

# Un nuevo meteorito español: Retuerta del Bullaque (Ciudad Real). Clasificación, mineralogía y preservación de la morfología

*A new Spanish meteorite: Retuerta del Bullaque (Ciudad Real).  
Classification, mineralogy and preservation of the morphology*

R.P. Lozano<sup>1</sup>, J. Reyes<sup>2</sup>, E. Baeza<sup>1</sup>, R. González Laguna<sup>1</sup>, J.C. Gutiérrez-Marco<sup>3</sup>, R. Jiménez Martínez<sup>1</sup>

## RESUMEN

El meteorito de Retuerta del Bullaque es un nuevo siderito español, encontrado en 1980 cerca de esta localidad de Ciudad Real, en un área colindante al Parque Nacional de Cabañeros (39°27'32"N, 4°22'39"O). Con cerca de 100 kg de peso, se trata de una octaedrita gruesa moderadamente oxidada con regmaglifos. Algunos sectores del borde están recristalizados debido a la fricción con la atmósfera. Los análisis de ICP-AES (Ni: 7.527 y Co: 0.475 en % en peso) e ICP-MS (Ga: 68.9, Ge: 365, As: 13.7, W: 0.95, Ir: 1.95 y Au: 1.70 en ppm) permiten clasificar el ejemplar en el grupo principal del complejo IAB. Químicamente, el meteorito de Retuerta del Bullaque es similar al siderito de Kaalijarv, aunque mineralógica y texturalmente es más parecido a otros sideritos del citado grupo, con menos Ni y Au (como por ejemplo Cañón del Diablo). Retuerta del Bullaque está compuesto principalmente por kamacita, tanto en bandas de Widmanstätten ( $2.0 \pm 0.3$  mm) con inclusiones de cohenita, como en sectores poligonales sin cohenita y con abundantes líneas de Neumann. En ambas zonas, la kamacita contiene schreibersita alotriomorfa e idiomorfa (rhabdita). La taenita forma delgadas lamelas situadas entre los cristales de kamacita y también dentro de plessitas perlíticas. La cohenita lamelar es muy abundante (9.5 % del área total en dos secciones de 77.7 y 41.1 cm<sup>2</sup>), está parcialmente recubierta de schreibersita y contiene esférulos de kamacita y taenita. La sección más grande muestra varios nódulos de troilita-grafito (máxima dimensión: 5-18 mm), localizados en las zonas centrales de la kamacita poligonal. Cada nódulo está recubierto por schreibersita + cohenita. Hemos preservado la morfología original del ejemplar mediante técnicas de moldeo y vaciado (basadas en elastómeros, resinas y escayolas modificadas) y utilizado tecnología de escáner láser en 3D.

**Palabras clave:** meteorito metálico, siderito, octaedrita, complejo IAB grupo principal, España, nuevo hallazgo, preservación de sideritos, molde siderito, imagen digital 3D siderito.

## ABSTRACT

Retuerta del Bullaque is a new Spanish iron meteorite. Found in 1980, has been recovered from the Province of Ciudad Real, near the northern limit of the Cabañeros National Park (39°27'32"N, 4°22'39"W). The specimen is a coarse octahedrite of about 100 kg in weight, with many concave regmaglyphes in one surface and moderate terrestrial weathering. The atmospheric heat-affected rim ( $\leq 1.5$  mm) is partially preserved. Analysis by ICP-AES (Ni: 7.527 and Co: 0.475 in wt%) and by ICP-MS (Ga: 68.9, Ge: 365, As: 13.7, W: 0.95, Ir: 1.95 and Au: 1.70 in ppm) we used to classify the specimen as an IAB complex (Main Group). Chemically, Retuerta del Bullaque iron is similar to Kaalijarv iron but its mineralogy and texture are more like other low Ni-Au irons of main group (e.g. Diablo Canyon). The bulk of the specimen is a Wid-

<sup>1</sup> Museo Geominero, Instituto Geológico y Minero de España, Ríos Rosas 23, 28003 Madrid. Email: r.lozano@igme.es; e.baeza@igme.es; ruth.gonzalez@igme.es; r.jimenez@igme.es

<sup>2</sup> Laboratorios de Tres Cantos, Instituto Geológico y Minero de España. La Calera 1, 28760 Tres Cantos, Madrid. Email: j.reyes@igme.es

<sup>3</sup> Instituto de Geociencias (CSIC, UCM), Facultad de Ciencias Geológicas, José Antonio Nováis 2, 28040 Madrid. Email: jcgrapto@geo.ucm.es

manstätten kamacite (band-width estimated at  $2.0 \pm 0.3$  mm) with large and tabular crystals of cohenite and polygonal kamacite without cohenite that exhibits abundant Neumann lines. Schreibersite (irregular crystals + rhabdite) is rare in the two sectors. Taenite is present in thick lamellae between kamacite bands and pearlitic plessite. Lamellar cohenite is very abundant (9.5% of the total area into two sections 77.7 and 41.1 cm<sup>2</sup>), is partially covered of schreibersite and contains kamacite-taenite spherules. The larger sections display irregularly shaped troilite-graphite nodules (max. size, 5-12 mm), located in the central areas of the kamacite polygonal sectors. Each nodule has a rim of schreibersite + cohenite. The original morphology of the specimen was preserved making replicas as molds and casts (using elastomers, resins and modified plasters) and a 3D-laser scan.

**Key words:** Iron meteorite, octaedrite, IAB complex (MG), Spain, new meteorite find, preservation of iron meteorites, meteorite replica, meteorite 3D scan image.

## Introducción

El registro de caídas y la recuperación de meteoritos en territorio español se remonta al siglo XVIII, aunque hasta finales del siglo XIX no se documentaron los primeros hallazgos de ejemplares desvinculados de caídas concretas (Martín Escorza, 1987). Entre todos los meteoritos españoles de los que existe constancia material o escrita, y que por tanto figuran en los registros internacionales, algunos se hallan en paradero desconocido, como por ejemplo la condrita ordinaria caída en 1704 cerca de Barcelona, de la que en su momento llegaron a recuperarse varios fragmentos (Llorca, 2004).

La mayor colección de meteoritos españoles radica en el Museo Nacional de Ciencias Naturales (Madrid), y consta de piezas procedentes de 21 localidades (Muñoz-Espadas *et al.*, 2002; García Guinea *et al.*, 2006), incrementadas posteriormente con algunos fragmentos procedentes de la caída que tuvo lugar en 2007 en Puerto Lápice (Ciudad Real: Llorca *et al.*, 2009; Trigo-Rodríguez *et al.*, 2009). Aparte de la colección mencionada, el meteorito de Valencia se conserva en la universidad de esta ciudad y fragmentos de los meteoritos de Zaragoza, Berlanguillas (Berlanga de Roa, Burgos) y Roda (La Puebla de Roda, Huesca) se hallan en instituciones estadounidenses.

