

## ESTUDIO MINERALOGICO DE LA METEORITA PACULA POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

Ángeles, S.<sup>1\*</sup>, Reyes, A. M.<sup>1</sup>, Macías, C.<sup>1</sup>, Ortega, F.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Apartado Postal 70-296, Cd. Universitaria 04510 México, D.F. México,

\*Corresponding author: [ags@servidor.unam.mx](mailto:ags@servidor.unam.mx)

Recibido: Octubre 2009. Aprobado: Diciembre 2009.

Publicado: Enero 2010.

### RESUMEN

Pácula es una meteorita pétreca caída en el estado de Hidalgo, México en 1881. Los estudios mineralógicos por medio de microsonda electrónica confirman su clasificación como condrita ordinaria clase L tipo 6. Los criterios petrográficos que indican un estado de choque S4 incluyen la presencia de vetillas de cromita, mosaicismo y extinción ondulante del olivino, asociaciones cromita-plagioclasa, presencia de Cu metálico y nódulos de troilita. Los minerales principales que la constituyen son: olivino, piroxena, feldespato, hierro-níquel diseminado (kamacita y taenita), troilita, cromita y en cantidades menores merrilita y whitlockita. Los silicatos forman una masa cristalina extremadamente fracturada. Abundan bolsas y vetillas de materiales fundidos, principalmente opacos. Los condros no se aprecian con facilidad, ya que su integración con la matriz es extrema y sus contornos son difusos. El feldespato se presenta en masas de hasta 2 mm de diámetro y su composición corresponde aproximadamente a la oligoclasa. Las piroxenas son ortopiroxena (enstatita) y piroxena rica en calcio (diopsida)

**Palabras clave:** meteorita, condrita L6, MEB, minerales silicatos, metales.

### MINERALOGY OF THE PACULA METEORITE BY ELECTRON MICROPROBE ANALYSIS

#### ABSTRACT

Pacula is a rocky meteorite that was observed to fall on 1881 in the State of Hidalgo, Microprobe mineral studies confirmed its classification as an ordinary chondrite, class L and type 6. Petrographic criteria that indicate a shock stage S4 include: the presence of chromite veins, mosaicism and undulose extinction in olivine, chromite-plagioclase associations, metallic copper, and troilite nodules. The principal constituent minerals are: olivine, pyroxene, feldspar, disseminated iron-nickel metal (kamacite and taenite), troilite, chromite, and in minor amounts merrillite and whitlockite. Most silicates form extremely fractured crystalline masses. Fusion materials, particularly opaque phases, are common as pockets and veins. Chondrules are difficult to distinguish because they appear integrated to the matrix, and their rims are rather diffuse. Feldspar is present in masses up to 2 mm in size and its composition corresponds approximately to oligoclase. Pyroxenes are enstatite and diopside orthopyroxene and Ca-rich pyroxenes.

**Keywords:** meteorite, chondrite L6, MEB, silicate minerals, metals

#### INTRODUCCIÓN

Las meteoritas son rocas que caen a la Tierra procedentes del espacio interplanetario y su estudio tiene gran relevancia para el conocimiento de la historia temprana del Sistema Solar. La meteorita Pácula cayó a 4.5 km al oeste del poblado de Pácula, distrito de Jacala, en el Estado de Hidalgo, México (21°03' N, 99°18' W) el 18 de junio de 1881. Se recuperaron tres fragmentos cuyo peso total fue de 3,361 g. El mayor, de 1,505 g forma parte de la colección de meteoritas del Instituto de Geología,

UNAM [1]. Mason, en 1963 [2] mediante técnicas de microscopía óptica y difracción de rayos X, clasificó a Pácula, como una condrita clase química L tipo 6 [3]. En este trabajo se determinó la composición química de los minerales que la constituyen, se confirma su clasificación, y se detalla su petrografía caracterizando sus propiedades microestructurales. Para el estudio de esta meteorita se utilizó en este trabajo un microscopio electrónico de barrido acoplado con EDS y WDS marca JEOL JSA-8900R.

