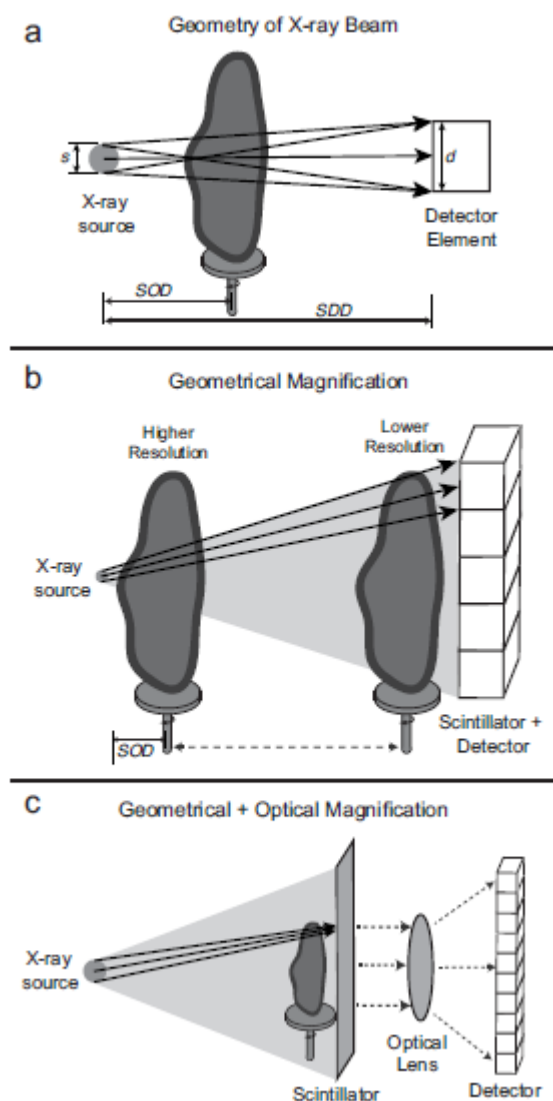


Figura A2.3. a) El ancho de la trayectoria del haz en la muestra define la resolución espacial de la imagen y es una función del tamaño del punto,  $s$ , tamaño del detector,  $d$ , fuente – muestra – distancia ( $d$ ), fuente – muestra – distancia ( $SOD$ ) y fuente – detector – distancia ( $SDD$ ). b) ampliación geométrica: se coloca la muestra cerca de la fuente, lo que da como resultado una resolución espacial más alta como  $SOD$  y, por lo tanto, el ancho de haz se minimiza. c) los elementos detectores son pequeños en comparación con la fuente, por lo que la muestra es colocada cerca del centellador para una resolución máxima. Se utiliza un aumento óptico.

#### **A2.1.4 Parámetros de adquisición:**

Estos parámetros están determinados por la composición, el tamaño de la muestra y los objetivos de investigación, así como la intensidad de la energía de rayos X, la cual es importante para distinguir los componentes.

Mientras más vistas o proyecciones se recopilen, mayor será la calidad de los datos, sin embargo, un mayor número de vistas aumentara el tiempo de adquisición. El aumento de tiempo de adquisición por vistas también es útil para obtener un mejor resultado.

Otra forma de aumentar la SNR consiste en enlazar las lecturas del detector (suma de la señal de los elementos del detector adyacente). Otra opción es prefiltrar el haz que eliminará preferentemente los rayos X de menor energía para disminuir los efectos de endurecimiento del haz y los artefactos de anillo, sin embargo, esto disminuiría la SNR y posiblemente degrade la discriminación del material, por lo que se debe tener cuidado de no filtrar en exceso.

Se deben de realizar algunas calibraciones antes, durante y/o después de la imagen  $\mu$ CT para poder garantizar una buena calidad de datos. Las calibraciones que se hacen son de 1) campo oscuro, la cual consiste en una imagen de proyección tomada mientras el haz de rayos X esta apagado; ayuda a corregir el sesgo del detector presente mientras las radiografías están apagadas. 2) la calibración de campo brillante se toma con los rayos X y la muestra fuera del campo de visión. Es esencial corregir la respuesta diferencial entre los elementos del detector y la deriva de la fuente (cambio de intensidad de los rayos X respecto al tiempo). 3) la calibración geométrica garantiza que los movimientos del Gantry funcionen bien, que el eje de rotación central del montaje de la muestra este ubicado en la posición conocida con respecto al arreglo del detector, que la fuente de rayos X y el detector estén correctamente alineados y que la magnificación espacial del sistema este calibrada.

#### **A2.1.5 Reconstrucción:**

Las reconstrucciones  $\mu$ CT se procesan y reconstruyen en un volumen 3D, el cual representa la atenuación de los rayos X. El algoritmo de reconstrucción más utilizado es la retroproyección filtrada (*filtered back-projection* = FBP), en esta, los datos se combinan primero en un filtro luego las proyecciones se “apilan” en una cuadrícula a través de sus respectivas posiciones angulares para reconstruir gradualmente una imagen de atenuación de rayos X. La FBP es utilizada en sistemas de fuente de sincrotrón.



### **A2.1.6 Artefactos:**

Los artefactos de datos  $\mu$ CT son variaciones en el número de CT que reflejan la atenuación real de RX del material que puede impedir la visualización y cuantificación correcta de los datos. En el caso de los sistemas de rayos X policromáticos basados en tubos se produce el endurecimiento de haz, el cual consiste en que el número de CT de determinado material varíe de acuerdo con su posición dentro de su volumen de datos. Lo anterior es debido a que los rayos X de baja energía (suave) se filtran preferentemente a medida que pasan a través del material, lo que “endurece” el haz y aumenta la energía promedio. El endurecimiento de haz se puede evitar o corregir a partir de varias maneras, como lo puede ser el uso de calibraciones y filtros de imágenes, hasta procesar las imágenes una vez obtenidos los datos.

De igual manera, se suele emplear una transformación polinómica, generalmente de 2° a 4° grado, para intentar convertir los datos de una respuesta de atenuación policromática a una monocromática, a este proceso se le denomina lineación.

También, se producen los anillos, destellos de estrellas, sombras y rayas, aunque estos artefactos no se limitan a las fuentes policromáticas. Principalmente los anillos son el resultado de la respuesta diferencial de rayos X de los elementos discretos del detector, cuando se combinan con la adquisición de datos rotacionales, se manifiestan como anillos en imágenes de corte 2D. El destello de estrellas es causado por inclusiones altamente atenuantes que conducen a rayas brillantes y oscuras que emanan de las inclusiones en el área circundante. Las sombras son similares a los destellos de estrellas, con la variación de que puede ser más sutil en las áreas oscuras de un material altamente atenuador debido al filtrado extremo del haz en rutas de rayos. Por último, las rayas se forman a partir de una SNR muy baja a lo largo de las trayectorias largas del haz o la presencia de material altamente atenuador; esto se manifiesta como líneas a través de la imagen reconstruida.

El efecto de volumen parcial (*Partial Volume Effect* = PVE), es un artefacto en el que un vóxel contiene más de un material y, por lo tanto, el número de CT es un promedio de la atenuación de rayos X de todos los materiales. El desenfoque general de los datos se puede cuantificar como una función de dispersión de puntos (point spread function = PSF); este describe la respuesta del sistema a un objeto puntual ideal y es una función compleja del

ancho del haz. Estos dos artefactos o pueden corregirse por lo que en casos de segmentación o medición de pequeñas características.

### **A2.1.7 Visualización:**

Una ortesis es una imagen 2D, la cual es ortogonal a la geometría de la imagen. Las imágenes 2D originales son ortosecciones XY perpendiculares al eje de rotación vertical (Z) y el software de visualización estándar puede utilizarse para ver las ortosecciones en los otros dos planos ortogonales XZ o YZ.

Una isosuperficie es un contorno 3D dentro del volumen de datos que tiene un valor particular de número CT (escala de grises), dentro del conjunto de datos y puede resaltar rápidamente el exterior de una muestra o un material o un rasgo dentro de él.

La representación del volumen es una visualización real 3D, en la que a cada vóxel se le asigna un color y una opacidad.

## **A2.2 MEB o SEM:**

### **A2.2.1 Características:**

En el MEB se utiliza un haz de electrones que interactúa con la materia para generar una imagen en escala de grises. Esto se realiza a partir del calentamiento de un filamento de tungsteno sometido a altas temperaturas para generar un haz de electrones (Suazo Cruz, 2020). Los electrones emitidos por el filamento disminuyen su diámetro hasta hacerse puntual (Renau-Piqueras & Faura, 1994).

El haz electrónico en la columna del MBE impactará la muestra y por efecto del choque, desprenderá electrones secundarios del mismo, además de otro tipo de radiación. El haz electrónico del MEB “barre”, línea por línea, una pequeña área de la superficie de la muestra, en forma sincrónica con el barrido del haz de electrones de la pantalla de TV. Cada punto de la superficie de la muestra que es impactado por el haz electrónico emite electrones secundarios, los cuales son recogidos mediante un detector apropiado y transformados en una señal electrónica; en señal de salida del detector controla la intensidad del haz electrónico del tubo de imagen; por lo cual, la intensidad de la luz emitida por cada punto de la pantalla será proporcional al número de electrones secundarios emitido por la muestra; por lo tanto, esto construirá una imagen representativa de la superficie de la muestra en observación (Ribadeneira, 1998).

