



**NUEVAS TEXTURAS Y MINERALES EN LA
METEORITA SILAO (CUARTAPARTE),
CONDRIITA H5: PRODUCTO DE
METAMORFISMO DE IMPACTO S4**

<http://www.revista.unam.mx/vol.16/num6/art45/>

*Margarita Reyes (Responsable del laboratorio de Microscopía electrónica y
microanálisis del Instituto de Geología, UNAM)*

*Consuelo Macías (Técnico Académico Titular B de T. C. en el Depto. de
Geoquímica del Instituto de Geología, UNAM)*

Fernando Ortega (Investigador emérito del Instituto de Geología, UNAM)

Leticia Alba (Técnica Académica Titular del Instituto de Geología, UNAM)

*Octavio Reyes (Profesor de Carrera y Titular de T. C. en la Facultad de
Química de la UNAM)*

NUEVAS TEXTURAS Y MINERALES EN LA METEORITA SILAO (CUARTAPARTE), CONDRITA H5: PRODUCTO DE METAMORFISMO DE IMPACTO S4

Resumen

La meteorita Silao es una condrita ordinaria del grupo H y tipo 5, fue observada al caer el 17 de Abril de 1995 en el poblado de Cuartaparte, Silao, Guanajuato, México. Se compone principalmente de los minerales olivino, piroxena, metales de hierro-níquel, troilita, cromita y apatita; se distingue por presentar varias características de choque intenso: fracturas, vetas y bolsas de fusión, olivinos con fuerte extinción ondulante y mosaicismos,

piroxenas con fracturas planares y dislocadas, oscurecimiento en los silicatos debido a fracturamiento y acumulación de metales y vidrio máfico, asociación de cromita-plagioclasa, morfología esférica de metales, mezcla de metales con sulfuros mostrando texturas que indican sulfuración y fusión del metal por arriba del eutéctico, lo cual se genera por metamorfismo de impacto con un pico mínimo de presión mayor a 300-350 kilobares.

Se presentan nuevas texturas mineralógicas características de choque, hasta ahora no descritas, para esta meteorita como: a) material de cobre botroidal, b) mineral policristalino que corresponde a olivino euédrico de grano fino, c) troilita policristalina, d) mezcla de metales con sulfuros y e) una morfología inusual fibrosa de vidrio enriquecida de Fe-Ni.

“
Las meteoritas son rocas
extraterrestres que
subsistieron después de
atravesar la atmósfera
terrestre y caer en su
superficie...
”

Palabras clave: condrita, metamorfismo de choque, olivino, fusión, Silao (Cuartaparte).

NEW TEXTURES AND MINERALS IN THE METEORITE SILAO (CUARTAPARTE) CHONDRITE H5: A PRODUCT OF THE IMPACT METAMORPHISM S4

Abstract

The Silao (also known as Cuarta Parte) meteorite fell down on the 17th, at April 1995 in CuartaParte, Silao, Guanajuato, Mexico. Silao is classified as an ordinary chondrite of the H group and type 5. It is composed by olivine, pyroxene, Fe-Ni metals, troilite, chromite and apatite. Various shock features are recognized in Silao such as veins, fractures and fusion pockets, pyroxenes with planar and dislocated fractures, wavy extinction in olivine and silicate darkening due to fracturing, metal accumulation and mafic glass. Also, associations of chromite-plagioclase, metal spherical morphology, mingling of metals with sulfurs showing textures that indicate sulfuration and metal fusion above the eutectic are observed. These textures are generated by impact metamorphism with a pressure minimum peak greater than 300-350 kbars. In this paper it is presented new mineralogical textures characteristic of shock impact found in this meteorite such as the occurrence of botroidal Cu material, polycrystalline mineral of fine grain euhedral olivine, polycrystalline troilite and glass as fibers with Fe-Ni.

Keywords: chondrite, shock features, olivine, fusion, Silao (Cuartaparte)

NUEVAS TEXTURAS Y MINERALES EN LA METEORITA SILAO (CUARTAPARTE), CONDRITA H5: PRODUCTO DE METAMORFISMO DE IMPACTO S4

Introducción

Las meteoritas son rocas extraterrestres que subsistieron después de atravesar la atmósfera terrestre y caer en su superficie, su estudio contribuye a entender los procesos tempranos en el Sistema Solar, las estrellas y en las regiones interestelares. Tradicionalmente las meteoritas son divididas en tres grupos principales: meteoritas pétreas, pétreas-metálicas o mixtas y metálicas. En una clasificación detallada se distinguen entre: indiferenciadas (condritas y acondritas primitivas), y diferenciadas (meteoritas metálicas, mixtas y la mayoría de las acondritas). La meteorita Silao es una condrita reportada oficialmente por Grossman (1998) y con la denominación de Cuartaparte fue registrada por Sánchez-Rubio y colaboradores (2001). Fue observada al caer el 17 de abril de 1995, en el poblado de Cuartaparte, Silao, Guanajuato, México (20°56' N, 101°21' O).

