

# Mineralogía, texturas y cosmoquímica de cóndrulos RP y PO en la condrita Reliegos L5 (León, España).

*Mineralogy, textures and cosmochemistry of RP and PO chondrules in Reliegos L5 chondrite (Leon, Spain).*

M.J. Muñoz-Espadas <sup>(1)</sup>, J. Martínez-Frías <sup>(2)</sup>, R. Lunar <sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Dpto. de Geología, Museo Nacional de Ciencias Naturales, CSIC, José Gutiérrez Abascal 2, 28006 Madrid, España.

<sup>(2)</sup> Laboratorio de Geología Planetaria, Centro de Astrobiología, CSIC-INTA, Carretera de Ajalvir km 4, 28850 Torrejón de Ardoz, Madrid, España.

<sup>(3)</sup> Dpto. de Cristalografía y Mineralogía, Facultad de Ciencias Geológicas, UCM, Avenida Complutense s/n, 28040 Madrid, España.

## ABSTRACT

*The chondrite Reliegos, fell in the León Province in 1947, is the last recognized meteorite recovered in Spain. It is a L5 chondrite, with olivines  $Fa_{22,9-25,2}$  and low Ca pyroxenes  $En_{75,4-78,7}Fs_{20,1-22,6}$ . Due to the intense recrystallization it has suffered, chondrules are rare, and their rims are poorly delineated. However, chondrules of different types have been identified. Their compositional and textural characteristics are described, together with the elemental distribution inside the chondrules, by punctual electron microprobe analysis and PIXE profiles.*

**Key words:** Reliegos, chondrite, chondrules, PIXE

*Geogaceta*, 34 (2003), 35-38  
ISSN:0213683X

## Introducción

Las condritas son meteoritos no diferenciados, lo que significa que no han experimentado fusión tras su formación por acreción, hace unos 4.555 millones de años. Sus características revelan, por tanto, las condiciones en que se formaron en la nebulosa solar primitiva. Sin embargo, la mayor parte de ellas han estado sometidas a modificaciones químicas y texturales causadas por procesos secundarios que tienen lugar en su cuerpo padre asteroidal. Estos procesos son metamorfismo térmico, metamorfismo de choque y alteración acuosa.

El tipo de condritas más abundante son las llamadas condritas ordinarias, pues suponen el 93,5% de las condritas caídas. Estas a su vez se agrupan en tres campos H, L y LL, según decrece en ellas el contenido en hierro oxidado y en metal.

Los cóndrulos son elementos singulares y complejos de los meteoritos condriticos. Se trata de esferas generalmente submilimétricas de distintas composiciones, mineralogías y texturas, cuyo origen aún no está completamente aclarado. Su abundancia puede alcanzar hasta un 70% en volumen en las condritas ordinarias. Puede decirse, por tanto, que una gran parte de la materia sólida de la nebulosa solar primitiva

ha llegado a nosotros en forma de cóndrulos. Las características de los mismos reflejan los procesos primarios o nebulares que han afectado a una fracción importante de la materia primigenia. A su vez, los procesos secundarios antes mencionados, pueden modificarlos.

El estudio de la condrita Reliegos forma parte de una investigación más amplia (Muñoz-Espadas, 2003) sobre varias condritas ordinarias equilibradas (Cañellas H4, Olmedilla de Alarcón H5, Reliegos L5 y Olivenza LL5) pertenecientes a la colección del Museo Nacional de Ciencias Naturales (MNCN). El objetivo fundamental es conocer con precisión sus características mineralógicas y cosmoquímicas, mediante el estudio detallado de los tipos de cóndrulos que contienen, y sus relaciones entre sí y con el resto de componentes, así como el efecto producido sobre ellos por los procesos secundarios. Entre ellos, el metamorfismo térmico es el proceso que actúa con más intensidad en las condritas ordinarias.

## Antecedentes

Reliegos es una condrita ordinaria L5 caída en León (42°28,30'N, 5°20'W) el 28 de diciembre de 1947, hacia las 8:00 horas. Se trata del último meteorito confirmado

que se ha recuperado en España. Se recogieron unos 17,3 kilos de material, de los que el MNCN posee tres fragmentos que suman unos 10,1 kilos (Muñoz-Espadas *et al.*, 2002a). La muestra estudiada en este trabajo es un fragmento de 14,7 g.