El catálogo oficial de meteoritos españoles constaba, hasta finales de 2012, de un total de 28 registros avalados por la *Meteoritical Society*, que es la organización que regula toda la información relacionada con estos cuerpos a nivel mundial. La relación comprendía 21 localidades con condritas ordinarias, tres sideritos, dos acondritas, un mesosiderito y un aerolito sin clasificar. Además de ellos, la lista española menciona ocho meteoritos dudosos y dos pseudometeoritos, uno de los cuales

(la escoria de Getafe) alcanzó en su día cierta notoriedad (García Guinea *et al.*, 2005).

De los tres meteoritos metálicos registrados hasta 2012 en España, el primero del que se tiene constancia es el de Quesa (Valencia), caído el 1 de agosto de 1898 (Boscá y Casanoves, 1899) e identificado como un siderito del complejo IAB (clasificación de Wasson & Kallemeyn, 2002). Su masa principal (algo menos de 11 kg) se conserva en el Museo de Historia Natural de Viena (Austria), y 8.5 g del mismo en el Museo Nacional de Ciencias Naturales (Muñoz-Espadas *et al.*, 2002; García Guinea *et al.*, 2006).

El segundo de los meteoritos metálicos españoles fue hallado en 1912 en Colomera (Granada: Dorronsoro & Moreno Martín, 1934). Se trata de un siderito del grupo IIE, de unos 134 kg de peso, del que se conservan cuatro ejemplares en el Museo Nacional de Ciencias Naturales, que suman 120.342 kg (Muñoz-Espadas *et al.*, 2002; García Guinea *et al.*, 2006).

Finalmente, el tercer siderito español se clasifica en el grupo de IVA anómalos (IVA-an), con una masa original de 162 kg. Las circunstancias de su hallazgo son confusas, pues al parecer fue obtenido en Zaragoza por un coleccionista privado en la década de 1950. A su muerte, su viuda lo puso en venta y fue adquirido en la feria internacional de Munich (Alemania) del año 2006, por el conocido buscador de meteoritos norteamericano Mike Farmer. Aunque el meteorito consta oficialmente como “Zaragoza” (Weisberg *et al.*, 2009, tabla 9), sus coordenadas oficiales corresponden a la plaza del Pilar de esta ciudad, por lo que su origen español podría incluso resultar incierto. Indagando en la materia hemos logrado averiguar que, antes de ser vendido en Munich, el meteorito habría sido adquirido en Francia a la familia del propietario original, conservándose hasta entonces junto con la pieza

una anotación escrita, que situaba su hallazgo en las proximidades de La Almunia de Doña Godina (Zaragoza).

En este trabajo presentamos el descubrimiento de un nuevo meteorito metálico en las proximidades de Retuerta del Bullaque (Ciudad Real), que se suma a esta lista tan reducida de sideritos españoles. Conforme dictan los protocolos establecidos internacionalmente, el primer paso fue comunicar el hallazgo a la *Meteoritical Society*, aportando el estudio preliminar que apoyaba su clasificación. Tras analizar la documentación remitida, la Sociedad aprobó oficialmente su inclusión en la base de datos mundial de meteoritos, donde ingresó el 1 de enero de 2013, siendo nombrado conforme a su localidad de hallazgo. El resumen de las características principales, la historia del hallazgo y la clasificación del nuevo siderito puede consultarse en el catálogo “on line” de la *Meteoritical Society* ([www.meteoriticalsociety.org](http://www.meteoriticalsociety.org)) y se publicará próximamente en uno de los dos volúmenes del *Meteoritical Bulletin* correspondiente a 2014 (*Meteoritics & Planetary Science*, en preparación). Por lo que se refiere a la localización física del meteorito de Retuerta del Bullaque, su masa principal permanece por el momento en la localidad homónima, en manos de su descubridor, si bien el Museo Geominero (Instituto Geológico y Minero de España, Madrid) conserva tres fragmentos y cuatro probetas pulidas que constituyen el material tipo.

Este trabajo tiene como objetivo realizar una primera descripción del nuevo meteorito español, aportando datos precisos de la composición química y textural que sustentan su clasificación. También se presenta la caracterización química de sus componentes minerales principales y accesorios, y se describe la metodología utilizada para preservar la morfología del ejemplar original de cara a su exhibición y estudios futuros.

### Circunstancias y localización del hallazgo

La primera referencia acerca del descubrimiento de un posible meteorito en Retuerta del Bullaque se remonta al 23 de febrero de 2011, cuando Marisol Asensio López, natural de la localidad, entra en contacto con uno de los autores (JCG-M) y le comunica la sospecha del origen extraterrestre de una masa metálica descubierta por su hermano Faustino, conservada desde hace más de 30 años en

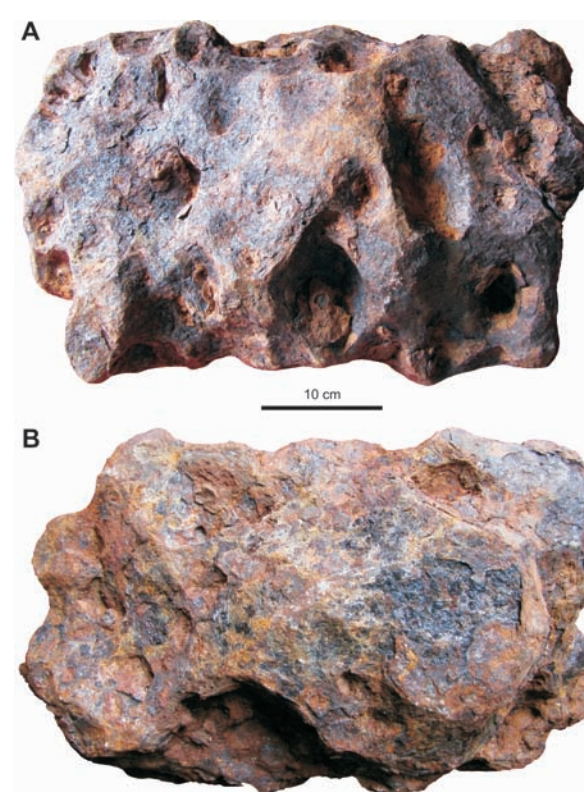


Fig. 1.—Aspecto general del meteorito de Retuerta del Bullaque, fotografiado por su cara anversa (A) y reversa (B), la primera con abundantes regmaglifos (depresiones cóncavas) en la superficie.

el domicilio familiar. Éste pasó a considerarla como un probable meteorito a raíz del avistamiento de una gran estrella fugaz sobre Valencia y Cataluña el 18 de febrero de 2011, una noticia que recibió amplio tratamiento en televisión y otros medios de comunicación, y llevó a Faustino a interpretar un origen similar para la roca que tenía en su patio. El coautor del trabajo dirigía por entonces un proyecto de investigación geológica en la zona, con participación de personal del Museo Geominero, orientado al conocimiento de la geodiversidad del Parque Nacional de Cabañeros, buena parte de cuyo territorio se ubica en el término municipal de Retuerta del Bullaque. Personado el equipo científico en el lugar, de inmediato quedó claro que podría tratarse de un meteorito metálico por su densidad tan elevada y los más que probables regmaglifos. En la superficie generada tras tomar una muestra, se observaron además gruesas líneas con tres orientaciones distintas, al modo de las figuras de Widmanstätten. El problema es que éstas sólo se

hacen visibles tras el ataque químico de la superficie metálica con una solución ácida, debido a la diferente solubilidad de la taenita y kamacita, comprobándose tiempo después que en realidad estaban formadas por grandes cristales de carburo de Fe y Ni (cohenita), con propiedades muy diferentes a las de la matriz metálica. No obstante, las muestras tomadas del objeto pronto confirmaron que se trataba de un auténtico siderito.