Dos fragmentos con corteza de fusión de 235 y 175 gramos, respectivamente, forman parte de la Colección Nacional de Meteoritas del Instituto de Geología, UNAM. Silao es clasificada como una condrita H5 (alto hierro y metamorfismo intermedio), S4 (moderadamente chocada) y (W1) moderadamente intemperizada (GROSSMAN, 1998). Varios estudios se han realizado en esta meteorita y sus resultados han sido presentados en diversos congresos (SÁNCHEZ-RUBIO *et al.*, 1996,1998; MACÍAS-ROMO *et al.*, 2005; REYES SALAS *et al.*, 2005), también el estudio de sus condros y algunas características texturales fueron realizados por Cervantes (2009).

Con base en estos trabajos, la meteorita Silao es caracterizada como una roca que sufrió un impacto intenso en su cuerpo parental; en ella se observa una estructura estriada, abundantes **vetas** y bolsas de fusión rellenas de vidrio ultramáfico que contiene metales, sulfuros y silicatos; su principal componente, el olivino, se caracteriza por presentar una fuerte extinción ondulante, fracturamiento y **mosaicismo**, condros fracturados y muy deformados, condros fantasmas, y áreas con cristales muy fracturados. En este trabajo se presenta el hallazgo de nuevas texturas mineralógicas en esta meteorita: a) material de cobre con hábito botroidal, b) mineral policristalino de olivino euédrico de grano fino, c) troilita policristalina, d) mezcla de metales con sulfuros y e) una morfología inusual fibrosa de vidrio enriquecida con Fe-Ni localizada en las vetas y cercanas a la costra de fusión que, se infiere, son el resultado de la transformación de los metales y silicatos al fundirse en su paso por la atmósfera terrestre.

Mosaicismo: es un grado de metamorfismo de rocas dado por las variaciones de presión y temperatura en un impacto meteorítico, que induce la aparición de nuevos cristales a partir de otros existentes. Se pueden observar como ligeras irregularidades de orientación de pequeños y angulosos fragmentos granulares de tamaños variables en un cristal. Al observarse con luz polarizada los fragmentos son similares a las piezas de un mosaico.

Vetas: conjunto de franjas que se distinguen, de la matriz que las contienen, por su textura y color. Por ejemplo una intrusión ígnea (material fundido) dentro de una fisura.

Método de estudio

Se seleccionaron fragmentos pequeños tanto de matriz como de vetas, bolsas de fusión y en la cercanía de la costra de fusión, los cuales se colocaron sobre cinta con pegamento conservando texturas originales y también se trabajó con dos láminas pulidas. Las composiciones y microestructuras de los minerales fueron estudiadas utilizando un microscopio electrónico de barrido JEOL 6300 con técnicas de imagen de electrones retrodispersados y secundarios y con analizador de energía dispersiva de rayos X (EDS) Vantage. Las secciones delgadas pulidas se observaron con técnicas de microscopía óptica en un microscopio de polarización Leitz y con una microsonda JEOL 8900R. Además se utilizaron estándares naturales y sintéticos con 40 s de tiempo de medición para casi todos los elementos, excepto Na y K (con 10 s).

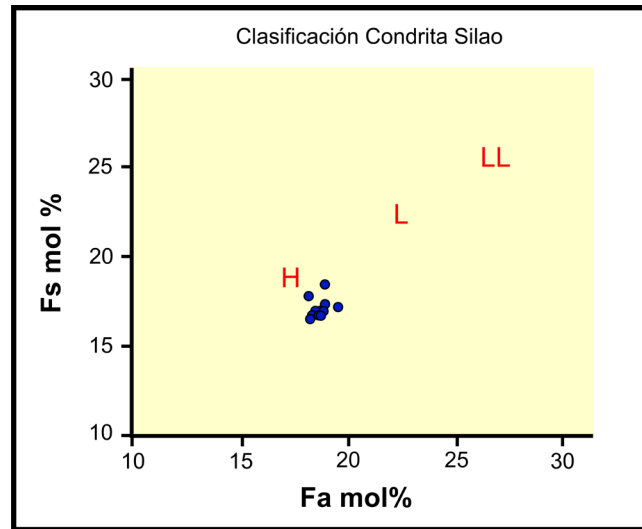
Descripción general, características mineralógicas y petrográficas

Los fragmentos estudiados de la condrita Silao pertenecientes a la colección de meteoritas del Instituto de Geología, son de forma irregular y conservan porciones de una corteza vítrea característica, milimétrica, llamada también corteza de fusión la cual se forma por la fricción al paso de las meteoritas por la atmósfera terrestre y es preservada sólo en aquellas recién caídas o halladas; la textura es granular, muy compacta y sin poros. Su principal característica es la presencia de múltiples planos de falla que atraviesan la roca en todas direcciones (Figura 1). Los principales minerales constituyentes, tanto de los condros como de la matriz, son: olivino $(\text{Mg, Fe})_2\text{SiO}_4$, que muestra extinción ondulante, fracturamiento y mosaicismo; piroxenas $(\text{Mg, Fe})_2\text{Si}_2\text{O}_6$ y $(\text{Mg, Fe, Ca})\text{SiO}_3$ con bandas de deformación. Otros minerales presentes son kamacita y taenita, ambas fases de fierro-níquel, feldespato, cromita, apatito y troilita (FeS). Tanto la matriz, como las fases vítreas presentan un alto grado de cristalización (SÁNCHEZ-RUBIO *et al.*, 1998). La composición promedio del olivino es $\text{Fa}_{18.8}$ (% en mol de fayalita) y la de piroxena es de $\text{Fs}_{17.4}$ (% en mol de ferrosilita). Con base en estos análisis químicos efectuados con microsonda en ambos minerales, se confirma su clasificación como una condrita ordinaria de clase H (Figura 2).