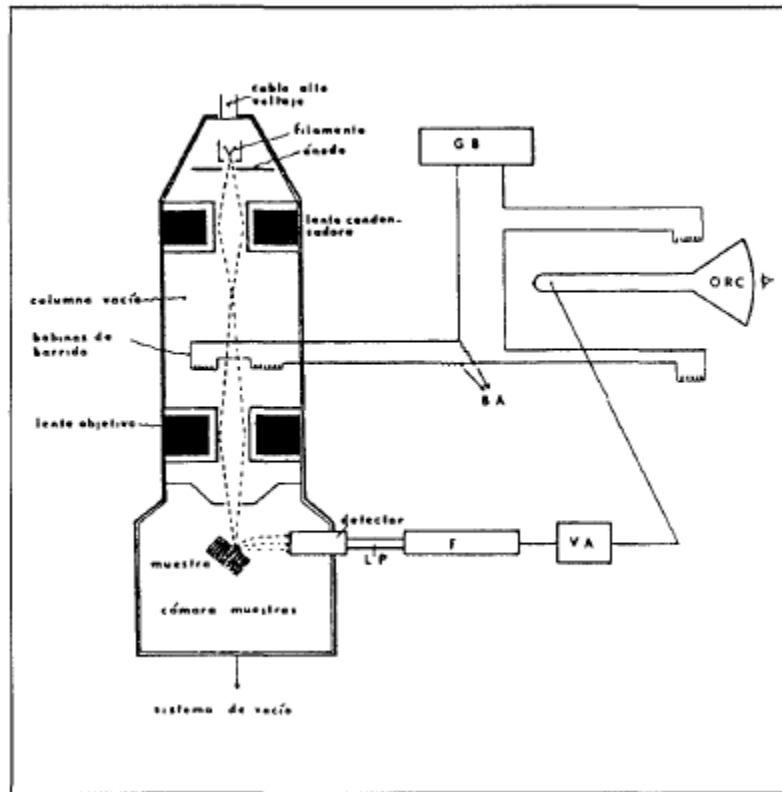


Figura A2.4. Esquema del microscopio electrónico de barrido (MEB). En este esquema se observan los diferentes componentes. LP: light pipe, F: fotomultiplicador, ORC: osciloscopio de rayos catódicos, CB: generador de barrido, Ba: bobinas de ampliación. Tomado de (Renau-Piqueras & Faura, 1994).

### A2.2.2 Señales emitidas:

La interacción entre el haz y la muestra generan señales que darán lugar a la formación de la imagen.

- Ondas electromagnéticas, tales como rayos X y catodoluminiscencia.
- Electrones reflejados, secundarios, transmitidos y absorbidos.
- Señales de fuerza electromotriz (solo en especímenes semiconductores).

Siendo el inciso b el de mayor importancia. Algunos de los electrones del haz penetran dentro de la muestra perdiendo energía y dispersándose dentro de esta en diferentes ángulos.

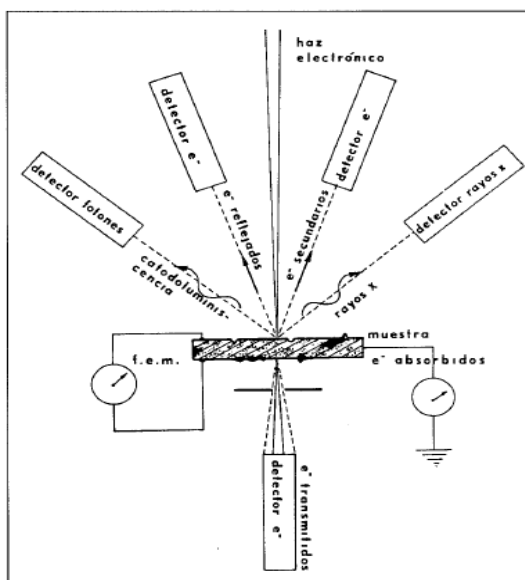


Figura A2.5. Los electrones reflejados (BE), emergen siguiendo direcciones distintas a la del haz. Los electrones primarios bombardean orbitales electrónicos de los átomos de la muestra generando electrones secundarios (SE1), de menor energía que los BE. De igual manera los BE pueden coincidir sobre átomos de la muestra produciendo electrones secundarios (SE2). Los electrones absorbidos son los electrones primarios, que penetran en la muestra y permanecen en su interior; en su opuesto, se encuentran los átomos transmitidos, los cuales atraviesan la muestra (solo si la muestra es lo bastante delgada para atravesarla).

### A2.3 Espectrometría de rayos X por dispersión de energía (EDS):

Es una técnica incluida en la MEB, la cual se utiliza para realizar un análisis elemental de la muestra estudiada.

Se basa en la detección de rayos X que emite un material excitado por un haz de electrones concentrado en una superficie pequeña. Los electrones producen transmisiones energéticas, lo que, a su vez, estas involucran los niveles atómicos internos, produciendo fotones en los espectros de rayos X característicos de cada átomo, lo que permite identificarlos.

Comúnmente se emite el espectro de los picos que corresponden a los niveles de energía a los cuales la mayoría de los rayos X son recibidos. Estos picos son únicos para cada elemento. Las posiciones de las líneas nos dan información sobre la composición cualitativa de la muestra. La altura de los picos de los rayos X corresponde a la concentración de los elementos (Márquez Herrera, 2005).

### A2.4 Microtomografía de rayos X:

Es una técnica que ayuda a visualizar la estructura interna de muestras en 3D, a resoluciones mayores a los 50  $\mu\text{m}$ /vóxel.

El principio físico para obtener las imágenes en 3D se basa en la interacción de los rayos X con la materia.

La energía de rayos X que es absorbida por la materia es mostrada en las imágenes con tonalidades claras y oscuras, esto depende de la densidad del material; mientras más clara sea la tonalidad, mayor es el grado de absorción, debido a su mayor densidad (Vega, Carrasco - Núñez, Arteaga Martínez, Cid-luna, & Manea C., 2018)

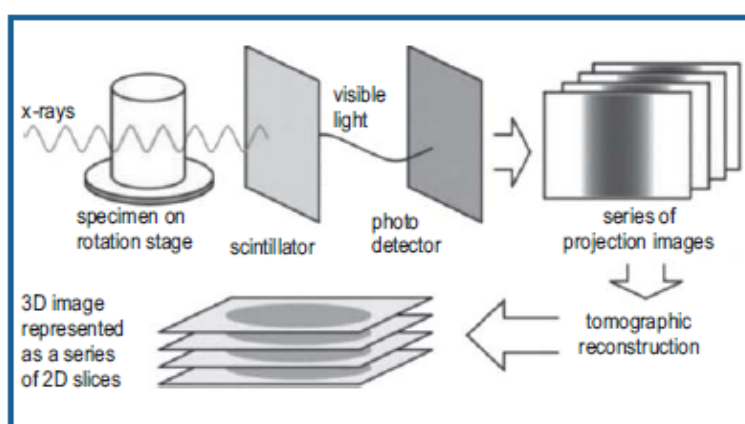


Figura A2.6. Mecanismo de adquisición de imágenes 3D por microtomografía de rayos X. tomada de (Vega et al., 2018).

### A2.5 Espectroscopia de Fluorescencia de rayos X (FRX):

Esta técnica utiliza la fluorescencia de los rayos X emitida al excitar una muestra con a la radiación X. dicha radiación expulsa electrones de las capas internas del átomo, haciendo que los electrones de capas externas llenen estos vacíos, generando así radiación X fluorescente o secundaria, a una longitud de onda e intensidad directamente relacionada con la concentración de cada elemento presente en la muestra.

La FRX tiene como finalidad realizar un análisis químico elemental, cualitativo y cuantitativo de los elementos que se encuentran entre el flúor (F) y el uranio (U) de muestras sólidas y líquidas.

# **ANEXO 3: Análisis de imágenes**

### **A3.1 ImageJ (análisis 2D):**

El software ImageJ v.1.51k, es un programa de procesamiento y análisis de imágenes Java de dominio público inspirado en NIH image para Macintosh. Se puede descargar desde su página principal: <https://imagej.nih.gov/ij/download.html> , en donde se encuentra disponible para sistemas Windows, Mac OS X y Linux.

Puede mostrar, editar, analizar, procesar guardar e imprimir imágenes de 8, 16 y 32 bits. El programa es multiproceso, por lo que las imágenes que las operaciones que requieren un tiempo de procesamiento más largo se pueden realizar en paralelo con otras operaciones.