El primer antecedente bibliográfico conocido sobre esta condrita corresponde a Gómez de Llarena y Rodríguez Arango (1950). Mason (1963) la clasificó inicialmente como de tipo L. Dicha clasificación fue posteriormente confirmada por McCoy *et al.* (1990), quienes además establecieron que su tipo petrológico es 5 (metamorfismo térmico intenso). Recientemente se ha determinado su grado de metamorfismo de impacto, establecido en S4 o moderado (Muñoz-Espadas *et al.*, 2002b) y se han obtenido nuevos datos mineralógicos y composicionales globales (Muñoz-Espadas *et al.*, 2003).

## Metodología

Para este estudio, además de las técnicas que se emplean de forma habitual en cualquier estudio mineralógico y petrológico (microscopía óptica de luz transmitida y reflejada, SEM-EDX y microsonda electrónica), se ha contado con la posibilidad de realizar análisis de PIXE, siendo esta la pri-

Cóndrulo	REL 2	REL 2	REL 2	REL 4	REL 4	REL 4
Análisis	23-92	23-93	23-94	23-103	23-106	23-107
SiO <sub>2</sub>	38,62	38,29	38,04	38,50	38,00	38,36
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,02	0,00	0,00	0,03	0,00
FeO	21,11	21,50	21,31	21,79	21,49	20,94
MnO	0,56	0,45	0,54	0,57	0,49	0,57
MgO	38,79	38,37	39,21	38,99	39,09	38,57
CaO	0,03	0,04	0,06	0,00	0,03	0,04
Na <sub>2</sub> O	0,01	0,02	0,02	0,02	0,00	0,02
K <sub>2</sub> O	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01
TiO <sub>2</sub>	0,07	0,02	0,00	0,00	0,04	0,00
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,06	0,01	0,00	0,00	0,04	0,06
NiO	0,01	0,02	0,04	0,05	0,06	0,01
SO <sub>3</sub>	0,00	0,02	0,03	0,04	0,00	0,01
Total	99,25	98,74	99,26	99,97	99,27	98,59
	Fa23,4	Fa23,9	Fa23,4	Fa23,9	Fa23,6	Fa23,3
Mg#	0,883	0,880	0,883	0,880	0,882	0,883

Tabla I.- Selección de análisis de microsonda electrónica de los olivinos de los cóndrulos de Reliegos.

Table I.- Selected electron microprobe analysis of the olivines in Reliegos's chondrules.

mera vez que se aplica ésta última técnica en una tesis doctoral sobre materiales meteoríticos en nuestro país. En concreto, mediante PIXE se obtuvieron análisis de cóndrulo total, y perfiles de la distribución de distintos elementos a través de los cóndrulos. Como se ha indicado anteriormente, dado que Reliegos es una condrita muy recristalizada es difícil encontrar en ella cóndrulos bien definidos. Para los análisis se seleccionaron aquellos cóndrulos representativos de los principales tipos texturales identificados que conservan un borde nítido.

**Mineralogía, composición y distribución elemental en cóndrulos seleccionados**

Las composiciones del olivino y del piroxeno pobre en calcio en Reliegos son muy homogéneas (Fa<sub>22,9-25,2</sub> y En<sub>75,4-78,7</sub> Fs<sub>20,1-22,6</sub>, respectivamente), como resultado de la acción del metamorfismo térmico, y no se ha detectado diferencia composicional entre los minerales de la matriz y los de los cóndrulos. Los análisis puntuales de los cóndrulos seleccionados aparecen en las tablas 1 (olivinos), 2 (piroxenos) y 3 (mesostasia). La clasificación de los cóndrulos seleccionados, y sus composiciones totales, aparecen en la tabla 4. A continuación se presenta una descripción detallada de los mismos.

**REL 3**

Es un cóndrulo radial de piroxeno (RP, Gooding y Keil, 1981), con un diámetro aparente de unos 900 μm (Fig. 1A). La composición de estos piroxenos se encuentra en un estrecho rango: En<sub>77,5-78,5</sub> Fs<sub>20,1-20,7</sub> (Tabla 2). De acuerdo con la clasificación composicional de Scott y Taylor (1983), es un cóndrulo de tipo IIB.