Figura 1. Ejemplar de mano, parte más ancha de 8.5 cm. Se caracteriza por la presencia de múltiples espejos de falla que atraviesan la roca en todas direcciones. Se observa parte de la corteza vítrea característica.

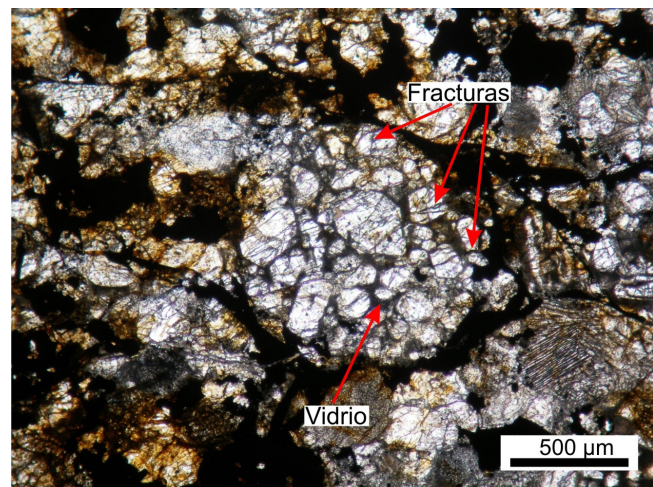


Figura 2. Clasificación de la meteorita Silao (Cuarta Parte) como condrita H, con base en sus porcentajes moleculares de Fayalita (Fa) en Olivino y Ferrosilita (Fs) en piroxena.



En esta condrita, los condros (materiales esferoidales característicos de las meteoritas primitivas o no diferenciadas) son muy variados en tamaño y muchos presentan características de haber sufrido un alto impacto, ya que sus componentes cristalinos muestran fracturas en distintas direcciones e inyecciones de material vítreo entre sus cristales como se resalta en la Figura 3. Se refiere a un condro de olivino de tipo porfirítico clasificado como PO. Otra evidencia de impacto son los condros de olivino de tipo barrado (BO) con fracturamiento intenso, fuerte extinción ondulante y generación de textura en mosaico (Figura 4).

Figura 3. Condro porfirítico de olivino (PO) con inyecciones de vidrio y cristales de olivino fracturados. Imagen obtenida con microscopio óptico con luz natural.



En cuanto a la matriz, los constituyentes mineralógicos y sus texturas caracterizan a los fenómenos de “recocido” o recristalización térmica post-choque con las asociaciones de minerales cromita-plagioclasa: CPA (chromite-plagioclase assemblages, RUBIN, 2004) en la cual la cromita está en cristales euhedrales a anhedrales con tamaños de 0.2–2 µm, rodeados de **vidrio de composición feldespática** (REYES *et al.* 2005) (Figura 5).

Además de los minerales de olivino y piroxena que constituyen los condros, se identificaron clorapatita, fluorapatita, merrilita, cromita, troilita y metales de Fe-Ni distribuidos aleatoriamente en la matriz y vetas de fusión.

Vidrio de composición feldespática: constituyentes de una roca que contienen minerales formados con calcio, potasio, sodio, aluminio y silicato similar al feldespato, material amorfo, no cristalino.

Figura 4. Condro barrado de olivino (BO). Las barras de olivino muestran un fracturamiento intenso, recristalización, mosaicismo y fuerte extinción ondulante. Imagen obtenida con microscopio óptico con luz polarizada.

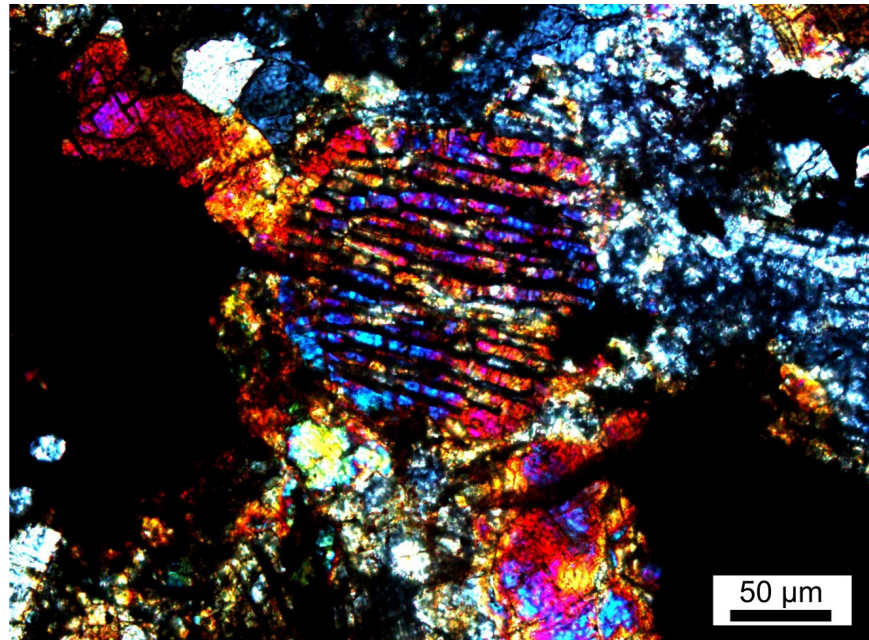
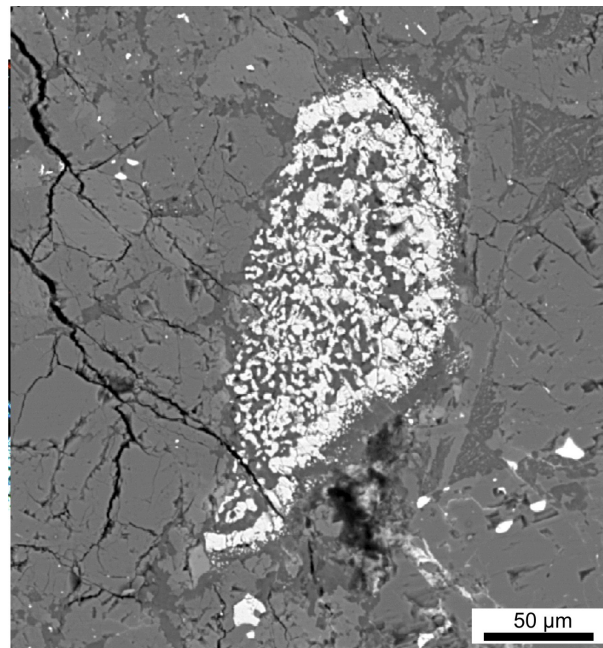