El programa puede calcular estadísticas de valor de píxel y áreas seleccionadas por el usuario. Mide distancias y ángulos, así como crea histogramas de densidad y trazados de perfil de línea. Admite funciones de procesamiento de imágenes estándar como manipulación de contraste, nitidez, suavizado, detección de bordes y filtrado de mediana. Realiza transformaciones geométricas y ampliación de imágenes.

Las imágenes utilizadas en este trabajo fueron obtenidas de las láminas delgadas de cada una de las condritas. A partir de estas imágenes, se realizaron mosaicos de cada condrita. Previamente, se identificaron manualmente los condros en ArcMap 10.1, una vez obtenida la imagen con los condros seleccionados, esta se importa a ImageJ para comenzar a realizar el proceso.

Antes de realizar el análisis de partículas, se debe asignar una escala a la imagen procesada, así como asignar un valor de 8 bits y realizar el recorte de las partes externas del mosaico para evitar tener mucha interferencia en el proceso.

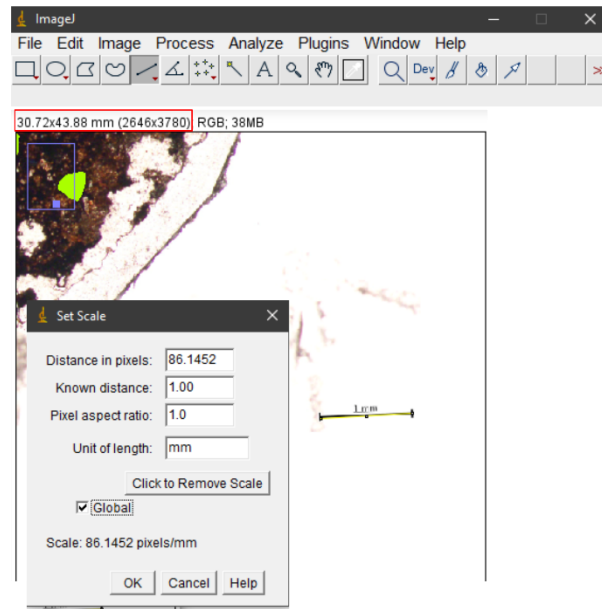


Figura A3.1. Para este ejemplo se utilizó el mosaico de condrita ordinaria Nuevo Mercurio. Para colocar la escala primero se debe de colocar una línea guía sobre la escala arrojada por el microscopio, esta línea se coloca con la herramienta *Straight*, posteriormente, en el menú principal, se selecciona la ventana *Analyze* y la opción *Set Scale*, en *Know Distance* se coloca el valor de la escala conocida y en *Unit of Length* se coloca las unidades en la que esta la escala, finalmente se selecciona la opción de *Global* y se da en *Ok*, inmediatamente notamos como se asigna la escala en la parte superior de la imagen (rectángulo rojo).

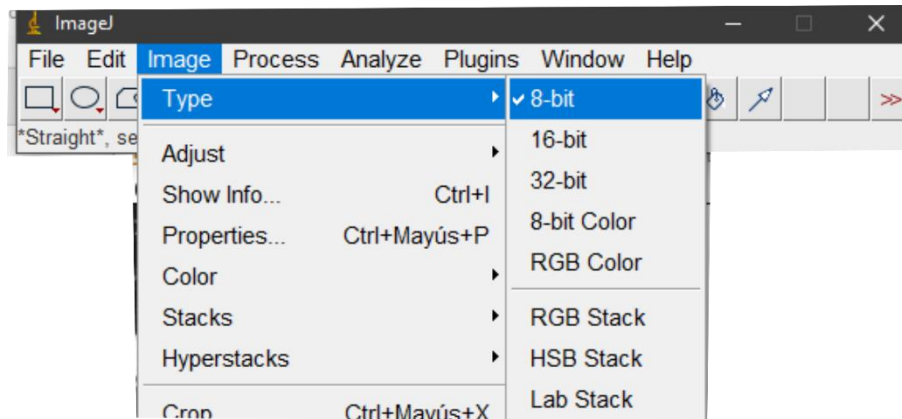


Figura A3.2. Para asignar el tipo de imagen, en el menú principal se selecciona la ventana *Image* → *Type* → *8-bit*, automáticamente la imagen se verá en blanco y negro. Este fue el valor que se asignó a cada uno de los mosaicos trabajados.



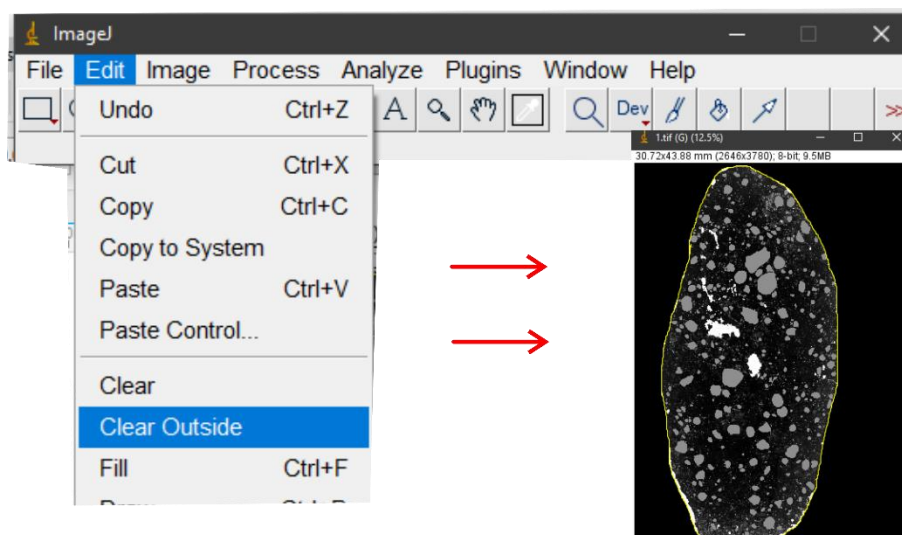


Figura A3.3. Para eliminar la parte externa de la imagen se realiza lo siguiente: se debe de seleccionar la figura Freehand selections para dibujar una línea por todo el contorno del área de interés, una vez seleccionado el contorno, en el menú principal se selecciona la ventana *Edit* → *Clear Outside* y automáticamente se elimina todo lo que este fuera de ese contorno.

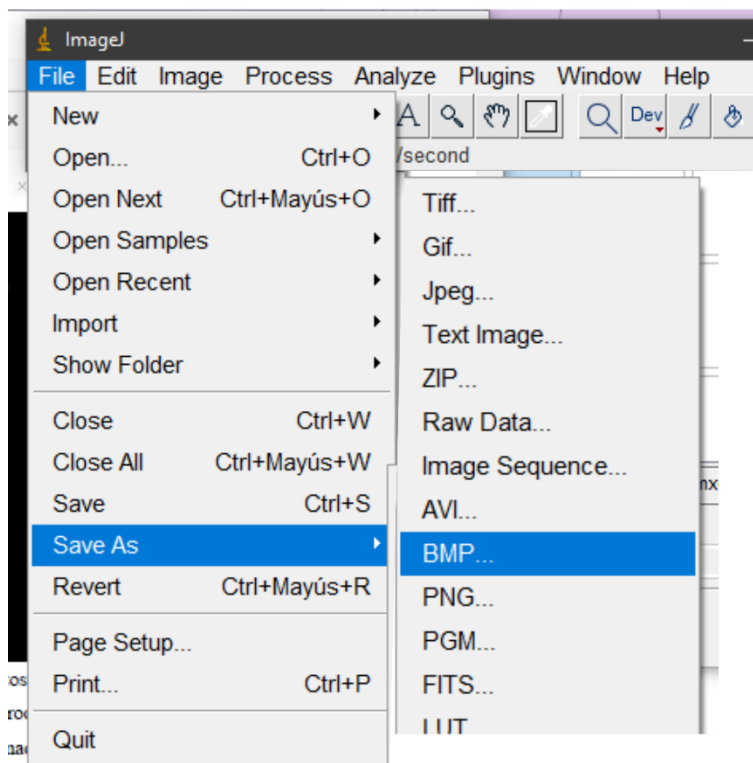


Figura A3.4. Una vez realizados los tres pasos anteriores, es recomendable guardar el proceso, ya que en el caso de querer volver a realizar el análisis ya no será necesario hacer el proceso desde el inicio. En el menú principal se selecciona la ventana *File* → *Save as* → *BMP*, posteriormente abrirá una ventana en donde se debe de

seleccionar la carpeta en la que se desea que se guarde el archivo, así como el nombre que este tendrá, finalmente, se da clic en aceptar.