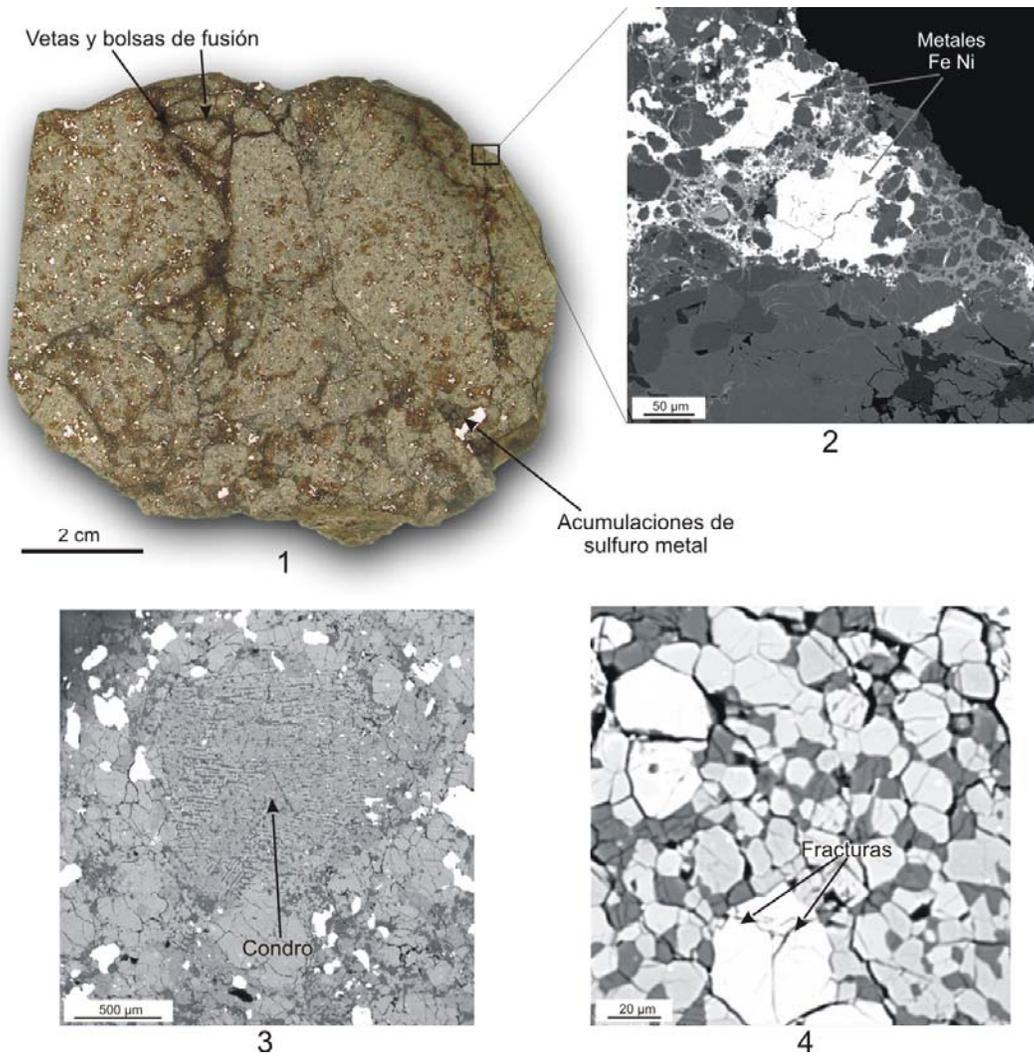
## MATERIALES Y MÉTODOS

Se estudiaron dos secciones delgadas pulidas de la meteorita por Microscopía electrónica utilizando la microsonda del Instituto de Geofísica -Laboratorio Universitario de Petrología (LUP) JEOL JSA-8900R equipada con espectrómetro de energía dispersiva (EDS) marca NORAN, con un detector de Si(Li) operada a 20 Kv y 20nA y con un método de corrección ZAF. Los análisis químicos cuantitativos se realizaron con cuatro espectrómetros de longitud de onda (PETJ, LIF, TAP, LDEC) utilizando estándares de minerales naturales y algunos metales puros. Se obtuvieron imágenes de composición con electrones retrodispersados para observar las microestructuras y mineralogía de la meteorita.