Figura 5. Asociaciones de cromita-plagioclasa: CPA, los tonos más claros corresponden a la cromita rodeada de plagioclasa. Imagen obtenida con microscopio electrónico de barrido con detector de electrones retrodispersados.



Evidencias de choque

El metamorfismo de choque es el resultado de colisiones a hipervelocidad y es un proceso fundamental en el Sistema Solar (STÖFFLER *et al.*, 1991; XIE *et al.*, 2006). Asimismo, incluye brechado, deformación, fusión local, recristalización y transformación de fases,

y sus efectos en las condritas ordinarias varían con la intensidad del choque de tal manera que hay una progresión de estados característicos de metamorfismo de choque que pueden ser reconocidos. Stöffler *et al.* (1991), con base en la comparación de muestras chocadas naturales y experimentales, proporcionaron un esquema de choque y calibración de presión en condritas mediante **análisis petrográficos** de secciones delgadas, reconociendo seis estados definidos como S1 a S6, otorgando presiones estimadas que

Análisis petrográfico: método de estudio para caracterizar la composición mineralógica y estructura de muestras de rocas por medio de su observación a través de microscopios o microsondas. Asimismo sirve para determinar la forma de los cristales y la relación entre los distintos minerales, la micro estructura y toda una serie de magnitudes evaluables.

Anastomosado: se refiere a vetas que se dividen y se ramifican entrecruzándose en forma aleatoria semejando una red.

van desde <5 GPa para S1 hasta 90 GPa para S6. Estos efectos se caracterizan por deformaciones mecánicas como la extinción ondulante y fracturas planares en olivinos y piroxenas, recristalización de olivino en estado sólido, su fusión y formación de olivino policristalino de grano fino, así como transformación de olivino y piroxena en ringwoodita y majorita, respectivamente. Rubin (2004) y Bennett (1996), entre otros, establecen otros indicadores de choque para las condritas ordinarias, tales como inclusiones de vetillas de cromita en silicatos, el conjunto cromita-plagioclasa (CPA), troilita policristalina, cobre metálico, intercrecimientos de metal-sulfuros, granos complejos formados de troilita y metálicos, vetas y bolsas de fundidos en silicatos.

En la meteorita Silao se han reportado texturas y procesos de deformación mecánica que evidencian el efecto de choque, éstas son el mosaicismo con fracturamiento y extinción ondulada en olivino (Figura 6), también la presencia de vetas y bolsas de fusión con distribuciones **anastomosadas** (Figura 7). Estas características ubican a la meteorita con un efecto de choque de tipo S4.

Figura 6. Se observa mosaicismo con fracturamiento y extinción ondulada en los olivinos. Imagen obtenida con microscopio óptico con luz polarizada.