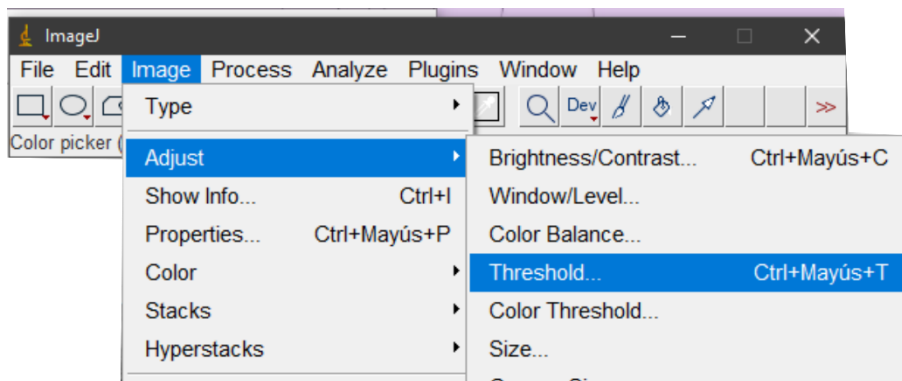


Figura A3.5. El siguiente paso consta de seleccionar las partículas a analizar. En la ventana de Image, se debe de seleccionar la opción *Adjust* → *Threshold*.

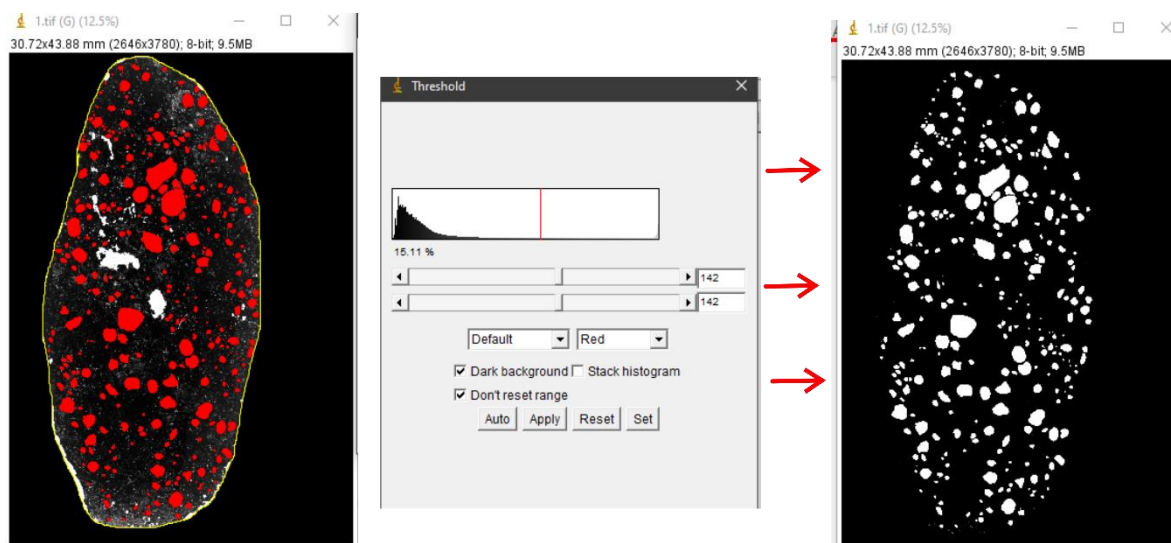


Figura A3.6. En la ventana de *Threshold* aparecerá una gráfica interactiva, en la que se ira seleccionando el umbral que se quiere seleccionar, una vez seleccionado se selecciona la opción *Apply* y quedará una imagen con las regiones de interés.

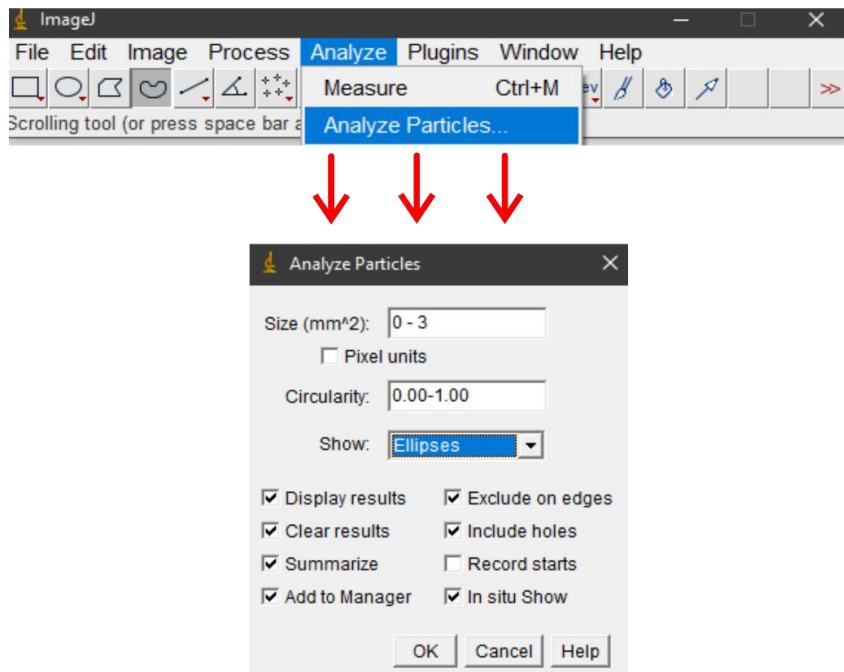


Figura A3.7. En la ventana Analyze se encuentra la opción *Analyze particles*, la cual abre una ventana en la que se deben colocar los parámetros de selección de partículas. Para poder determinar los valores del tamaño de interés se hizo un análisis de los tamaños propuestos en Friedrich et. al (2015), la mayoría de sus gráficas reportan como tamaño máximo 3 mm, en nuestro caso se analizaron tamaños desde 0 hasta 3 mm. En *Show* se selecciona la opción de *Ellipses*, para que las partículas sean mostradas de esta manera; los demás parámetros se dejan por *default*.

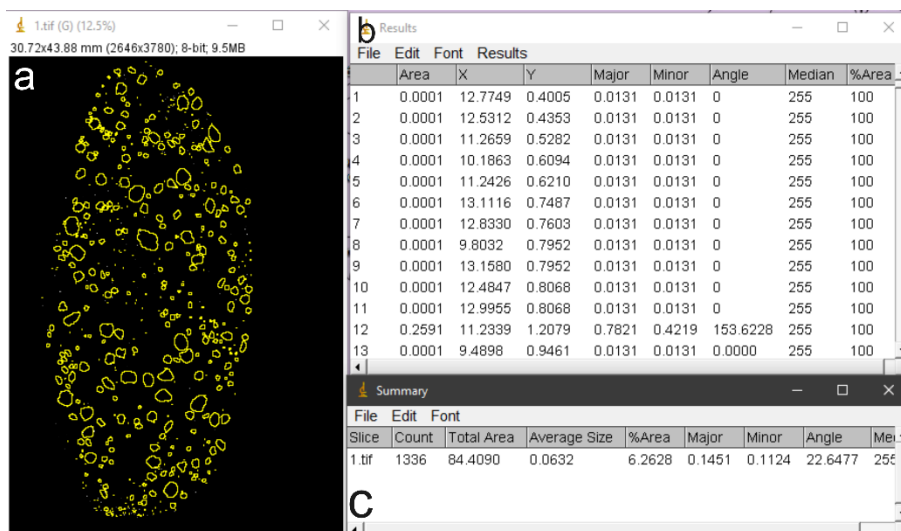


Figura A3.8. a) las elipses muestran todas las partículas encontradas a partir de los criterios dados; b) la ventana *Result* muestra las características de cada una de las partículas (eje mayor, eje menor, Angulo, área, etc.); c) la ventana *Summary* muestra toda la estadística del análisis.

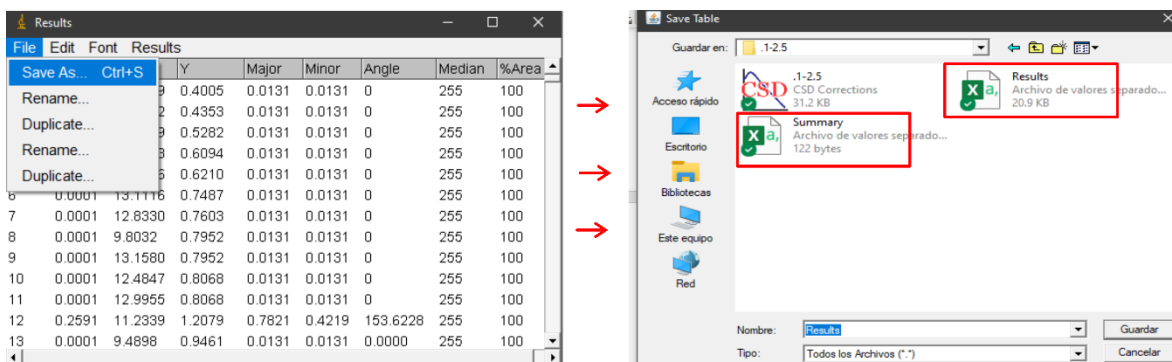


Figura A3.9. La ventana de *Results* y *Summary* deben ser guardadas, ya que a partir de aquí se realizará el análisis de tamaño. En *File* → *Save as* abrirá una ventaja donde debemos seleccionar la carpeta en la queremos que se guarde el archivo, así como el nombre de este. Estos archivos se almacenaras como archivos Excel.