Las circunstancias del descubrimiento del meteorito se conocen bastante bien a través del testimonio directo de los hermanos Faustino y Román Asensio López. El primero de ellos fue quien lo halló en un campo de cultivo, próximo a donde apacentaban el ganado en compañía de su padre, Eusebio Asensio Fernández, en fecha indeterminada hacia el año de 1980. Faustino refiere que le pareció una piedra muy curiosa, porque era tan pesada que apenas podía moverla (aprox. 100 kg), y junto a su padre y hermano determinaron su carácter metálico, interpretándolo como una posible chatarra bélica de la Guerra Civil española. El objeto reposaba en superficie sin rastro alguno de cráter, y Faustino decidió arrastrarlo bajo una encina contigua (aún en pie) para poderlo encontrar con facilidad en el futuro. Allí permaneció varios años, hasta que en 1983 el padre decidió llevárselo a la casa familiar en Retuerta del Bullaque. Con la ayuda de sus hijos y una carretilla, lograron acarrear el objeto hasta el automóvil que habían dispuesto para el transporte.

Una vez en la casa, el meteorito fue empleado en primer lugar como “peso de carga”, en el prensado de jamones, durante la fase de salazón. Para ello lo metieron en una resistente caja de plástico con asas, que permitía levantarlo y moverlo con facilidad. Cuando la familia abandonó la tradición de realizar la “matanza” anual, el meteorito fue trasladado al patio y allí permaneció los casi 15 años siguientes, abandonado y expuesto a la intemperie. Durante este periodo, el objeto se utilizó esporádicamente para divertirse con las visitas, ya que gracias a su elevada densidad resultaba ser mucho más pesado de lo que daba a entender su tamaño. La larga exposición a los agentes atmosféricos condujo al evidente deterioro de la superficie del ejemplar que, de tener inicialmente un aspecto “oxidado”, en palabras del propio descubridor, comenzó a “descascarillarse” por la humedad y el paso del tiempo. En este periodo, el agua de lluvia indujo una cierta oxidación superficial, que se tradujo en la formación de costras de oxi-hidróxidos de hierro, algunos de vivos colores anaranjados y amarillentos.

En cuanto a la localización concreta del hallazgo, los hermanos Faustino y Román Asensio López han podido señalarlo de una manera muy precisa, llevándonos al punto contiguo a la encina a donde fue trasladado el meteorito hacia 1980, y que se sitúa en las coordenadas 39° 27' 32''N y 4° 22' 39''O, unos 2 km al este del cementerio de Retuerta del Bullaque (Ciudad Real). Desde el punto de vista geológico, se trata de un campo de labor roturado en un antiguo abanico aluvial, derivado del frente de sierra que forma la Cuarcita Armoricana del flanco norte del sinclinal de Navas de Estena. Martín-Serrano & Nozal Martín (1989) cartografiaron el territorio e interpretaron el abanico como una secuencia de tercera generación, claramente diferenciada tanto de la raña plio-pleistocena (secuencia 1), como de los conos aluviales pleistocenos, que enmarcan el inicio de la red de drenaje actual. Precisamente uno de estos últimos es el que disecta el abanico donde fue hallado el meteorito (secuencia 3), discurriendo entre ambos el arroyo del Valle del Robledillo, que vierte aguas al río Bullaque. Un pequeño arroyo tributario del anterior exhuma en su margen derecha pizarras del Ordovícico Medio paleoalteradas, que se sitúan inmediatamente al sureste de la encina contigua al punto de hallazgo. Gracias al pequeño desnivel creado por este segundo arroyo, puede observarse que los depósitos del abanico antiguo, donde se asienta el campo de labor, son ciertamente exigüos, con un espesor preservado de poco más de 1 m.

La ausencia de estructuras de impacto y la conservación relativamente buena con la que fue hallado el meteorito (sin las costras de oxidación actuales, pero con vestigios de la corteza de fusión), apuntan a que éste permaneció largo tiempo enterrado en el abanico aluvial, siendo imposible de averiguar si su afloramiento obedeció a causas naturales o a las antiguas labores agrícolas (no se aprecian marcas de arado), que en todo caso aceleraron la erosión del suelo. De cualquier modo, por sus circunstancias geológicas se descarta que se trate de un paleometeorito anterior o contemporáneo al depósito de la raña, debido no sólo a su disociación de aquélla, sino a la intensa alteración edáfica que la caracteriza, bajo cuyo régimen el meteorito no hubiera llegado a nosotros en su estado actual.

Por otro lado, parece poco probable que los flujos que generaron el abanico antiguo donde se enmarca el hallazgo, hubieran sido capaces de arrastrar el meteorito desde alguna zona alejada, ni siquiera considerando un transporte en masa de alta



densidad, juzgando los tamaños decrecientes de los bloques y cantos de cuarcita desde la cabecera del abanico. Ello deja abierta la posibilidad de que la caída pueda haber sido contemporánea (a grandes rasgos) de la tercera secuencia regional de abanicos, a su vez algo posterior a la raña y previa a la estructuración del drenaje actual. La datación de la raña sigue suscitando debate, vinculándose su génesis con la tectónica tardialpina del Mioceno o, alternativamente, con una inflexión en la evolución geológica regional, que podría haber culminado en el Pleistoceno (Martín-Serrano & Nozal Martín, 2008). En la región de los Montes de Toledo, la génesis de la raña se data tradicionalmente como Villafranquiense (entre 1 y 2.5 millones de años), un término continental que equivaldría básicamente al Gelasiense y a parte del Calabriense (Pleistoceno “inferior”) de la escala cronoestratigráfica internacional. De poder confirmarse esta datación para las dos primeras secuencias locales, que mantienen una estrecha continuidad entre sí, la tercera generación de abanicos antiguos podría situarse en torno al límite Calabriense/Pleistoceno medio, coincidiendo tentativamente con la edad máxima de caída del meteorito.