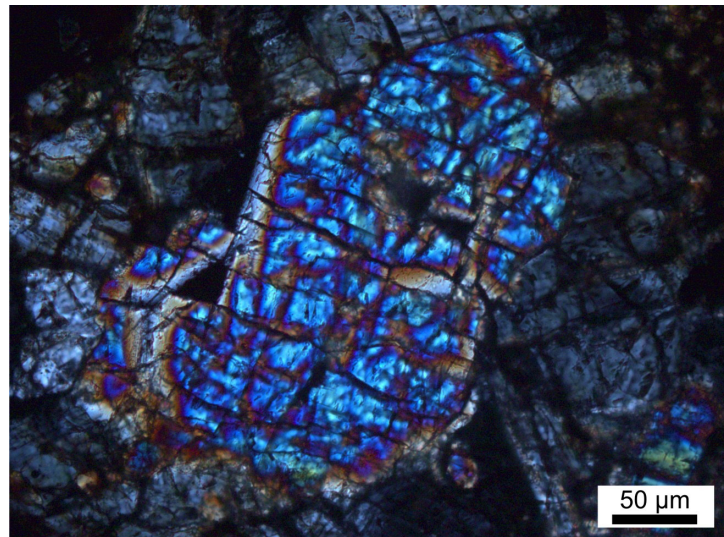
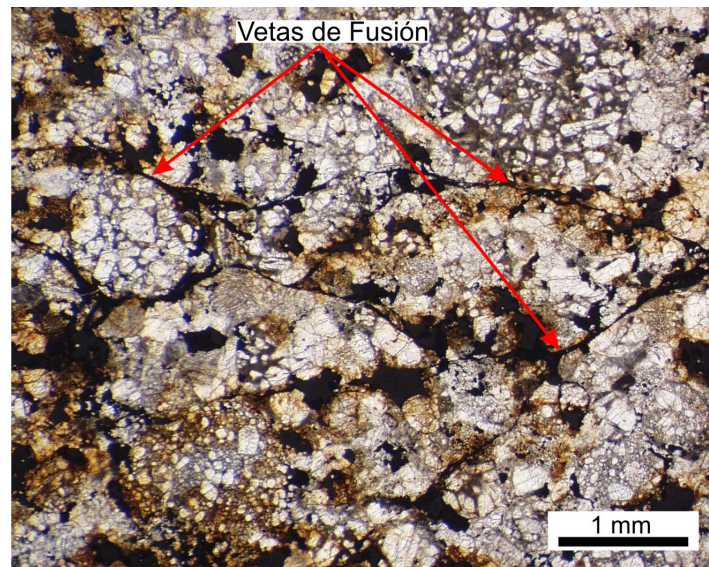


Figura 7. Material de cobre con textura botroidal (los tonos más claros están señalados por las líneas rojas). Imagen obtenida con microscopio electrónico con electrones retrodispersos.



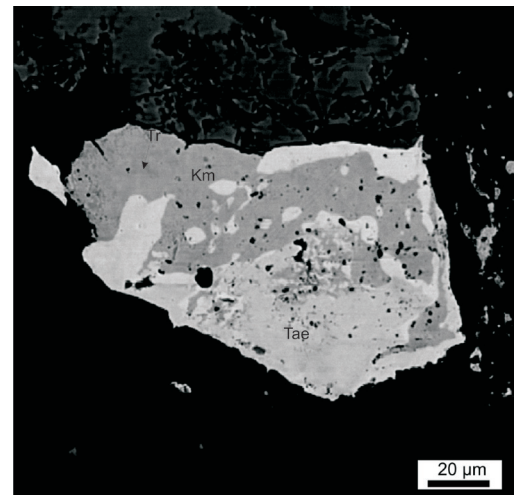
Nuevas texturas mineralógicas

- Granos de mezcla de metales con sulfuros

En la mayoría de las condritas clasificadas como no chocadas o débilmente chocadas, las características texturales de sus minerales metálicos muestran un enfriamiento lento en su formación de entre 700°C-300°C presentando granos homogéneos y monocristalinos (WILLIS Y GOLSTEIN, 1983) y, a diferencia de aquellas que han sufrido un fuerte impacto, éstas presentan heterogeneidad en sus metales en la composición por calentamiento post-choque (BENNETT, 1996). Al obtener un contraste adecuado con el microscopio electrónico y utilizando la técnica de electrones retrodispersados, es muy común observar en la meteorita Silao granos metálicos con texturas complejas formados por troilita y minerales metálicos de kamacita-taenita (Figura 8).

Figura 8. Grano complejo formado por troilita (Tr), minerales metálicos (kamacita (Km), taenita (Tae) y tetra-taenita (Tt). Imagen obtenida con microscopio electrónico de barrido y con electrones retrodispersos.

En la mayoría de las condritas clasificadas como no chocadas o débilmente chocadas, las características texturales de sus minerales metálicos muestran un enfriamiento lento en su formación de entre 700°C-300°C presentando granos homogéneos y monocristalinos (WILLIS Y GOLSTEIN, 1983) y, a diferencia de aquellas que han sufrido un fuerte impacto, éstas presentan heterogeneidad en sus metales en la composición por calentamiento post-choque (BENNETT, 1996). Al obtener un contraste adecuado con el microscopio electrónico y utilizando la técnica de electrones retrodispersados, es muy común observar en la meteorita Silao granos metálicos con texturas complejas formados por troilita y minerales metálicos de kamacita-taenita (Figura 8).



- Material de cobre

Las vetas de fusión están distribuidas en toda la meteorita con diferentes direcciones, dentro de ellas se distingue la presencia de minerales como olivinos, piroxenas, plagioclasa, troilita, cromita, kamacita y tetraetaenita inmersos en vidrio de composición

máfica. En un sector de una veta se observó la presencia de material enriquecido en cobre (Tabla 1) sobre la tetrataenita con una incipiente textura botroidal, la cual está asociada a material amorfo de la misma composición del cobre. En otras regiones de las secciones pulidas de la meteorita Silao se ha observado cobre nativo como inclusiones en los minerales de Fe-Ni. Este material botroidal, posiblemente es producto de fusión de cobre nativo con los metales Fe-Ni al ingreso a la atmósfera (Figura 9). En la Tabla 1 se muestra su composición.