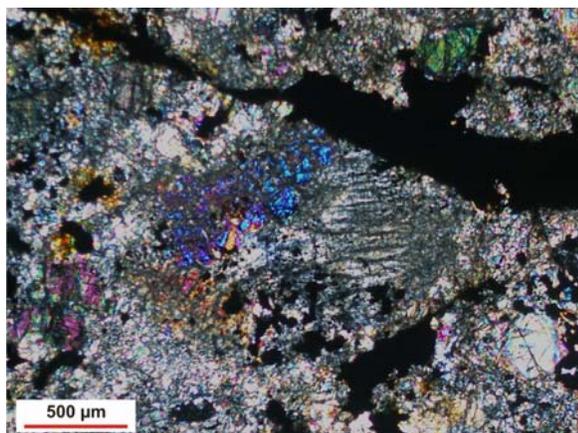
Se utilizó un microscopio petrográfico Leica modelo DM LP con una cámara Olympus DP20, usando luz transmitida plana y polarizada y con técnicas de microscopía electrónica utilizando una microsonda JEOL JSA-8900R equipada con un espectrómetro de energía dispersiva (EDS) marca NORAN, con un cristal detector de Si(Li) operada a 20 kV y 20 nA y con un método de corrección ZAF. Los análisis químicos cuantitativos se realizaron con cuatro espectrómetros de longitud de onda (PETJ, LIF, TAP, LDEC) utilizando estándares de minerales naturales y algunos metales puros. Se obtuvieron imágenes de composición con electrones retrodispersados para observar las microestructuras y mineralogía de la meteorita.

## RESULTADOS Y DISCUSION

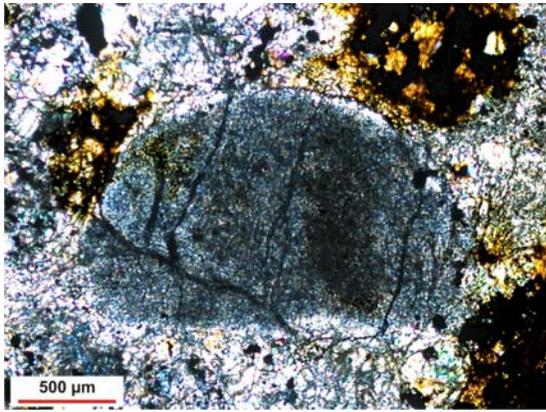
**Petrografía.** Se le caracteriza como una roca de color claro verdoso con una textura brechada que se observa mejor en la muestra de mano, con clastos subangulares a subredondeados, cristalizados, muy fracturados y con gran cantidad de bolsas y vetas de material fundido, las cuales contienen abundantes metales de hierro-níquel, que cortan y rodean a los clastos (Figuras 1-4). Los condros (estructuras esferoidales ígneas que caracterizan a este tipo de meteoritas) se encuentran en los clastos, pero son apenas detectables pues sus contornos son bastantes difusos, lo que puede interpretarse como una posible fusión incipiente de la matriz con los componentes cristalizados de la roca y como resultado del metamorfismo térmico típico de una meteorita tipo 6 (Figura 3). Los condros se encuentran enteros o como fragmentos, la gran mayoría muestra bordes recristalizados entre 50 y 150  $\mu\text{m}$  de ancho formados por silicatos o por la fase opaca; su tamaño varía entre 1 y 3 mm. Los condros de tipo BO, barrados de olivino, son los más comunes, los radiales de piroxena, PR, ocasionalmente se observan como fragmentos (Figura 6).



**Fig. 1-4.** 1. Fragmento de la meteorita Pácula, se observan clastos, vetas de material fundido y acumulaciones de sulfuros-metal (nódulos); 2. Veta de fusión metales y silicatos. 3. Condro tipo BO con límites muy difusos; 4. Clasto cristalino mostrando fracturamiento, los olivinos se observan de color mas claro, piroxenas en color gris medio y plagioclasas en gris oscuro.