La única hipótesis alternativa para el hallazgo del meteorito, implicaría especular con que éste pudiera haber sido transportado desde otro lugar con propósitos desconocidos. Sin duda no podría haber sido en tiempos de los asentamientos neolíticos, romanos o medievales documentados en la comarca, coincidentes con una gran “sed de metales”, en los que un elemento como éste hubiera sido aprovechado, de no haber estado enterrado. La población de Retuerta experimentó altibajos a partir del repoblamiento comarcal del siglo XV, viviendo de la explotación de la dehesa, hasta los cambios políticos y administrativos que tienen lugar entre 1833 y 1855, cuando se independiza del señorío feudal toledano y, por agotamiento de la riqueza arbórea, se intensifica la agricultura. En una comarca en proceso de reestructuración y carente de ferrerías, un meteorito como el que nos ocupa pudo, por su peso y singularidad, ser utilizado incluso de mojón demarcador de antiguas lindes. En tal sentido hemos comprobado que el punto de hallazgo se sitúa a unos 160 m del antiguo camino de la Fuente de la Hiedra, de orientación suroeste-noreste, que aparece recogido en dos mapas topográficos confeccionados en 1956 y 1976, y que se reconoce todavía en fotografías aéreas por la concentración diferencial de vegetación arbustiva.

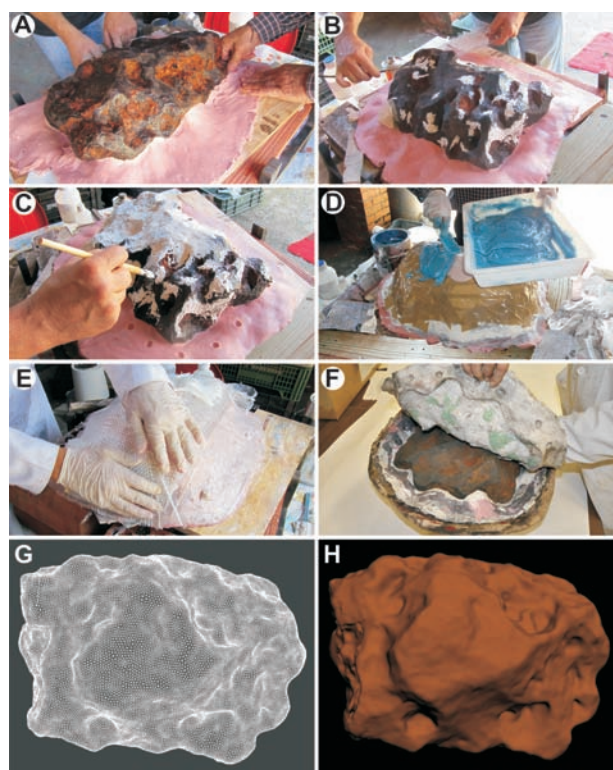


Fig. 2.—Principales pasos en la preparación del molde, carcasa y escaneado. A: Elaboración del plano que divide la pieza en dos partes (dos mitades del molde) con plastilina. B: Oclusión de grietas con silicona tixotrópica. C: Pincelado de la primera capa de silicona del molde. D: Aplicación de la primera capa de poliéster CM2 de la carcasa. E: Refuerzo de la carcasa con fibra de vidrio tejida. F: Extracción del positivo. G y H: Imágenes tridimensionales derivadas del escaneado en 3D

No obstante lo anterior, la interpretación geológica es la que nos parece más probable, en ausencia de evidencias de intervención humana o de crónicas históricas que hubiesen documentado la caída de un cuerpo celeste en la zona. Es también la hipótesis que permite explicar mejor el largo periodo de enterramiento del meteorito, compatible con su estado de conservación en el momento del descubrimiento y, sobre todo, con los vestigios de corteza de fusión aún presentes en el ejemplar.

## Metodología de estudio

El trabajo desarrollado sobre el meteorito de Retuerta del Bullaque siguió tres fases esenciales: la primera consistió en documentar la masa y forma original, que culminó en la selección de puntos para la toma de muestras con vistas a su clasificación y

Tabla 1.—Química mineral

|       | Kamacita |       |          |       |          |        | Taenita |       |          |       |          |       |
|-------|----------|-------|----------|-------|----------|--------|---------|-------|----------|-------|----------|-------|
|       | Banda    |       | Esférulo |       | Plessita |        | Banda   |       | Esférulo |       | Plessita |       |
|       | 1        | 2     | 3        | 4     | 5        | 6      | 7       | 8     | 9        | 10    | 11       | 12    |
| Fe    | 93.8     | 93.8  | 92.9     | 93.5  | 93.0     | 94.2   | 60.9    | 67.9  | 67.3     | 68.7  | 84.6     | 59.3  |
| P     | 0.02     | 0.02  | 0.04     | 0.07  | 0.05     | 0.02   | 0.02    | 0.01  | n.d.     | 0.01  | 0.03     | 0.01  |
|       | 6.7      | 5.8   | 6.4      | 5.8   | 6.3      | 5.4    | 38.3    | 31.2  | 32.4     | 29.8  | 15.0     | 39.5  |
| S     | n.d.     | 0.02  | n.d.     | n.d.  | n.d.     | n.d.   | n.d.    | n.d.  | 0.01     | n.d.  | 0.01     | 0.01  |
| Cu    | n.d.     | n.d.  | n.d.     | n.d.  | n.d.     | n.d.   | 0.14    | 0.04  | n.d.     | n.d.  | n.d.     | 0.03  |
| Co    | 0.37     | 0.32  | 0.57     | 0.34  | 0.56     | 0.54   | 0.19    | 0.23  | 0.24     | 0.44  | 0.20     | 0.18  |
| Cr    | 0.05     | 0.04  | 0.02     | 0.04  | n.d.     | n.d.   | n.d.    | n.d.  | 0.06     | 0.01  | 0.04     | 0.01  |
| Total | 100.87   | 99.92 | 99.93    | 99.73 | 99.98    | 100.19 | 99.57   | 99.36 | 100.02   | 99.06 | 99.90    | 99.02 |

7: borde, 8: núcleo, 11: borde, 12: núcleo.

|                  | Cohenita |        | Schreibersita |        |       |        |                |        | Troilita |
|------------------|----------|--------|---------------|--------|-------|--------|----------------|--------|----------|
|                  | Lamela   | Nódulo | Cristales     |        |       |        | Recubrimientos |        |          |
|                  | 1        | 2      | 3             | 4      | 5     | 6      | 7              | 8      |          |
| Fe               | 91.45    | 91.80  | 41.51         | 41.33  | 46.68 | 50.59  | 48.64          | 66.38  | 61.00    |
| P                | n.d.     | 0.00   | 14.71         | 15.02  | 14.84 | 15.54  | 15.21          | 15.44  | n.d.     |
| Ni               | 1.27     | 1.07   | 43.81         | 43.59  | 37.01 | 33.95  | 35.98          | 18.07  | 0.12     |
| S                | 0.01     | n.d.   | n.d.          | n.d.   | 0.01  | 0.01   | 0.00           | 0.03   | 38.33    |
| Co               | 0.17     | 0.25   | 0.15          | 0.14   | 0.16  | 0.07   | 0.17           | 0.36   | 0.10     |
| Cr               | 0.07     | 0.00   | 0.01          | 0.01   | 0.01  | 0.01   | 0.05           | 0.01   | 0.47     |
| Total            | 92.97    | 93.13  | 100.18        | 100.09 | 98.70 | 100,17 | 100,05         | 100,27 | 100,02   |
| C <sup>(1)</sup> | 7.03     | 6.87   |               |        |       |        |                |        |          |
| Fe               | 2.912    | 2.937  | 1.512         | 1.504  | 1.717 | 1.812  | 1.762          | 2.379  | 0.949    |
| P                | 0.000    | 0.000  | 0.967         | 0.985  | 0.984 | 1.003  | 0.994          | 0.998  | 0.000    |
| Ni               | 0.038    | 0.032  | 1.518         | 1.509  | 1.295 | 1.157  | 1.240          | 0.616  | 0.002    |
| S                | 0.001    | 0.000  | 0.000         | 0.000  | 0.001 | 0.001  | 0.000          | 0.002  | 1.039    |
| Co               | 0.005    | 0.008  | 0.003         | 0.002  | 0.003 | 0.001  | 0.003          | 0.006  | 0.002    |
| Cr               | 0.002    | 0.000  | 0.000         | 0.000  | 0.000 | 0.000  | 0.001          | 0.000  | 0.008    |
| C                | 1.041    | 1.023  |               |        |       |        |                |        |          |
| Suma             | 4.000    | 4.000  | 4.000         | 4.000  | 4.000 | 4.000  | 4.000          | 4.000  | 2.000    |