Elemento	% en peso
Cu	46.15
S	16.16
Ni	10.33
Mg	5.81
Fe	17.9
Al	1.33
Si	1.69

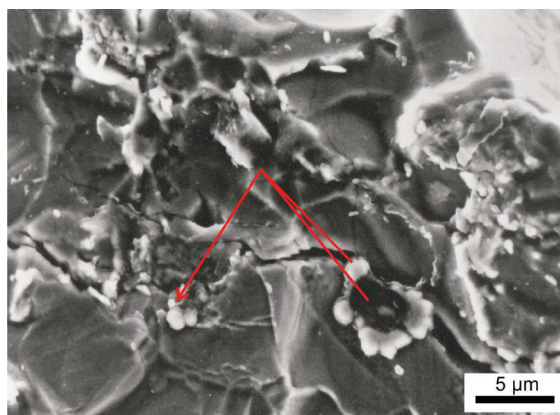


Figura 9. Vetas y bolsas de fusión con distribuciones anastomosadas. Imagen obtenida con microscopio óptico con luz natural.

Tabla 1. Composición del material de cobre. Análisis obtenido con EDS.

- Olivino policristalino

Dentro de las vetas de fusión se observa la presencia de mosaicos de cristales euhedrales de composición (EDS) de olivinos de tamaños muy pequeños (<10 μm) distribuidos a lo largo de las vetas de manera aislada e inmerso en el vidrio máfico (Figura 10). Stöffler *et al.* (1991), describen vetas que consisten en una mezcla de materiales producto de la fusión donde puede observarse material policristalino formado *in situ*, estos minerales de neoformación se caracterizan por ser de grano más fino y con caras cristalinas bien formadas (euhedrales) con respec-

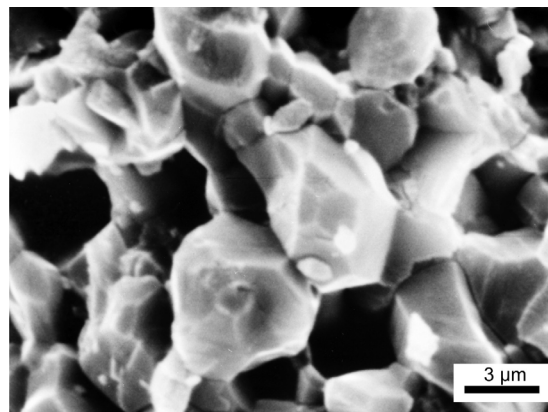
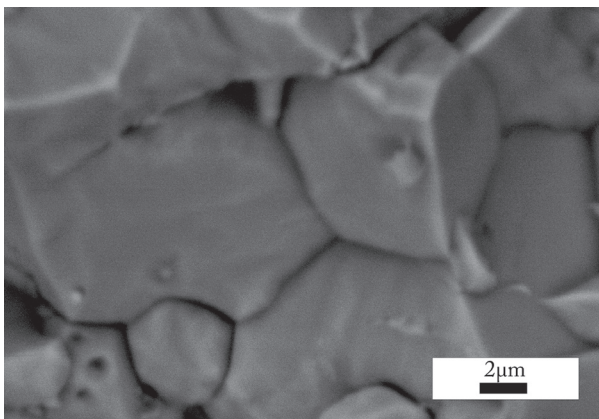


Figura 10. Olivino policristalino dentro de una veta. Imagen obtenida con microscopio electrónico con electrones secundarios.

to a los minerales de la matriz, esta característica está presente en Silao lo que refuerza la hipótesis de alto impacto.

- Troilita policristalina

En la meteorita Silao, se puede observar claramente troilita policristalina formando ángulos de 120° entre los límites de grano (Figura 11). Schmitt *et al.* (1993), realizaron una serie de experimentos de choque y determinaron que la troilita (sulfuro de hierro) siempre permaneció esencialmente monocristalina por debajo de los 10 GPa, pero empezó a maclarse entre 10 GPa-20 GPa y cambió a troilita policristalina con intersecciones en los límites de grano con 120° entre 35 GPa – 60 GPa. Así esta última es un indicador muy sensible a los incrementos de



presión post-choque (Bennett *et al.*, 1996).

- Fibras de vidrio enriquecidas con Fe-Ni

Elemento	% en peso
SiO ₂	9.9
TiO ₂	0.08
Al ₂ O ₃	2.69
FeO	75.64
MgO	6.42
MnO	0.31
Cr ₂ O ₃	0.10
CaO	0.23
Na ₂ O	1.60
K ₂ O	0.07
NiO	2.99
TOTAL	100