### A3.2 CSD CORRECTIONS:

El software CSDCorreions 1.60 es un software creado por UQAC, para convertir datos de intersecciones bidimensionales recopilados de secciones delgadas, afloramientos, etc., en distribuciones de tamaño de cristal (CSD) tridimensionales verdaderas. Se puede descargar desde su página principal: <http://www.uqac.ca/mhiggins/csdcorrections.html> .

El programa construye un sólido de las dimensiones indicadas por las dimensiones corta, intermedia y larga. La orientación del sólido está restringida por la naturaleza de la fábrica (masivo, foliado o lineado), la calidad de la foliación (débil o fuerte) y la orientación de la sección deseada (paralela o normal a la fábrica).

CSDCorrections también puede recopilar y mostrar datos sobre orientaciones 2D de los cristales.

Los datos que serán ingresados al CSDCorrections, son los datos de Result y Summary obtenidos en el último paso de ImageJ.

Length	Width	Area	Angle	X-centre	Y-centre	Notes
Major	Minor	Area	Angle	X	Y	
7.73E-01	4.17E-01	2.53E-01	1.54E+02	1.11E+01	1.19E+00	
5.09E-01	4.28E-01	1.71E-01	1.78E+02	9.79E+00	1.27E+00	
4.45E-01	3.90E-01	1.36E-01	6.32E+00	1.37E+01	1.37E+00	
8.56E-01	7.00E-01	4.71E-01	6.36E+01	1.20E+01	2.01E+00	
1.02E+00	9.25E-01	7.41E-01	6.37E+01	1.01E+01	2.85E+00	
5.80E-01	3.47E-01	1.58E-01	9.25E+00	1.52E+01	2.56E+00	
5.78E-01	4.38E-01	1.99E-01	8.62E+01	1.65E+01	3.14E+00	
1.26E+00	1.01E+00	9.92E-01	9.13E+01	1.57E+01	4.15E+00	
1.12E+00	8.34E-01	7.32E-01	7.00E+01	1.70E+01	4.22E+00	
3.78E-01	3.57E-01	1.06E-01	1.04E+02	1.07E+01	4.28E+00	
7.60E-01	5.00E-01	2.99E-01	1.69E+02	8.98E+00	4.82E+00	
6.16E-01	4.71E-01	2.28E-01	1.61E+02	1.05E+01	5.17E+00	
5.37E-01	4.40E-01	1.85E-01	4.10E+01	1.30E+01	5.45E+00	
1.02E+00	8.30E-01	6.65E-01	4.98E+01	7.71E+00	6.05E+00	
4.50E-01	3.28E-01	1.16E-01	1.79E+01	7.14E+00	5.77E+00	
7.12E-01	5.35E-01	2.99E-01	7.15E+01	1.69E+01	6.06E+00	
7.35E-01	6.81E-01	3.93E-01	1.79E+02	1.01E+01	6.23E+00	
1.53E+00	9.33E-01	1.12E+00	1.13E+02	1.86E+01	7.00E+00	
5.35E-01	3.98E-01	1.68E-01	2.28E-01	1.25E+01	6.69E+00	
4.78E-01	4.28E-01	1.61E-01	1.75E+02	1.43E+01	7.05E+00	

Figura A3.10. Para poder colocar los datos en el CSDCorrections se deben reacomodar. El rectángulo rojo muestra el orden que presenta el software. *Length* y *Width* corresponde a los datos *Major* y *Minor*, respectivamente, obtenidos en ImageJ.

The screenshot shows the CSD Corrections software interface. The 'Calculate' button is highlighted in green. The 'Correct to phase abundance' section is highlighted in yellow, showing 'Volumetric phase abundance (%)' set to 5.8297. The 'Measured Area 1' field is highlighted in blue, showing 76.7093. A table of results is visible on the right, and a summary table is at the bottom.

Length	Width	Area	Angle	X-centre	Y-centre	Notes
1	7.73E-01	4.17E-01	2.53E-01	1.54E+02	1.11E+01	1.19E+00
2	5.09E-01	4.28E-01	1.71E-01	1.78E+02	9.79E+00	1.27E+00
3	4.45E-01	3.90E-01	1.36E-01	6.32E+00	1.37E+01	1.37E+00
4	8.56E-01	7.00E-01	4.71E-01	6.36E+01	1.20E+01	2.01E+00
5	1.02E+00	9.25E-01	7.41E-01	6.37E+01	1.01E+01	2.85E+00
6	5.80E-01	3.47E-01	1.58E-01	9.25E+00	1.52E+01	2.56E+00
7	5.78E-01	4.38E-01	1.99E-01	8.62E+01	1.65E+01	3.14E+00
8	1.26E+00	1.01E+00	9.92E-01	9.13E+01	1.57E+01	4.15E+00
9	1.12E+00	8.34E-01	7.32E-01	7.00E+01	1.70E+01	4.22E+00
10	3.78E-01	3.57E-01	1.06E-01	1.04E+02	1.07E+01	4.28E+00
11	7.60E-01	5.00E-01	2.99E-01	1.69E+02	8.98E+00	4.82E+00
12	6.16E-01	4.71E-01	2.28E-01	1.61E+02	1.05E+01	5.17E+00
13	5.37E-01	4.40E-01	1.85E-01	4.10E+01	1.30E+01	5.45E+00
14	1.02E+00	8.30E-01	6.65E-01	4.98E+01	7.71E+00	6.05E+00
15	4.50E-01	3.28E-01	1.16E-01	1.79E+01	7.14E+00	5.77E+00
16	7.12E-01	5.35E-01	2.99E-01	7.15E+01	1.69E+01	6.06E+00
17	7.35E-01	6.81E-01	3.93E-01	1.79E+02	1.01E+01	6.23E+00
18	1.53E+00	9.33E-01	1.12E+00	1.13E+02	1.86E+01	7.00E+00
19	5.35E-01	3.98E-01	1.68E-01	2.28E-01	1.25E+01	6.69E+00
20	4.78E-01	4.28E-01	1.61E-01	1.75E+02	1.43E+01	7.05E+00
21	1.12E+00	8.05E-01	7.06E-01	1.38E+02	1.31E+01	7.31E+00
22	5.15E-01	3.90E-01	1.58E-01	1.60E+01	1.57E+01	7.16E+00
23	5.34E-01	3.95E-01	1.66E-01	1.80E+02	8.72E+00	7.26E+00
24	5.27E-01	4.67E-01	1.93E-01	7.28E+01	1.23E+01	7.48E+00
25	1.25E+00	7.47E-01	7.31E-01	1.15E+02	1.80E+01	8.09E+00

Slice	Count	Total Area	Average Size	%Area	Major	Minor	Angle
humbra1.bm	197	76.7093	0.3894	5.8297	0.7493	0.5652	95.3768

Figura A3.11. Se muestra la pantalla principal de CSDCorrections. Aquí se asignarán los parámetros para realizar el análisis bidimensional. Los siguientes parámetros fueron iguales en todos los análisis: En Shape se buscan las formas que estén más parecidas a una esfera; en Fabric se selecciona la opción *Massive*; *Measurement* se selecciona la opción de *Ellipse Major axis*. *Measured Area 1* (rectángulo azul) y *Correct to phase abundance* (rectángulo amarillo) corresponden a los datos de *Total area* y *%Area*, respectivamente, obtenidos en la ventana de *Summary* de ImageJ. Una vez ingresados todos los parámetros se realiza el análisis dando clic en *Calculate* (rectángulo verde).

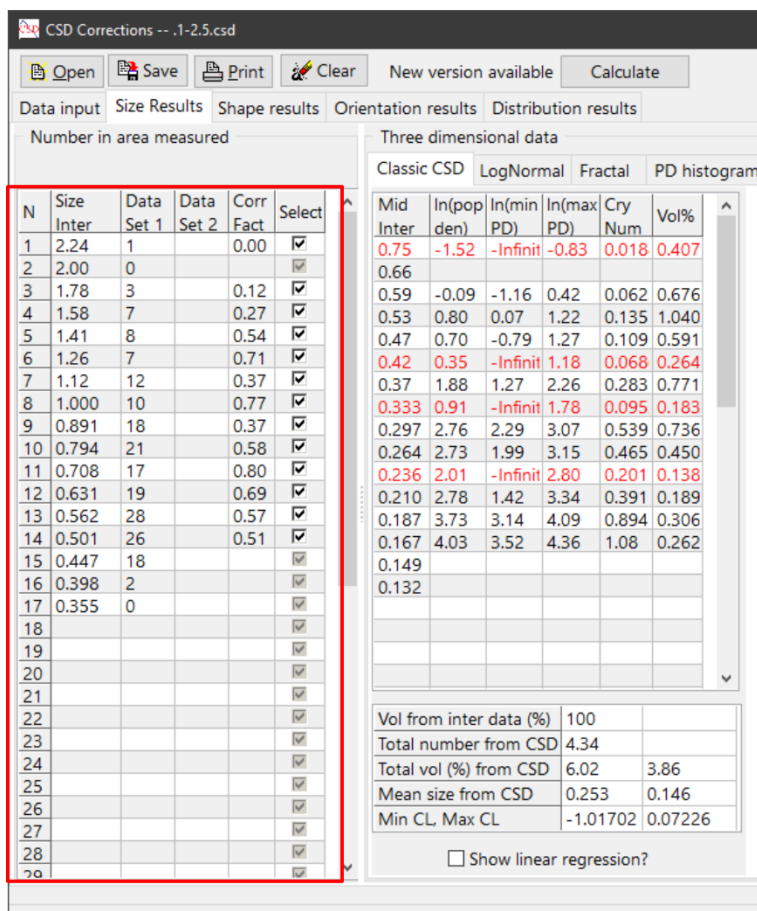


Figura A3.12. En la ventana de *Size Results*, los datos que necesitamos son lo que se presentan en el rectángulo rojo, con mayor precisión la primera y segunda columna de esta. *Size inter* corresponde al tamaño dado en milímetro y *Data Set 1* corresponde a la densidad de población, estas columnas son las que servirán para realizar las gráficas antes presentadas en la sección de Descripción petrográfica de las condritas estudiadas.