**Fig. 5.** Imagen con microscopio petrográfico, muestra al centro un condro de olivino cortado por una veta de metal-sulfuro, los cristales de olivino que forman el condro presentan gran cantidad de fracturas rellenas con minerales opacos.



**Fig. 6.** Imagen con microscopio petrográfico, muestra al centro un condro y a la derecha asociación cromita-plagioclasa, también se observa un olivino con textura de mosaico.

Las vetas y vetillas en ciertas zonas de las láminas delgadas forman una malla irregular que imparte a la roca una estructura cataclástica, o bien varias cruzan en forma paralela toda la lámina y tienen una anchura entre 20 y 650 μm.

**Silicatos.** El mineral más abundante que se observó es el olivino  $(Mg,Fe)_2SiO_4$ , mineral ortorrómbico que se encuentra en solución sólida entre las fases extremas forsterita (Fo)  $Mg_2SiO_4$  y fayalita (Fa)  $Fe_2SiO_4$ ; otro de los minerales abundantes es la enstatita  $(Fe,Mg)SiO_3$ , estos dos minerales son los componentes principales tanto en condros como en matriz. Además están presentes en los clastos con textura granular, los cuáles también están afectados por un fracturamiento intenso (Figura 4). La composición promedio del olivino es  $Fa_{24.696}$  seguido de enstatita  $Fs_{22.033}Wo_{1.15}$  así como de la piroxena rica en Ca,  $Fs_{8.3}Wo_{43.679}$ . El feldespato representado por la plagioclasa  $Na[AlSi_3O_8]-Ca[Al_2Si_2O_8]$  se presenta en masas relativamente grandes de hasta 2 mm de diámetro, y su composición corresponde a la de oligoclasa ( $Ab_{83.14}Or_{7.2}$ ). Las composiciones de los silicatos en Pácula (Tabla 1), corresponden a los de las condritas de la clase L [3]

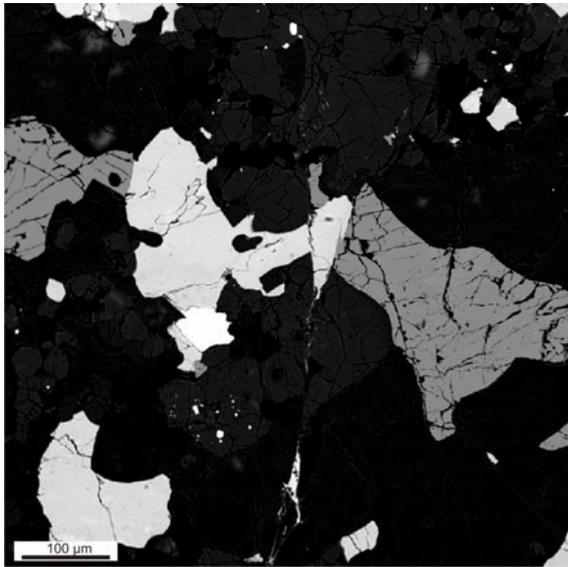
**Fosfatos.** Se encontraron dos fosfatos, merrillita y whitlockita que se presentan conjuntamente. Son de forma anhedral y de gran tamaño (150 μm hasta 2 mm).

**Minerales opacos.** Los minerales opacos se encuentran en menor cantidad que los silicatos, estos son: metales de hierro-níquel (kamacita y taenita); un sulfuro representado por troilita (FeS) y cromita  $(Fe,Mg)Cr_2O_4$ . Suelen observarse cercanos entre sí formando nódulos milimétricos (Figura 1) diseminados entre los silicatos; también se les encuentra formando las vetas y bolsas de fusión. (Figura 2). El tamaño de los minerales opacos es muy variable como puede apreciarse en la Figura 8. Los granos más pequeños de 20-100 μm y los mayores de 500 hasta 1000 μm.