El análisis mediante PIXE refleja un alto contenido en sílice, magnesio, hierro y calcio, propio de su composición mineralógica, que consiste en abundante piroxeno con escasa mesostasia. La sílice aparece subestimada (Tabla 4), en comparación con los resultados obtenidos en los análisis totales de otros trabajos realizados en cóndrulos radiales de piroxeno (Gooding, 1979; Folco y Mellini, 2000). Sin embargo existe una buena concordancia en los resultados del resto de elementos.

Por tratarse de un cóndrulo con textura de grano muy fino algunos óxidos, como SiO<sub>2</sub>, MnO, TiO<sub>2</sub>, S, y V, se distribuyen de forma muy homogénea (Fig. 2). La mesostasia que ocupa los intersticios entre las acículas de piroxeno es responsable de los picos en la distribución del CaO y el K<sub>2</sub>O, y descensos del Fe en los mismos puntos. La distribución del FeO también acusa, al igual

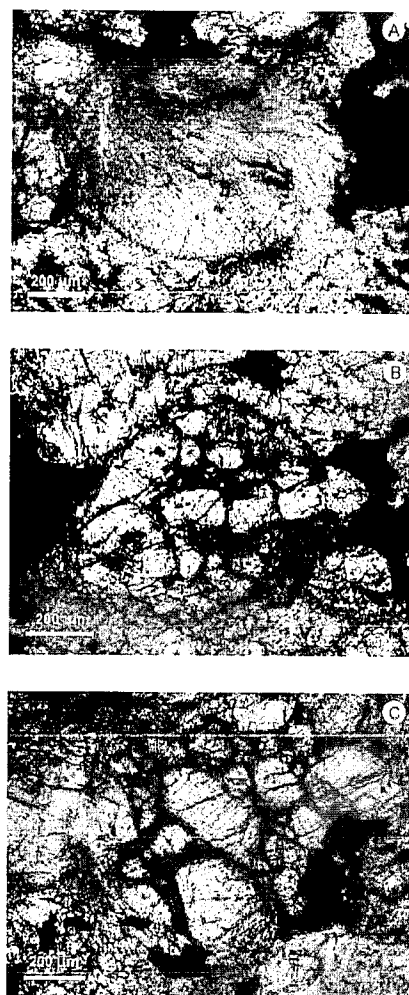


Fig. 1.- Cóndrulos seleccionados en Reliegos. Todas las fotos se han realizado con luz transmitida y nicoles paralelos. A) REL 3. Cóndrulo radial de piroxeno, formado por acículas muy finas. B) REL 2. Cóndrulo porfídico de olivino, flanqueado por granos metálicos, que se ven oscuros. C) REL 4. Cóndrulo porfídico de olivino, con mesostasia abundante entre los cristales.

Fig. 1.- Selected chondrules in Reliegos. All microphotographs in transmitted light and parallel nichols. A) REL 3. Radial pyroxene chondrule, consisting of very fine acicular crystals. B) REL 2. Porphyritic olivine chondrule, surrounded by dark-looking, metal grains. C) REL 4. Porphyritic olivine chondrule, with abundant mesostasis among the crystals.

que la del NiO, la presencia de un cristal de aleación de Fe-Ni junto a uno de los bordes exteriores del cóndrulo. Los máximos de Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, que delatan a los pequeños granos de cromita distribuidos entre el piroxeno, se corresponden con máximos destacables de otros elementos presentes en este mineral, como el FeO, el MnO, y el TiO<sub>2</sub>, y menos destacados en el V. El Zn reside en los piroxenos. La distribución del Sr, que se concentra en la mesostasia, reproduce a grandes rasgos la del CaO y el K<sub>2</sub>O.

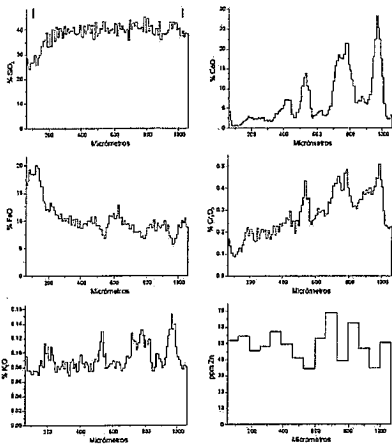


Fig. 2.- Selección de los perfiles composicionales obtenidos mediante PIXE en el cóndrulo REL 3. Las marcas verticales en el primer gráfico indican la posición de los bordes del cóndrulo.