### A3.3 Blob3D (Análisis 3D):

Blob3D es un software escrito en Lenguaje de datos interactivo (*IDL*, por sus siglas en inglés), creado por la Universidad de Texas. *IDL* es un lenguaje interpretado que se puede ejecutar tanto en Windows, Mac Os X, Linux y Unix. Se puede descargar desde el siguiente enlace: <http://www.ctlab.geo.utexas.edu/software/blob3d/>.

Es un programa diseñado para procesar grandes conjuntos de datos tridimensionales, producidos por tomografía computarizada (CT), y para extraer información sobre las características y objetos discretos dentro de un conjunto de datos. Está diseñado para una definición, separación y medición eficiente y rigurosa de cientos a decenas de miles de objetos distintos e irregulares de un volumen de datos. Como se mencionó en secciones

anteriores, la unidad de medida del análisis 3D es el vóxel (*volumetric pixel*) el cual es el equivalente a un pixel en 3D. Un conjunto de vóxel forman volúmenes, por lo tanto, estos pueden representar minerales, vesículas, poros, etc. El programa cuantifica los vóxel que conforman los objetos que se están analizando (Suazo Cruz, 2020). El análisis de datos se divide en tres pasos: segmentación, separación y extracción.

- Segmentación: el conjunto de datos se analiza para determinar que vóxeles pertenecen a un componente en particular. En este paso, se incluyen filtros para reducir el ruido y la mejora de bordes. La segmentación real se realiza mediante umbrales o seleccionando un rango de escala de grises de vóxel para representar o abarcar las fases de interés.
- Separación: en ocasiones los componentes se encuentran unidos, sin importar, que presenten distintos valores de vóxel. En este paso se implementa la función de permitir separar a todos estos componentes que se encuentran interconectados, para poder medir sus propiedades físicas de forma individual.
- Extracción: finalmente, es posible extraer los datos para determinar algunos parámetros.

A continuación, se dará un pequeño tutorial del funcionamiento de Blob3D.

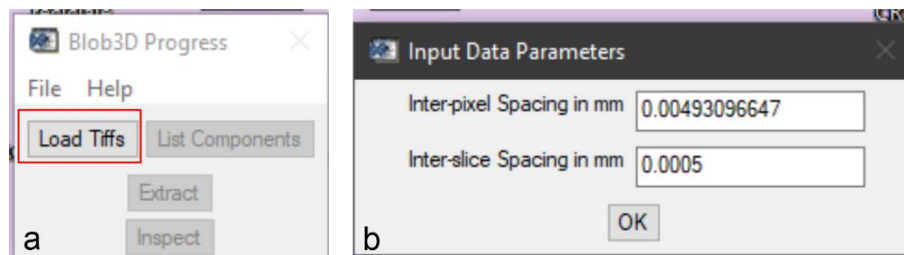


Figura A3.13. a) Load Tiffs abre una ventana en la cual se tendrá que seleccionar la carpeta con las imágenes de tomografía en formato .tiff; b) posteriormente se abrirá la ventana *Input Data Parameters*.

El espacio entre pixeles (*inter – pixel*) representa la distancia de centro a centro de los pixeles en las imágenes de exploración individuales, se calcula dividiendo el campo de visión de las imágenes CT entre la dimensión del pixel.

El espacio entre los segmentos (*inter – slice*) representa el espacio entre cortes, la distancia de centro a centro entre cortes.



Estos datos se pueden obtener al consultar el documento de las condiciones de escaneo o preguntando al técnico del CT. Una vez colocados los valores, se cargan las imágenes al software.

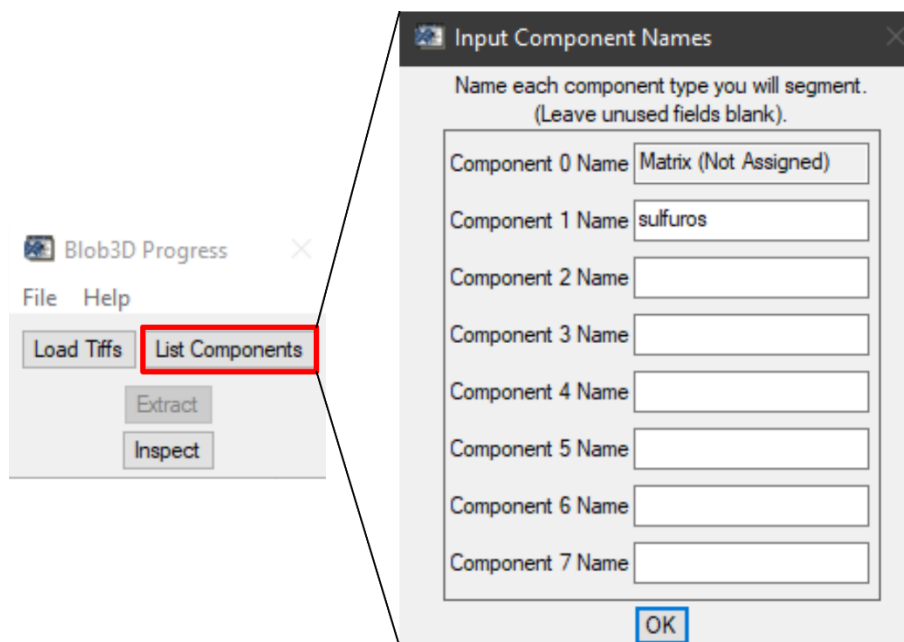


Figura A3.14. Una vez ingresadas las imágenes se activa el botón de *List Components*, en donde se deben escribir manualmente los componentes que se quieren analizar, en este caso, los sulfuros, la matriz se analizará de manera automática.

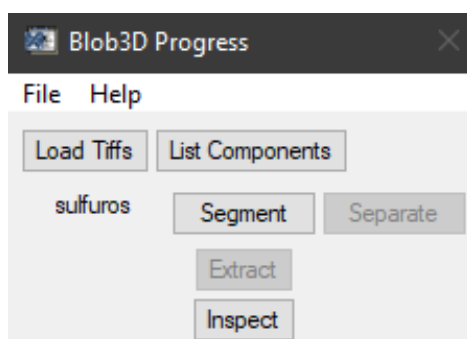


Figura A3.15. A continuación, aparecerán los componentes seguidos de las opciones de los tres pasos antes mencionados, estos botones se irán activando conforme el proceso vaya avanzando.

## Segmentación

En este paso se identifican todos los vóxel, en qué conjunto de estos se encuentra cada componente. Para ayudar con la identificación se emplean una serie de filtros:

- *Grayscale to grayscale*: estos filtros toman datos de escala de grises como entrada y producen datos de escala de grises como salida. Se usan para la reducción de ruido, contraste de los bordes de las figuras y ajuste de brillo / contraste, con el objetivo de que el componente sea más claro y fácilmente distinguible.
- *Grayscale to binary*: se toman datos de escala de grises como entrada y producen datos binarios de salida.
- *Binary to binary*: estos filtros se realizan para una “limpieza” final de los datos, como extracción o eliminación de datos que se encuentran en las orillas.

El único requisito para concretar este paso es que los datos finales, deben ser datos binarios.