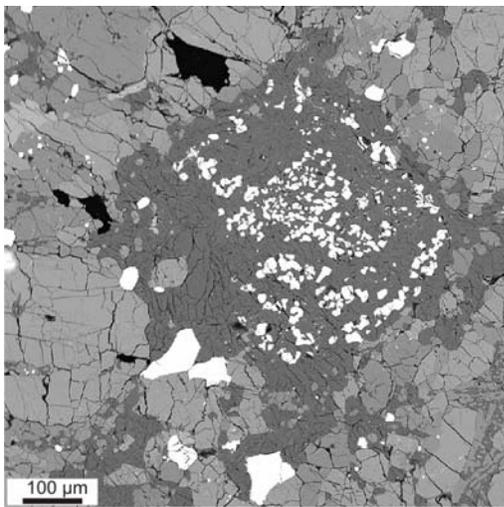
La troilita es el único sulfuro identificado, se encuentra diseminado y también formando junto con metales nódulos o acumulaciones milimétricas (Figura 1).

Los metales característicos en esta meteorita son kamacita y taenita, algunos granos parecen homogéneos pero otros muestran intercrecimientos complejos.

La cromita se encuentra generalmente asociada a metales y sulfuros (Figura 7) y presenta tres diferentes texturas: 1) granos individuales de alrededor de 100 μm en tamaño; 2) en grupos de granos muy pequeños (10 μm) dentro de vidrio con composición de plagioclasa, asociación llamada CPA, que ha sido ampliamente estudiada y reportada en otras condritas ordinarias (Figura 8) y es característica de meteoritas que han sufrido choque de grado al menos de S3 [4] y 3) vetillas finas dentro de olivinos (Figura 9) que son también un indicador de choque metamórfico e indican temperaturas muy altas de formación.



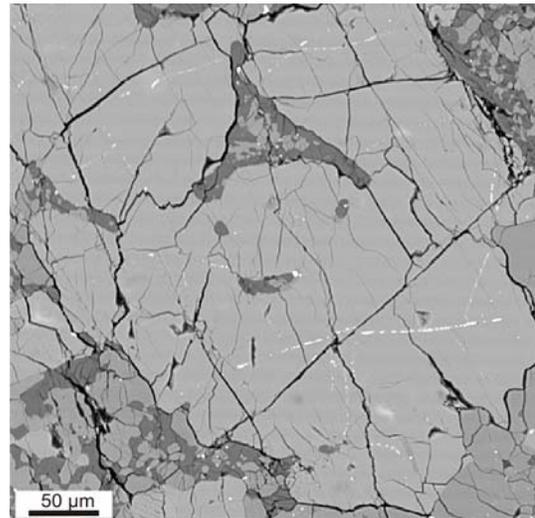
**Fig. 7.** Imagen de microscopio electrónico con electrones retrodispersados. Grandes granos de cromita (<100 µm) muy fracturados (de color gris oscuro); gris claro corresponde a troilita y blanco a kamacita.



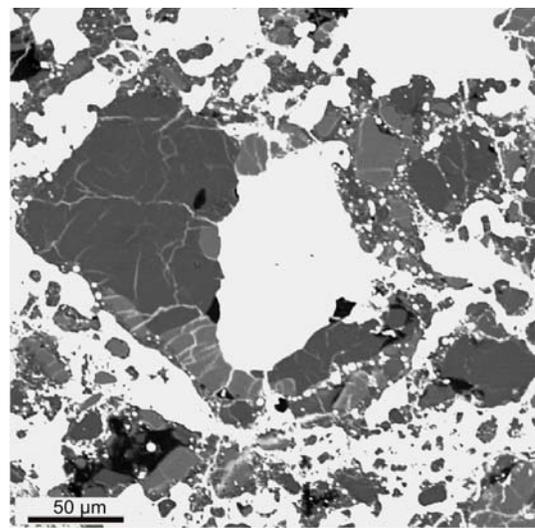
**Fig. 8.** Imagen de microscopio electrónico con electrones retrodispersados. Al centro, conjunto cromita-plagioclasa (pequeños cristales de cromita embebidos en material de composición plagioclasa).