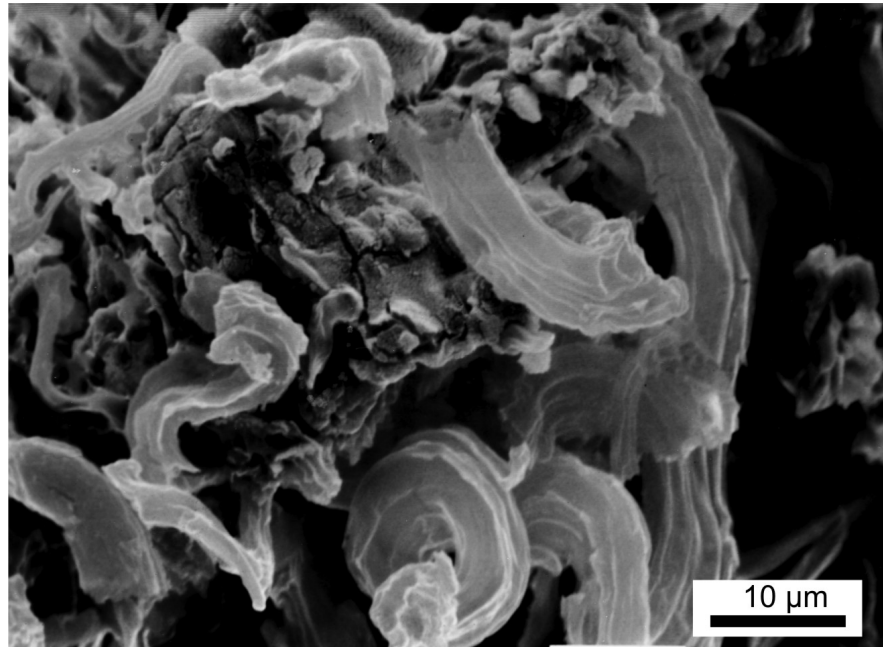
En la meteorita Silao se ha observado una morfología inusual fibrosa de vidrio enriquecida con Fe-Ni localizada en las vetas y cercanas a la costra de fusión que se infiere son el resultado de la transformación de los metales y silicatos al fundirse en su paso por la atmósfera terrestre. La composición de estos materiales y su morfología están en la Tabla 2 y Figura 12.

En el corto tiempo en que las meteoritas atraviesan la atmosfera terrestre, el calentamiento que experimentan funde su superficie formando una corteza de fusión, posiblemente la peculiar característica de la meteorita Silao de presentar múltiples planos de falla permitió que se refundiera el material de las fracturas en dichos planos y se formaran las fibras vítreas como las observadas en la Figura 12. Análogamente, Kimura *et al.* (1983), han percibido transformaciones de los minerales de alta presión en las vetas cercanas a la costra de fusión en la meteorita Yamato 75267.

Figura 11. Troilita policristalina dentro de una veta. Imagen obtenida con microscopio electrónico con electrones retrodispersos.

Tabla 2. Composición del material fibroso. Análisis obtenido con EDS.

Figura 12. Fibras de vidrio enriquecidas en Fe-Ni. Imagen obtenida con microscopio electrónico con electrones secundarios.



Discusión

En principio, la presencia de cobre como metal asociado a metales de Fe-Ni y sulfuro se ha notado en otras condritas, lo cual se atribuye a la fusión por choque arriba de los 988°C durante el metamorfismo térmico (TOMKINS, 2009; RUBIN, 2004). En algunas regiones de las secciones pulidas de la meteorita Silao se ha observado cobre nativo como inclusiones en los minerales de Fe-Ni, lo que indica la presencia de cobre asociado a los metales de hierro-níquel, sin embargo, el material de cobre aquí reportado se podría atribuir a un enfriamiento súbito del material propio de las vetas de fusión, el cual impidió la formación de cobre nativo. No obstante, se ha reportado como material de cobre pues no hay certeza de que tenga una estructura interna y sólo sea un material amorfo con cobre. Se descarta que pueda tratarse de contaminación ya que la meteorita Silao se recuperó inmediatamente después de su caída y aún presenta parte de la costra de fusión.

A nivel macroscópico y microscópico el fracturamiento es intenso, los planos de fallas de color oscuro expuestos en la superficie de la meteorita (Figura 1) muestran el material producto de fusión (vidrio de composición máfica) dispuestos en múltiples direcciones. De igual forma, al hacer las observaciones a nivel microscópico, se definen los listones oscuros que corresponden a las vetas de fusión que atraviesan la roca en todas direcciones, algunos formando texturas anastomosadas o trenzadas incorporando bolsas de fundido con material brechado en su interior, así como rodeando a condros con texturas claras de choque, donde se distingue sus múltiples fracturas de olivino o piroxeno rellenas de inyecciones de metales sulfuros y vidrio máfico, lo cual provoca, en algunos casos, su oscurecimiento. Dentro de las vetas, son abundantes tanto el metal como la troilita que pueden observarse conjuntamente con texturas de asociación me-

Eutético: mezcla proporcional de componentes cuyo punto de fusión es menor que el que posee cada una de las componentes, o bien la combinación en cualesquiera otras proporciones. En este sentido, es posible tener un sistema que consista de dos o más fases sólidas y un líquido cuya composición puede ser expresada en términos de éstas, todas las fases coexisten en un punto que es la mínima temperatura de fusión para el conjunto de sólidos.

tal-troilita, sugiriendo una etapa de sulfuración del metal por arriba del **eutético**, lo cual es referido en la literatura a presiones muy altas debido a procesos de choque (SCOTT, 1982; RUBIN, 1994).

Conclusiones

El metamorfismo de impacto que sufrió la meteorita Silao muestra nuevas texturas no reportadas anteriormente para esta meteorita que son: a) material de cobre botroidal, b) mineral policristalino que corresponde a olivino eu-hedral de grano fino, c) troilita policristalina, d) mezcla de metales con sulfuros y e) una morfología inusual fibrosa de vidrio enriquecida de Fe-Ni.