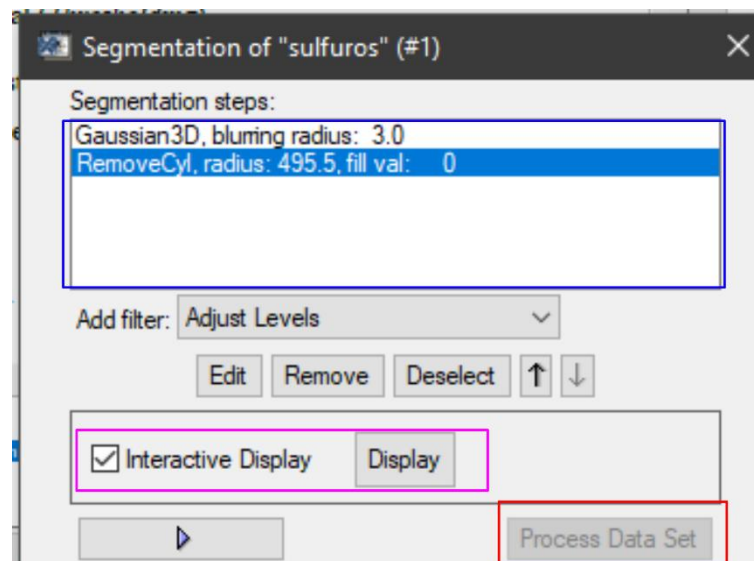


Figura A3.16. Ventana de segmentación. En el rectángulo azul se enlistarán todos los filtros que se utilizarán, en la manera en la estén posicionados es la manera que serán ejecutados. *Add filter* se mostrarán todos los filtros que se pueden utilizar. *Edit* permite volver a editar los datos ingresados en cada filtro; *Remove* permite eliminar un filtro; *Deselect* ayuda a deseleccionar un filtro; las flechas permiten desplazar cualquier filtro en la lista. El rectángulo rosa permite visualizar los filtros empleados en el paquete de imágenes CT, si se selecciona la opción *Interactive Display* los cambios se mostrarán de manera automática sin necesidad de completar el proceso. Finalmente, *Process Data Set* (rectángulo rojo) se activará una vez que los datos de salida sean en formato binario.

Si desea tener más información de los filtros que se aplican en este software, puede consultar el manual en las páginas 14 – 19.

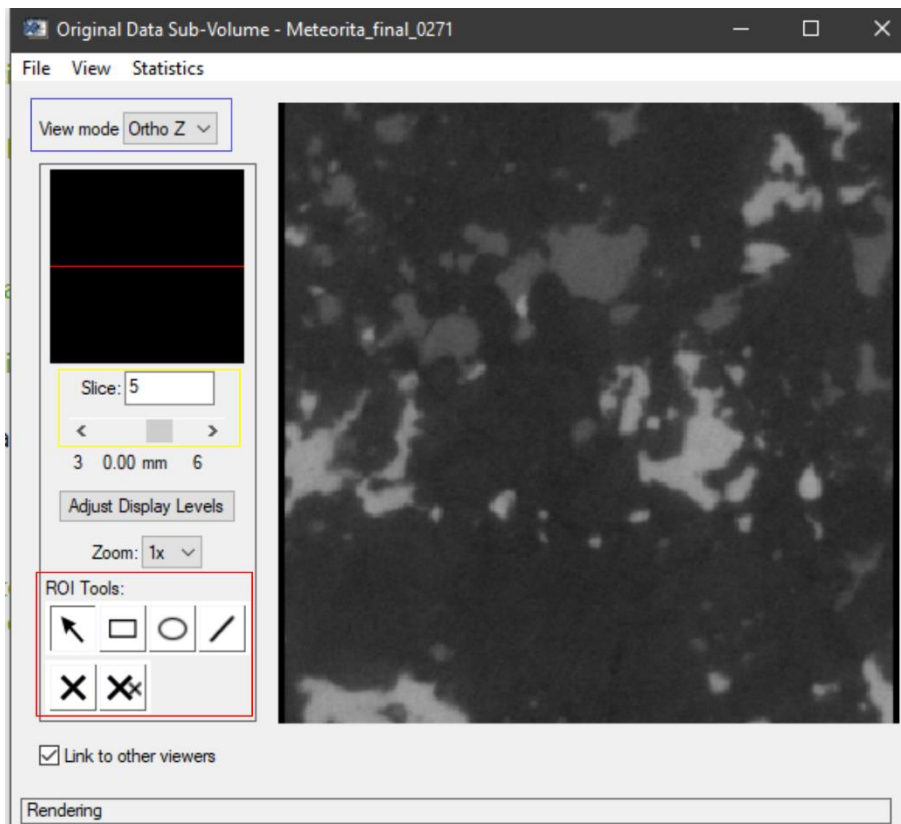


Figura A3.17. Ventana *Display*. Esta ventana nos permite visualizar los cambios que se van realizando. *View Mode* (rectángulo azul) permite visualizar la imagen en los distintos ejes (x, y, z); *Slice* (rectángulo amarillo) nos permite visualizar el objeto de interés a lo largo de las diferentes imágenes que se analizan; *ROI Tools* son herramientas que ayudan a identificar los objetos de interés.

### Separación

En este paso, el software identifica grupos tridimensionales de vóxel, que se encuentran conectados o que comparten valores, los cuales son evaluados manualmente por el usuario. Cuando se presentan varios *blobs*, estos pueden separarse (*sub-blobs*) mediante varias herramientas. En este paso es fundamental tener información acerca de cada *blob*.

El botón de separación se activará automáticamente una vez que se haya completado el paso de segmentación.

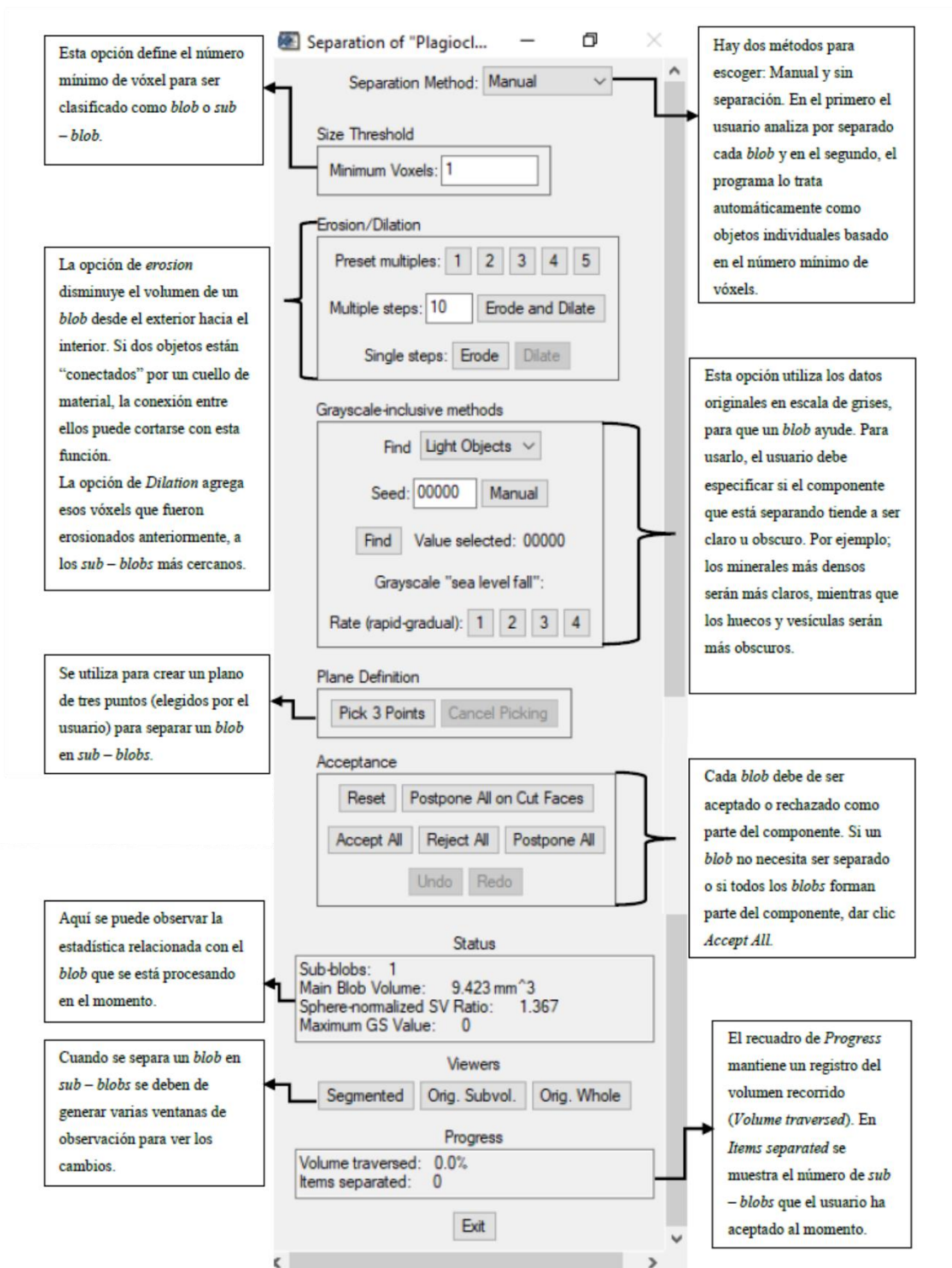


Figura A3.18. Para mayor detalle de casa una de las opciones puede consultar el manual en la página. Imagen tomada de (Suazo Cruz, 2020).