<sup>(1)</sup> Calculado por diferencia entre el 100% y el total analítico.

3: Rhabdita, 4: cristales irregulares en el borde de plessita, 5: cristales irregulares en el núcleo de plessita, 6: cristales irregulares en lamelas de kamacita, 7: recubrimiento cohenita lamelar, 8: recubrimiento nódulos, 9: nódulo. n.d.: no detectado.

descripción; en la segunda, se procedió al análisis químico y textural de las mismas; y la tercera fase consistió en la realización de una réplica del ejemplar (física y digital). Esta última se detalla en epígrafe aparte y persigue garantizar la preservación de la morfología inicial de la pieza de cara a un posible

seccionado posterior. También para facilitar la modelización y musealización del meteorito e incluso, para prever la degradación, destrucción o pérdida del original, posibilidades que cuentan con algunos antecedentes entre alguno de los hallazgos españoles.

Para el análisis y clasificación del meteorito retorteño, hemos adoptado la metodología seguida por D’Orazio & Folco (2003), utilizando equipamientos científicos ubicados en distintos laboratorios.

En el área de Laboratorios y Servicios del IGME (Tres Cantos, Madrid), dispusimos de un equipo Agilent 7500 ce de espectrometría de masas y plasma con acoplamiento inductivo (ICP-MS), así como un equipo Varian Vista-MPX de espectrometría de emisión atómica y plasma con acoplamiento inductivo (ICP-AES). Con ellos analizamos dos muestras correspondientes a sectores metálicos de las bandas de Widmanstätten, sin rastro textural de modificaciones posteriores. El primer sector, formado casi exclusivamente por kamacita, lo dividimos en dos partes sigladas como RB-1 y RB-2. Atacamos la primera muestra con ácido nítrico 6M (ICP-AES + ICP-MS) y la segunda con agua regia (ICP-MS). El segundo sector es igualmente rico en kamacita, aunque contiene algunas pequeñas plessitas (kamacita+taenita). Dividimos la muestra tomada en este sector en las partes RB-3 y RB-4, procesando cada fragmento separadamente, del mismo modo que en el caso anterior. No disponemos de materiales certificados de referencia de sideritos, necesarios para poder estimar los errores asociados a las determinaciones analíticas. Los controles que se llevan a cabo sobre otro tipo de materiales permiten estimar los errores entre 2 y 5% para las determinaciones realizadas por ICP-AES y entre 2 y 10% para las medidas efectuadas por ICP-MS.

Los análisis de Difracción de Rayos X (DRX), encaminados a la identificación mineral, se abordaron también en los Laboratorios de Tres Cantos (IGME), utilizando un equipo X’PERT PRO de Panalytical con tubo de Cu (40 mA; 40 kV), monocromador de grafito y rendija automática. Lo reducido del material aconsejó la realización de microanálisis sobre portamuestras de “fondo cero” de silicio. El software utilizado para la identificación es el High Score® de Panalytical y la base de datos PDF-2 de ICDD.

Para proceder al análisis de la química mineral contamos con cuatro probetas pulidas, que confeccionamos incluyendo pequeñas porciones del meteorito en resina y puliendo posteriormente el conjunto. Su estudio se llevó a cabo en el Centro Nacional de Microscopía Electrónica “Luis Bru” de la Universidad Complutense de Madrid, utilizando una Microsonda Electrónica JEOL JXA-8900M, bajo condiciones de trabajo de 20 keV y diámetro del haz electrónico de aproximadamente 5 µm.

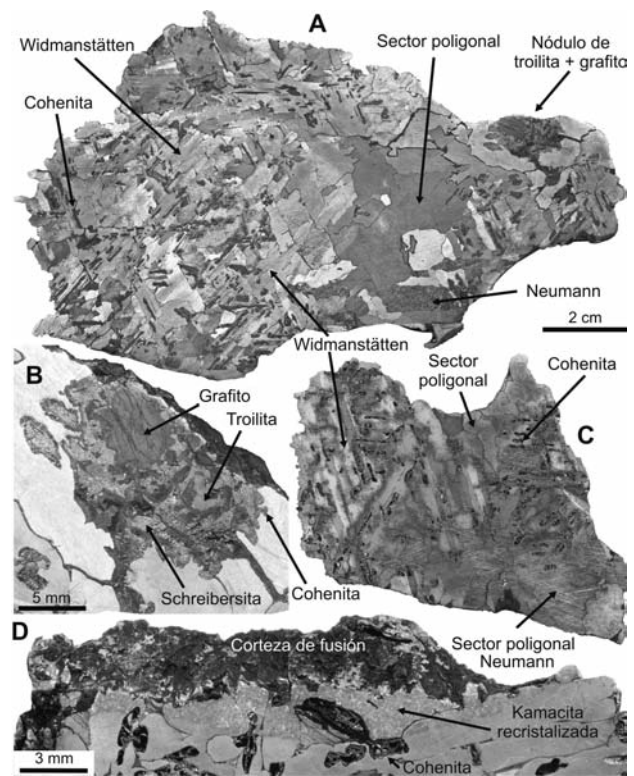


Fig. 3.—A: Sección pulida y atacada con Nital del holotipo (14279R) de Retuerta del Bullaque mostrando las figuras de Widmanstätten y el sector poligonal con un nódulo de troilita + grafito. La cohenita está orientada siguiendo las direcciones octaédricas de las figuras de Widmanstätten. B) Detalle del nódulo de troilita + grafito. El núcleo de troilita + grafito está recubierto por schreibersita gruesa y de nuevo recubierto por una fina costra de cohenita. C) Sección pulida y atacada con Nital del cotipito (14280R) de Retuerta del Bullaque. D: Borde de kamacita recristalizada por el calentamiento debido a la fricción atmosférica.