Fig. 2.- Selected PIXE compositional profiles in chondrule REL 3. The vertical marks in the first graphic indicate the position of the chondrule rims.

REL 2

Con sus aproximadamente 850 mm de diámetro aparente, este cóndrulo porfídico de sección elipsoidal está constituido por cristales subhedrales de olivino, de 75-250 mm de tamaño, embebidos en una mesostasia anubarrada por la desvitrificación (Fig. 1B). Se trata, por tanto, de un cóndrulo PO, según la clasificación textural de Gooding y Keil (1981). La composición de su mesostasia (Tabla 3) indica la presencia de feldespato secundario (Ab<sub>70</sub>An<sub>26</sub>). La mesostasia tiene abundante albita normativa, según su norma CIPW (Ab, 66,34%; An, 16,64%;

Cóndrulo	REL 3	REL 3	REL 3	REL 3
Análisis	23-85	15-64	15-65	15-69
SiO <sub>2</sub>	56,05	56,96	56,67	55,97
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,64	1,96	1,46	0,15
FeO	12,44	12,35	12,44	13,42
MnO	0,55	0,46	0,46	0,48
MgO	27,87	26,93	28,19	29,43
CaO	0,82	0,68	0,61	0,79
Na <sub>2</sub> O	0,31	0,06	0,05	0,00
K <sub>2</sub> O	0,02	0,00	0,01	0,00
TiO <sub>2</sub>	0,17	0,17	0,17	0,20
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,10	0,01	0,00	0,00
NiO	0,01	0,00	0,08	0,07
SO <sub>3</sub>	0,06	0,26	0,00	0,07
Total	99,03	99,84	100,15	100,58
	En77,9	En77,8	En78,5	En77,8
	Fs20,4	Fs20,7	Fs20,1	Fs20,6
Mg#	0,800	0,795	0,802	0,796

Tabla II.- Análisis de microsonda electrónica de los piroxenos de los cóndrulos de Reliegos.

Table II.- Electron microprobe analysis of the pyroxenes in Reliegos's chondrules.

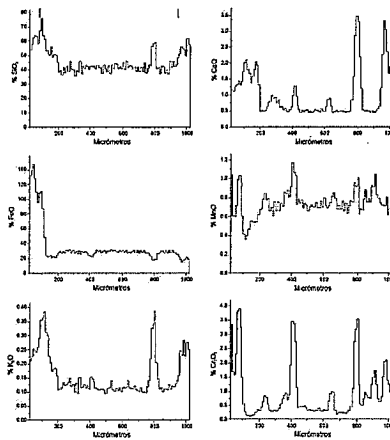


Fig. 3.- Selección de los perfiles composicionales obtenidos mediante PIXE en el cóndrulo REL 2. Las marcas verticales en el primer gráfico indican la posición de los bordes del cóndrulo.

Fig. 3.- Selected PIXE compositional profiles in chondrule REL 2. The vertical marks in the first graphic indicate the position of the chondrule rims.

Di, 7,92%). Este resultado es muy similar a los determinados en otras condritas ordinarias (ej.: condrita Tieschitz (República Checa); Wlotzka, 1983), salvo por el alto valor de Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, que seguramente se debe a un micrograno de cromita en el punto analiza-

Cóndrulo	REL 2	REL 4	CIPW	REL 2	REL 4
			W		
SiO <sub>2</sub>	57,34	62,09	Q	0,00	3,76
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17,96	19,27	Ab	66,34	68,25
FeO	3,82	1,44	An	16,64	17,69
MnO	0,10	0,03	Di	7,92	6,44
MgO	2,43	1,65	Hy	5,22	3,72
CaO	4,98	5,02	Ol	3,13	0,00
Na <sub>2</sub> O	7,41	7,87	Fo	1,43	0,00
K <sub>2</sub> O	0,70	0,81	Fa	1,70	0,00
TiO <sub>2</sub>	0,38	0,08	C	0,00	0,00
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,93	0,08	Il	0,76	0,15
NiO	0,03	0,00			
SO <sub>3</sub>	0,00	0,75			
Total	101,08	99,08		Ab70An2	Ab70An2
				6	5

Q: cuarzo, Ab: albita, An: anortita, Di: diópsido, Hy: hiperstena, Ol: olivino, Fo: forsterita, Fa: fayalita, C: corindón, Il: ilmenita.