La meteorita Silao probablemente sufrió un metamorfismo de impacto con un pico mínimo de presión mayor a 300-350 kilobares, y de acuerdo a la clasificación de choque para condritas ordinarias dadas por Stöffler (2001) correspondería, al menos, a S4. ❁

Bibliografía

- [1] BENNETT, M. E. y H. Y. McSween, "Shock features in iron nickel metal and troilite of L-group ordinary chondrites", *Meteoritics and Planetary Science*, 1996b, vol. 31, pp. 255–264.
- [2] CERVANTES DE LA CRUZ, K. E., *Estudio de los condros de las meteoritas condriticas mexicanas Cosina, Cuartaparte y Nuevo Mercurio: origen y evolución de dichas estructuras*. Tesis Doctoral, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geología, México: UNAM, 2009.
- [3] CHEN M.; X. Xie; D. Wang y S. Wang, "Metal-troilite-magnetite assemblage in schock vein of Sixiangkou meteorite", *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 2002, vol. 66, Núm. 17, pp. 3143-3149.
- [4] GROSSMAN, J. N., "The Meteoritical Bulletin", *Meteoritics and Planetary Science*, 1998, vol. 33, Núm. 82, A221-A239.
- [5] KIMURA M. *et al.*, "Back-transformation of high-pressure phases in a shock melt vein of an H-chondrite during atmospheric passage: Implications for the survival of high-pressure phases after decompression", *Earth and Planetary Science Letters*, 2003-2004, vol. 217, Núm. 1-2, pp. 141-150.
- [6] MACÍAS ROMO, C.; M. Reyes Salas y F. Ortega Gutiérrez, "Material producto de fusión en la meteorita Cuartaparte", (Resumen) *XIX Reunión Anual de Astronomía, Guanajuato*, 2005, Sesión 4.
- [7] REYES SALAS, M., Macías Romo, C. y Ortega Gutiérrez, F., "Características texturales en cromita como evidencias de metamorfismo de choque en la Meteorita Cuartaparte", (Resumen) *XIX Reunión Anual de Astronomía, Guanajuato*, 2005, Sesión 4.
- [8] RUBIN A. E., "Metallic copper in ordinary chondrites", *Meteoritics*, 1994, vol. 29, pp. 93-98.
- [9] -----, "Chromite-plagioclase assemblages as a new shock indicator; Implications for the shock and thermal histories of ordinary Chondrites", *Geochim. Cosmochim Acta*, 2003, vol. 67, Núm. 14, pp. 2695-2709.
- [11] -----, "Postshock annealing and postannealing shock in equilibrated ordinary chondrites: Implications for the thermal and shock histories of chondritic asteroids", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, vol. 68, Núm. 3, pp. 673-689.
- [12] SÁNCHEZ, RUBIO *et al.*, "La meteorita Cuartaparte: Nueva meteorita pétreca caída en el estado de Guanajuato, México (Resumen)", *III Coloquio de Sociedad Mexicana de Mineralogía*, México, 1996.

- [13] SÁNCHEZ, RUBIO *et al.*, “Cuartaparte meteorite: A fauled ordinary chondrite”, *Antartic Meteorites XXIII*, Tokyo, junio 10-12, 1998, p. 141.
- [14] SÁNCHEZ, RUBIO *et al.*, *Las Meteoritas de México*, Catálogo, UNAM, 2001, pp. 1-85.
- [15] SCOTT, E. R. D., “Origin of rapidly solidified metal-troilite grains in chondrites and iron meteorites”, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1982, vol. 46, Núm. 5, pp. 813–823.
- [16] SCHMITT, R.T.; A. Deutsch y D. Stöffler, “Shock effects in experimentally shocked samples of the H6 chondrite Kernouvé (abstract)”, *Meteoritics*, 1993, vol. 28, Núm. 3, pp. 431-432.
- [17] STÖFFLER, D.; J. Keil; E. Scott, “Shock metamorphism of ordinary chondrites”, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, vol. 55, Núm. 12, pp. 3845-3867.
- [18] TOMKINS, A., “What metal-troilite textures can tell us about post-impact metamorphism in chondrite meteorites”, *Meteoritics & Planetary Science*, 2009, vol. 44, Núm. 8, pp. 1133-1149.
- [19] XIE, Z.; T. Sharp y P. De Carli, “Estimating shock pressures based on high-pressure minerals in shock-induced melt vein of L chondrites”, *Meteoritics and Planetary Science*, 2006, vol. 41, Núm. 12, 1883-1898.
- [20] SCHURAYTZ, B. C.; V. L. Sharpton y L. E. Marián, “Petrology of impact-melt rocks at the Chicxulub multiring basin, Yucatán, Mexico”, *Geology*, 1994, vol. 22, Núm. 10, pp. 868–872.
- [21] WILLIS, I.; I. Goldstein, “A three-dimensional study of metal grains in equilibrated, ordinary chondrites”, *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 14th*, suplemento, 1983, vol. 88, Núm. S01, pp. B287-B292.
- [22] XIE, X.; Sun Zhenya y M. Chen, “The distinct morphological and petrological features of shock melt veins in Suizhou L6 chondrite”, *Meteoritics & Planetary Science*, 2011, vol. 46, Núm. 3, pp. 459-469.