Como patrones de referencia empleamos silicatos sintéticos y naturales, así como óxidos y metales. Para la obtención de imágenes utilizamos el modo de electrones retrodispersados.

El seccionado inicial del meteorito para la toma de muestras se desarrolló en una cerrajería radicada en Las Ventas con Peña Aguilera (Toledo). A partir del primer corte, realizamos nuevas secciones, para obtener superficies homogéneas, en otra empresa especializada de Cerceda (Madrid), con el recurso de una sierra específica para el corte de metales refrigerada con agua. Una vez pulidas, atacamos las secciones con Nital (3% de HNO<sub>3</sub> y 97% de alcohol etílico) durante un periodo máximo de 30 segundos. Las imágenes de petrografía general del meteorito se tomaron sobre estas superficies pulidas y atacadas con Nital, utilizando un escáner convencional (Epson Perfection V500 Photo).



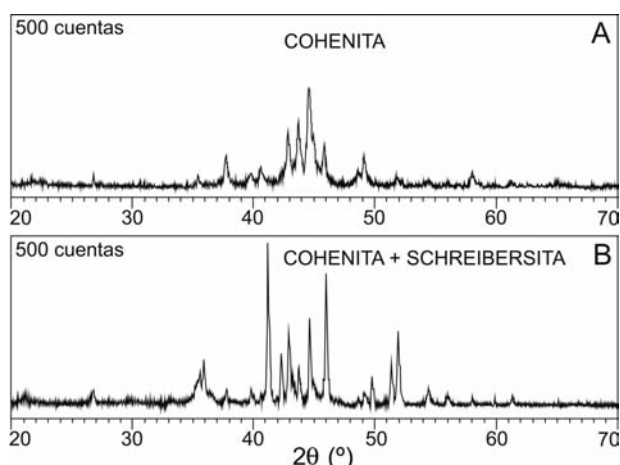


Fig. 4.—Espectros de Difracción de Rayos X. A: cohenita laminar. B: cohenita + schreibersita nodular.

### Morfología del meteorito y depósito del material tipo

El ejemplar original pesa cerca de 100 kg, y mide 45 x 31 x 20 cm. El siderito tiene una morfología prismática irregular, con dos caras principales de contorno casi rectangular y bordes abruptos. Una de las caras (Fig. 1A) presenta numerosas concavidades amplias, correspondientes a regmaglifos, que resultan más escasos en la cara opuesta (Fig. 1B). Los regmaglifos de la cara anversa carecen de orientación preferente y varios alcanzan 3-4 cm de diámetro y 1.5-3 cm de profundidad. El regmaglifo de mayores dimensiones tiene un contorno elíptico y mide 8 cm de longitud en su eje mayor y 3 cm de profundidad. La superficie del meteorito está moderadamente oxidada y resulta bastante frágil, debido a la presencia de numerosas costras de oxidación que se desprenden con facilidad. Aunque el color de la superficie fresca es casi negro, en muchas zonas hay parches de óxi-hidróxidos de hierro con tonalidades anaranjadas y amarillentas, especialmente conservados en las depresiones de los regmaglifos.

En el momento de redactar este trabajo, la masa principal del meteorito permanece en manos de su propietario y descubridor (Faustino Asensio López) en su domicilio de Retuerta del Bullaque. El material tipo que ha servido para su clasificación e inclusión oficial en la base de datos internacional de meteoritos, ha sido depositado por los autores en la colección de meteoritos del Museo Geominero (IGME, Madrid), junto con el molde y las dos pri-

meras réplicas (R14282 y R14283) del meteorito original. El material tipo consta de cuatro fragmentos de 1278 g (prominencia externa con superficie pulida, 14279R), 388 g (prominencia externa con superficie pulida, 14280R) y 50 g (sección pulida, 14281R), además de las cuatro probetas pulidas utilizadas para la química mineral y la petrografía de detalle (14275R, 14276R, 14277R y 14278R).

### Realización de réplicas del ejemplar

La interesante morfología externa y la incertidumbre acerca del futuro de la masa principal, nos decidieron a replicar la forma y dimensiones exactas del meteorito, preservándolas para la posteridad. El proceso es muy útil y cuenta con numerosos antecedentes incluso en meteoritos españoles. Así, el hallazgo del meteorito de Quesa (Valencia) en 1898 se vio envuelto en circunstancias parecidas, lo que justificó la fabricación por aquel entonces de un molde de escayola (Martín Escorza, 1987), en tanto que la mayor parte del meteorito original acabó en un museo austriaco. En este nuevo hallazgo la historia podría llegar a repetirse, implicando incluso la dispersión de secciones del original en múltiples colecciones. Sin embargo y a diferencia del meteorito citado, los materiales y métodos para producir una réplica son hoy en día mucho más precisos y sofisticados (técnicas de moldeo y vaciado basadas en elastómeros, resinas y escayolas modificadas), además de poder obtenerse un escaneado láser del objeto en tres dimensiones.

El replicado exacto del ejemplar requirió la fabricación de un molde de dos piezas con carcasa. La realización del mismo a partir de un elemento muy pesado y relativamente pequeño, planteó un gran reto técnico, sobre todo a la hora de voltear el original. Por este motivo, los espesores del molde y la carcasa fueron mucho más gruesos de lo habitual, con el fin de que pudieran soportar el peso del siderito, evitando que el negativo pudiera deformarse.

La figura 2 ilustra diversos pasos en la realización del molde y la carcasa. En primer lugar aplicamos sobre la superficie del meteorito un consolidante de nitrato de celulosa, diluido en un disolvente específico al 5%, para evitar el desprendimiento de las costras de oxidación. Después aplicamos un desmoldeante en spray (Molykote) y, con la pieza descansando sobre su eje mayor, generamos un plano de plastilina libre de sulfuros (NSP) que dividió la pieza en dos mitades (Fig. 2A). Para facilitar