Tabla III.- Análisis de microsonda electrónica de la mesostasia de los cóndrulos, y resultados de la norma CIPW de los mismos.

Table III.- Electron microprobe analysis of the mesostasia in the chondrules, and their CIPW calculation.

	REL 3	REL 2	REL 4
%			
SiO <sub>2</sub>	39,147	43,757	40,874
FeO	10,073	29,673	19,932
Mn	0,383	0,738	0,662
O			
CaO	7,545	0,873	2,668
K <sub>2</sub> O	0,094	0,146	0,099
TiO <sub>2</sub>	0,149	Q	Q
Cr <sub>2</sub> O	0,289	0,748	0,516
<sup>3</sup>			
NiO	0,025	0,235	0,259
S	0,036	Q	Q
Co	*	0,329	0,184
ppm			
Cu	32,9	203,9	127,6
Zn	49,0	128,8	101,6
Zr	33,3	26,5	Q
Ga	*	30,1	24,3
Ge	Q	9,2	Q
Rb	*	33,9	28,7
Sr	22,7	34,3	49,5
V	104,7	275,2	390,9
Br	12,3	28,1	28,6

Q: elemento presente en el espectro, del que existe distribución espacial cualitativa, pero no cuantificable. \*: concentración descartada, por tener  $2\sigma > 100\%$ .

Tabla IV.- Clasificación y composición de cóndrulos seleccionados, obtenida mediante PIXE.

Table IV.- Classification and composition of selected chondrules, obtained by PIXE.

La composición química del cóndrulo analizada mediante PIXE (Tabla 4) muestra un porcentaje alto de SiO<sub>2</sub>, FeO y CaO, comparable a los resultados obtenidos en otros cóndrulos de tipo II (ej.: condrita Parnallee (India); McCoy *et al.*, 1991), salvo únicamente por el mayor contenido en FeO.

La sílice en este cóndrulo porfídico tiene una distribución muy homogénea, con elevaciones en su contenido que coinciden con algunas de las zonas en las que el perfil atraviesa áreas de mesostasia, como son las zonas próximas a los bordes (Fig. 3).

Las fases metálicas (aleación de Fe-Ni, troilita y cromita) que limitan con el borde externo del cóndrulo son los responsables de los picos que aparecen en ese extremo

del perfil para elementos como FeO, NiO, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO, TiO<sub>2</sub>, S, Zn y V. Otros granos adicionales de cromita, de pequeño tamaño, son los responsables de los picos en el interior del cóndrulo de Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO, Zn y V. Dichos granos se encuentran preferentemente en las zonas con mesostasia, como lo atestigua la coincidencia en la posición de esos picos con los del CaO, y en menor medida el K<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub> y Sr.

#### REL 4

Es un cóndrulo porfídico de olivino (PO, según Gooding y Keil, 1981), de unos 770 mm de diámetro, formado por cristales eu-subhedrales de olivino de entre 100 y 400 mm (Fig. 1C). La composición mineralógica obtenida para los olivinos es de Fa<sub>23,3-23,9</sub> (Tabla 1). La mesostasia es escasa y está desvitrificada, por lo que aparece en ella feldespato secundario, con Ab<sub>70</sub>An<sub>25</sub> (Tabla 3). Este análisis es más rico en SiO<sub>2</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, y más pobre en FeO y MgO que los de otras condritas ordinarias (ej.: condrita Tieschitz; Wlotzka, 1983). Su norma CIPW da abundante albita normativa (Ab, 68,25%; An, 17,69%; Di, 6,44%). Según Scott y Taylor (1983), corresponde al tipo IIA, mientras que según DeHart *et al.* (1992), es un cóndrulo A5.