**Efectos de choque.** La meteorita Pácula presenta características de choque de impacto tales como vetas de material fundido que cortan a los clastos (figura 2, 10); estas vetas están constituidas por silicatos y en mayor parte por metales, sulfuros y cromita. Son abundantes las vetillas de metales y cromita que atraviesan silicatos, así como las asociaciones de cromita-plagioclasa (CPA). Los olivinos presentan extinción ondulante, mosaicismo

intenso y abundantes fracturas irregulares y planares; la plagioclasa no fue transformada a maskelinita, por lo que corresponde cuando más a un grado S4 de acuerdo con la clasificación para meteoritas chocadas de Stöffler et al.[5].



**Fig. 9.** Imagen de microscopio electrónico con electrones retrodispersados. Finas vetillas de cromita (blanco) dentro de cristales de olivino.



**Fig. 10.** Imagen con microscopio electrónico con electrones retrodispersados donde se muestra el interior de una bolsa de fusión. Se observan piroxenas y olivinos muy fracturados en gris oscuro y gris claro respectivamente, las fracturas rellenas de metales y sulfuros. Se observa la abundancia de minerales opacos, metales y sulfuros (en color blanco)

**Tabla 1.** Análisis representativos cuantitativos obtenidos por WDS (% en peso) de las principales fases silicatadas en la meteorita Pácula.

	Olivino	Enstatita	Diopsida	Plagioclasa	Cromita
Óxidos					
SiO <sub>2</sub>	38.40	56.42	54.39	67.59	0.16
TiO <sub>2</sub>	0	0.15	0.40	0.0	2.20
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.15	0.80	0.50	19.80	6.95
FeO	22.38	14.34	5.03	0.51	30.74
MgO	38.28	28.05	16.33	0.01	2.40
CaO	0.17	0.58	20.70	0	0
Na <sub>2</sub> O	0	0.57	0.63	9.30	nd
K <sub>2</sub> O	0	0.1	0	1.28	nd
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	nd	nd	nd	nd	57.50
Total	99.89	101.08	99.15	100.67	100.60
	%Fo 75.30	%En 76.82	%En 48.03	%An 10.05	100Mg/Mg+Fe <sup>2+</sup> =12.26
	%Fa 24.70	%Fs 22.03	%Fs 8.30	%Ab 82.49	Fe <sup>2+</sup> /Mg+Fe <sup>2+</sup> =0.88
		%Wo 1.15	%Wo 43.38	%Or 7.46	Fe+Mn/Fe+Mn+M=0.88

**CONCLUSIONES**

Basados en los análisis por microsonda electrónica de barrido y por las observaciones por microscopía óptica de los minerales olivino (Fo, Fa), enstatita, plagioclasa (An, Ab) y cromita, Pácula corresponde a una meteorita clase L, y por las características petrográficas como matriz recristalizada, contornos difusos de los condros y plagioclasas de gran tamaño corresponde al tipo petrológico 6.

Los indicadores de choque en esta meteorita, que incluyen vetillas de cromita en olivinos, asociaciones de cromita-plagioclasa, vetas de metal-sulfuro, intercrecimiento de granos de metal-sulfuro, grandes nódulos de troilita, fracturamiento intenso en todos los componentes, y extinción ondulante y mosaicismo en los olivinos, señalan un estado de por lo menos S4.

**AGRADECIMIENTOS**

Los autores agradecen a Carlos Linares por la asesoría y facilidades prestadas durante el uso de la Microsonda del LUP y a Karina Cervantes por sus valiosas aportaciones.

**REFERENCIAS**

[1] Sánchez-Rubio, G (2001) “Las Meteoritas de México, Catálogo” UNAM 1-85.

[2] Mason B., (1963) “Olivine composition in chondrites”. *Geochim. Cosmochim. Acta* **27**, 1011-1024.

[3] Van Schmus R. W., Wood J. A. (1967) “A chemical-petrologic classification for the chondritic meteorites”. *Geochim. Cosmochim Acta* **31**, 747-765.

[4] Rubin A. (2003) “Chromite-plagioclase assemblages as a new shock indicator: Implications for impact

heating of ordinary chondrites”. *Geochim. Cosmochim. Acta* **66**: 3327-3337.

- [5] Stöffler D., Keil K., Scott E. (1991) “Schock metamorphism of ordinary chondrites” *Geochim. Cosmochim. Acta* **55**, 3845-3867.