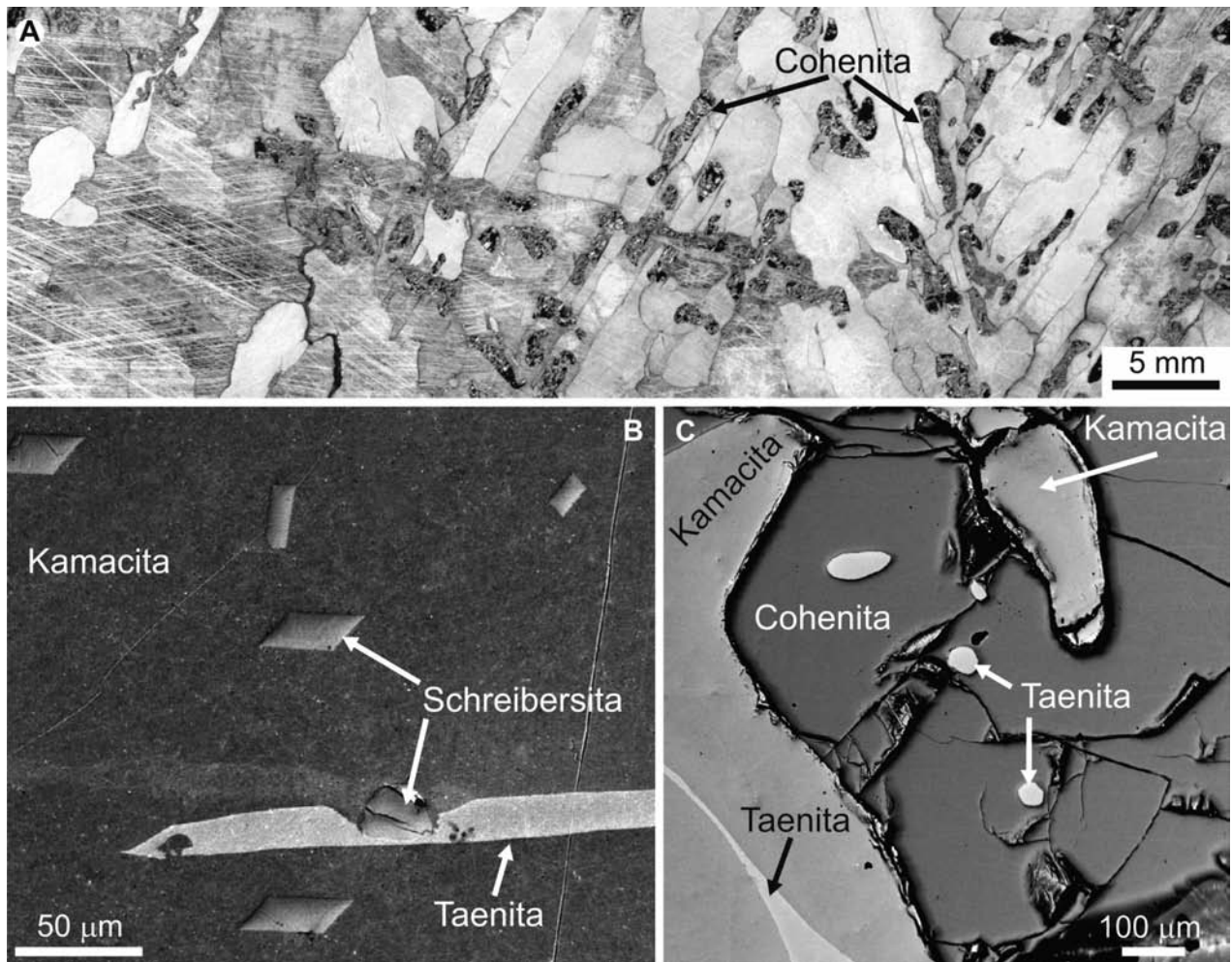


Fig. 5.—A: Sección pulida y atacada con Nital del meteorito de Retuerta del Bullaque, mostrando las figuras de Widmanstätten con cohenita (derecha), así como el sector poligonal con abundantes líneas de Neumann (izquierda). B: Schreibersita alotriomorfa e idiomorfa (rhabdita) junto a taenita lamelar, ambas incluidas en kamacita. Imagen de electrones retrodispersados. C: Esférulas de kamacita y taenita en un cristal de cohenita. Imagen de electrones retrodispersados.

el relleno de los agrietamientos superficiales, aplicamos silicona tixotrópica (RTV-2, Silastic 3481) a la que incorporamos un catalizador rápido (Fig. 2B). Para que el negativo alcanzara un espesor aproximado de 2 cm, se hicieron necesarios hasta cuatro pincelados de silicona de diferentes colores (para control de capas) (Fig. 2C), intercalando una red de nylon. Una vez terminado el pincelado de una de las dos partes del molde, insertamos llaves cilíndricas de silicona y aislamos la superficie con una película de polietileno transparente, como paso previo a la fabricación de la carcasa de sujeción (Fig. 2D). La base de ésta fue poliéster CM2 con fibra de vidrio incorporada y un agente colorante, indicador del grado de curado (Fig. 2E). Para refor-

zar la estructura de la carcasa (proceso necesario debido al peso del meteorito), incorporamos a la misma una pieza longitudinal de madera (DM). Una vez consolidada la carcasa volteamos el conjunto, para completar la otra parte del molde y la carcasa, siguiendo la misma metodología.

Para el vaciado del molde (Fig. 2F) elegimos combinar dos escayolas de precisión, en lugar de optar por una resina epoxi convencional. La primera capa fue pincelada con escayola dental “Arquero”, a la que se añadió un 5% de “Primal” (SF 126ER) y diferentes pigmentos, con el fin de simular el color de base del siderito. Para la segunda capa recurrimos a la escayola “Exaduro”, previamente humectada. Antes del fraguado de las escayolas, atornilla-

mos el molde y terminamos de conformar el volumen de la réplica mediante volteo. Con la escayola completamente fraguada, incorporamos mecánicamente una capa de grafito (Plumbagina) y patinamos las zonas correspondientes a los parches de alteración, con pigmentos rojos y amarillos diluidos en “Primal”. También se utilizaron tintes acrílicos de color azul metalizado, hasta reproducir el aspecto final del ejemplar.

Por último, hemos empleado tecnología de escáner láser para generar imágenes tridimensionales del meteorito (Fig. 2G). Su preservación virtual en 3D servirá a futuros trabajos de investigación y, además, constituye un elemento didáctico muy útil en ámbitos museísticos (Belmonte *et al.*, 2012). Para la digitalización del elemento se empleó un escáner láser Konica Minolta VI-910 Non-Contact 3D Digitalizer, ubicado en el Departamento de Pintura-Restauración de la Facultad de Bellas Artes (Universidad Complutense de Madrid). Los archivos obtenidos de este modo (.obj), los renderizamos utilizando el programa Autodesk 3ds Max, con el fin de generar una animación en 3D del meteorito. La animación tridimensional resultante (Fig. 2H) es de acceso libre a través de la página web del Museo Geominero ([www.igme/museo.es](http://www.igme/museo.es)).

## Petrografía y mineralogía

Para el estudio de la textura general del meteorito de Retuerta del Bullaque, hemos atacado dos secciones con Nital ( $77.7 + 41.1 \text{ cm}^2$ ) (Fig. 3A-B). Ambas secciones muestran dos sectores diferentes: a) zona con claras figuras de Widmanstätten (ancho de banda:  $2.0 \pm 0.3 \text{ mm}$ ) que incluyen abundantes cristales lamelares de cohenita (+ schreibersita accesoria) (9.5% del área total) y b) zona poligonal sin cohenita (Fig. 3A-C). En la sección más grande, hay algunos pequeños nódulos (5–8 mm) formados por troilita + cohenita (+ schreibersita accesoria) (Fig. 3A). Además, cerca del borde de la sección, un nódulo algo más grande (máxima dimensión 18 mm) está formado por un intercrecimiento de troilita + grafito, recubierto por schreibersita y cohenita (Fig. 3B). Invariablemente, los nódulos están siempre incluidos dentro de la kamacita poligonal.