## Extracción

Ese modulo se activa una vez terminado el paso de separación. En este paso tiene como objetivo realizar los cálculos de la información deseada. Se puede calcular para uno de los componentes o para varios.

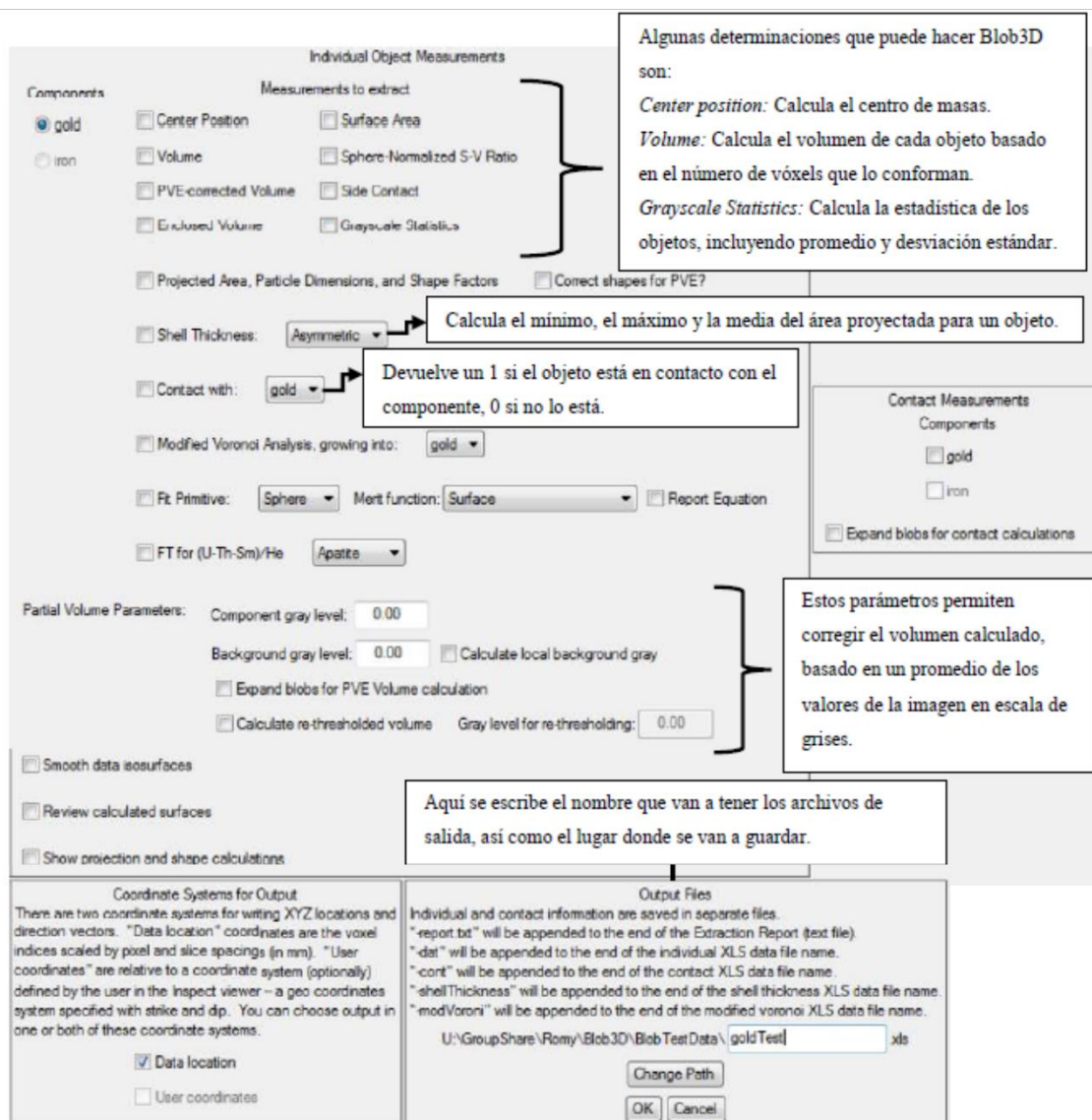


Figura A3.19. Para obtener más información de cada una de las opciones se recomienda consultar el manual en la página 31. Imagen tomada de (Suazo Cruz, 2020).

# Referencias

- Connolly, H. C., & Desch, S. J. (2004). *On the origin of the “kleine Kügelchen” called Chondrules*. 64, 95–125. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2003.12.001>
- Connolly, H. C., & Jones, R. H. (2016). Chondrules: the canonical and noncanonical views. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 121, 1885–1899. <https://doi.org/10.1038/175238c0>
- 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*, 16(1), 17–43. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.1981.tb00183.x>
- Hanna, R. D., & Ketcham, R. A. (2017). X-ray computed tomography of planetary materials: A primer and review of recent studies. *Chemie Der Erde*, 77(4), 547–572. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2017.01.006>
- Holland, H. D., & Turekian, K. K. (2014). *Treatise on Geochemistry: Second Edition* (Second edi, Vol. 2). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00102-9>
- Keil, K. (1962). On the phase composition of Meteorites. *Journal of Geophysical Research*, 67(10), 4055–4061.
- Krot, A. N., Keil, K., Scott, E. R. D., Goodrich, C. A., & Weisberg, M. K. (2013). Classification of Meteorites and Their Genetic Relationships. In *Treatise on Geochemistry: Second Edition* (Vol. 1, pp. 1–63). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00102-9>
- Lauretta, D. S., Nagahara, H., & Alexander, C. (2006). Petrology and origin of ferromagnesian silicate chondrules. *Meteorites and the Early Solar System II*, (January 2006), 431–459. Retrieved from <http://www.lpi.usra.edu/books/MESSII/9026.pdf>
- McSween, H. Y. (1977). On the nature and origin of isolated olivine grains in carbonaceous chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 41(3). [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(77\)90269-1](https://doi.org/10.1016/0016-7037(77)90269-1)
- Michel-Lévy, C.-M. (1968). Un chondre exceptionnel dans la météorite de Vigarano. *Bulletin de La Société Française de Minéralogie et de Cristallographie*, 91(2), 212–214. <https://doi.org/10.3406/bulmi.1968.6215>
- Moggi Cecchi, V., Pratesi, G., & Salvadori, A. (2006). Size and textural type distributions of chondrules in three new carbonaceous chondrites: Acfer 374, HaH 337 and Acfer 366. *Periodico Di Mineralogia*, 75(2–3), 217–232.
- Muñoz - Espadas, M. J. (2003). *Mineralogía , Texturas y Cosmoquímica de Cóndrulos en Condritas H4 , H5 , L5 y LL5*. Universidad Complutense de Madrid.
- Renau-Piqueras, J., & Faura, M. (1994). Principios básicos del Microscopio Electrónico de Barrido. *Centro de Investigación Hospital “La Fé,”* 73–92.
- Ribadeneira, D. E. (1998). *Microscopía Electrónica : Fundamentos , Teoría y Aplicaciones*. Escuela Politécnica Nacional.

- Rubin, A. E., & 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*, 51.
- Sears, D. W. G. (2004). *The origin of chondrules and chondrites*. New York: Cambridge University Press.
- Sears, D. W. G., Jie, L., Benoit, P. H., Dehart, J. M., & Lofgren, G. E. (1992). A compositional classification scheme for meteoritic chondrules. *Nature*, 357(6375), 207–210. <https://doi.org/10.1038/357207a0>
- Simon, J. I., Cuzzi, J. N., McCain, K. A., Cato, M. J., Christoffersen, P. A., Fisher, K. R., ... Scargle, J. D. (2018). Particle size distributions in chondritic meteorites: Evidence for pre-planetesimal histories. *Earth and Planetary Science Letters*, 494, 69–82. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.04.021>
- Suazo Cruz, G. (2020). *Análisis geoquímico, geocronológico y estereológico de la porción NE del plutón paleógeno de Arteaga, Michoacán y su interpretación geológica*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Szurgot, M., & Krzysztow, P. (2007). *Microscopic Investigations of gold basin and el hammami chondrites*. 28, 79–94.
- Tormo - Cifuentes, L. (2013). *Estudio de Meteoritos Singulares por Técnicas Espectroscópicas y Luminiscencia no Destructiva*. Universidad Autónoma de Madrid.
- Trigo - Rodríguez, J. M., & Martínez - Jiménez, M. (2013). Las condritas y sus componentes primigenios. *Enseñanza de Las Ciencias de La Tierra*, 21(3), 263–272.
- Ulloa - Gonzalez, B. (2017). *Clasificación y Caracterización del grado de metamorfismo de choque de tres condritos ordinarios del desierto de Atacama J3109, J657 y J302*. Universidad de Concepción.
- Vega, S., Carrasco - Núñez, G., Arteaga Martínez, D., Cid-luna, H. E., & Manea C., V. (2018). Microtomografía de rayos X: preparación de muestras de rocas para una mejor visualización y caracterización del espacio poroso. *NTHE*, (July), 25–32.