El resultado del análisis de cóndrulo total por PIXE muestra unos contenidos de SiO<sub>2</sub> y FeO menores, aunque mayores de CaO que los del cóndrulo anteriormente descrito, cuya textura es también porfídica de olivino. Esta diferencia puede explicarse por la mayor proporción de mesostasia de este cóndrulo. Además, estos datos son comparables a los determinados en otros cóndrulos de tipo II (ej.: condritas Parnallee y Olivenza; McCoy *et al.*, 1991).

Este cóndrulo porfídico de olivino, con abundante mesostasia, tiene un contenido en calcio mayor a la matriz que le rodea, y descendiendo hacia el borde del cóndrulo (Fig. 4). Ese descenso también se produce en la distribución del K<sub>2</sub>O, y levemente en la SiO<sub>2</sub>, mientras que el FeO y el MnO, que no entran en cantidades importantes en la mesostasia, aumentan su contenido hacia el borde. El S, en cambio, tiene una distribución muy homogénea. El aumento hacia borde del contenido de FeO y MnO puede estar influido por la difusión de estos elementos desde la cromita que se encuentra en el borde exterior del cóndrulo, al inicio del perfil. Su posición queda bien señalada por el importante máximo de Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> y Zn, y más discretamente de V, en esa zona. El Zn también registra un máximo en el extremo opuesto del perfil, coincidiendo con

un máximo de NiO que marca la posición de un grano de aleación de Fe-Ni, asociado a cromita. Las zonas de mesostasia están claramente marcadas por los máximos en CaO, que se repiten, aunque con menor claridad, en las distribuciones de TiO<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>O y Sr.

#### Agradecimientos

Este trabajo ha formado parte de la tesis doctoral del primer autor, financiada por la beca FP98-20250393 del Ministerio de Ciencia y Tecnología. Los análisis de PIXE se realizaron en colaboración con el Dr. Ronald Vis (†), del "Ton Beam Analysis Group" de la Universidad Libre de Amsterdam.

#### Referencias

- DeHart, J.M., Lofgren, G.E., Lu, J., Benoit, P.H. y Sears, D.W.G. (1992): *Geochim. Cosmochim. Acta.* 56, 3791-3807.
- Folco, L. y Mellini, M. (2000): *Meteoritics.* 35, 733-742.
- Gómez de Llarena, J. y Rodríguez Arango, C. (1950): *Boletín RSEHN.* 48: 303-315.
- Gooding, J.L. (1979): Tesis, Univ. Nuevo México.
- Gooding, J.L. y Keil, J. (1981): *Meteoritics.* 16, 17-43.
- Huang, S. y Sears, D.W.G. (1997): *Geochim. Cosmochim. Acta.* 61, 4689-4704.
- Huang, S., Lu, J., Prinz, M., Weisberg, M.K., Benoit, P.H. y Sears, D.W.G. (1996): *Icarus.* 122, 316-346.
- Mason, B. (1963). *Geochim. Cosmochim. Acta.* 27, 1011-1023.
- McCoy, T.J., Scott, E.R.D., Jones, R.H., Keil, K. y Taylor, G.J. (1991): *Geochim. Cosmochim. Acta.* 55, 601-619.
- Muñoz-Espadas, M.J., Martínez-Frías, J., Lunar, R., Sánchez, B. y Sánchez, J. (2002a): *Meteoritics.* 37 (Supl.), B89-B94.
- Muñoz-Espadas, M.J., Martínez-Frías, J. y Lunar, R. (2002b): *XXII Reun. An. SEM.* 25-A, 71-72.
- Muñoz-Espadas, M.J. (2003): Tesis, Univ. Complutense. 324 pp.
- Muñoz-Espadas, M.J., Martínez-Frías, J. y Lunar, R. (2003): *XXIII Reun. An. SEM.* Scott, E.R.D. y Taylor, G.J. (1983): *Jour. Geophys. Res.* 88, B275-B286.
- Wasson, J.T. y Kallemeyn, G.W. (1988): *Phil. Trans. Roy. Soc. London.* A325, 535-544.
- Wlotzka, F. (1983): En: King, E.A. (ed.). *Chondrules and their origins.* Houston. Lunar and Planetary Institute. 296-318.