Hemos caracterizado cohenita y schreibersita mediante DRX (Fig. 4) y también hemos comprobado la presencia de troilita y grafito con la misma técnica.

Aunque los procesos de oxidación han eliminado prácticamente la corteza de fusión, hemos observado un pequeño sector (máximo 3 mm de profundidad) con límites cóncavos, donde los cristales de kamacita (Widmanstätten) se han transformado en un agregado de grano fino de cristales irregulares (10–100  $\mu\text{m}$ ) (Fig. 3D).

La mayor parte de la kamacita del meteorito de Retuerta del Bullaque se encuentra en las bandas de Widmanstätten y en los sectores poligonales (media de Ni: 6.23 % en peso; media de Co: 0.34 % en peso;  $n = 28$ ) (Tabla 1) (Fig. 3A-C; Fig. 4A). Los cristales habitualmente muestran un apretado entramado de líneas de Neumann (sobre todo los poligonales) (Fig. 5A) e incluyen pequeños cristales idiomorfos de schreibersita (rhabdita, 5–50  $\mu\text{m}$ ) (Fig. 5B). Algunas esférulas ovaladas de kamacita (máx. dimensión: 150–400  $\mu\text{m}$ ) se sitúan en el interior de la cohenita (media de Ni: 6.17 % en peso; media de Co: 0.50 % en peso;  $n = 7$ ) (Fig. 5C). Por último, la kamacita también forma parte de plessitas perlíticas (media de Ni: 5.74 % en peso; media de Co: 0.51 % en peso;  $n = 11$ ), con dimensiones máximas de 0.3–3 mm (Fig. 6A).

Acompañando a la kamacita, la taenita se sitúa en delgadas lamelas (0.02–0.3 mm) en las bandas de Widmanstätten (media de Ni: 34.60 % en peso, media de Co: 0.18 % en peso;  $n = 9$ ) (Tabla 1 y Fig. 5B-C), en esférulas dentro de la cohenita (máx. diámetro: 20–50  $\mu\text{m}$ ) (media de Ni: 31.56 % en peso, media de Co: 0.29 % en peso;  $n = 9$ ) (Tabla 1 y Fig. 5C) y en plessitas perlíticas ubicadas en los espacios intersticiales entre las bandas de Widmanstätten (media de Ni: 34.19 % en peso, media de Co: 0.17 % en peso  $n = 30$ ) (Tabla 1 y Fig. 6A). La taenita esferulítica es químicamente homogénea pero en los cristales lamelares y en las plessitas, la proporción de Fe y Ni varía considerablemente. La taenita lamelar (entre bandas de kamacita) tiene los bordes enriquecidos en Ni. Por el contrario, en las plessitas perlíticas, la taenita del borde es pobre en Ni y se enriquece progresivamente hacia el núcleo de la plessita (Tabla 1).

La cohenita ocupa dos posiciones texturales diferentes (lamelar y recubriendo los nódulos de troilita + grafito), aunque su composición química es similar (Tabla 1). La mayor parte de la cohenita es tabular (incluida en las bandas de kamacita que forman las figuras de Widmanstätten), aunque las secciones muestran morfologías lamelares de perfil algo irregular (0.2–1.5 mm de grosor y 1–13 mm de longitud) (Fig. 3A-C y 5A). Mucho menos abundante, la

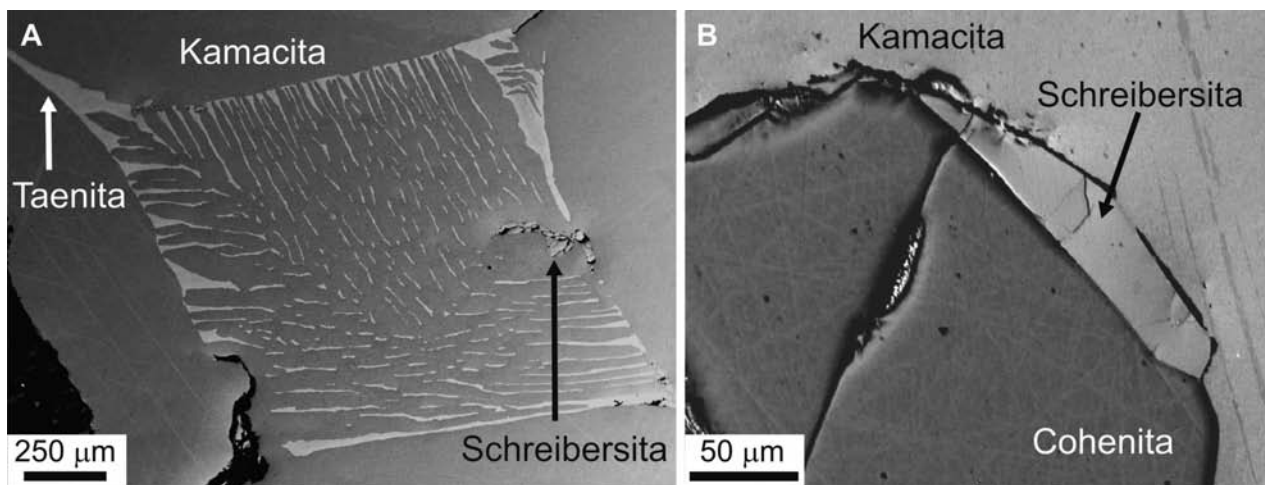


Fig. 6.—A: Plessita perlítica con una inclusión de schreibersita. B: Schreibersita recubriendo un cristal lamelar de cohenita. Imágenes de electrones retrodispersados.

cohenita que recubre la parte externa de los nódulos de troilita + grafito, adquiere un grosor comprendido entre 0.2 y 0.8 mm (Fig. 3B). En ambas situaciones texturales, la cohenita tiene un contenido medio en Ni de 1.40 % en peso, con algo de Co (media: 0.17 % en peso;  $n=17$ ). El total analítico medio es bajo (93.56 % en peso) debido a la presencia de C. El contenido medio de este elemento (6.44 % en peso), calculado mediante la diferencia entre el 100 % y el total analítico, es similar al C estequiométrico de la cohenita (Weinschenk, 1889).

La schreibersita es relativamente abundante en el meteorito de Retuerta del Bullaque. La composición química de este mineral está relacionada con la posición petrográfica y también con el tamaño de los cristales (cuanto más pequeños, mayor contenido de Ni; Vdovykin, 1972) (Tabla 1). Comúnmente, la schreibersita recubre parcialmente a la cohenita lamelar (30–150  $\mu\text{m}$  de grosor) y tiene un contenido medio de Ni y P de 35.64 % en peso y 14.28 % en peso, respectivamente ( $n=9$ ) (Fig. 6B). La kamacita contiene cristales alotriomorfos e idiomorfos de schreibersita (Fig. 5B). El contenido medio en Ni de los primeros (50–150  $\mu\text{m}$ ) es 33.72 % en peso y el P medio es de 15.70 % en peso ( $n=4$ ). Los cristales idiomorfos (rhabdita) (5–50  $\mu\text{m}$ ) tienen un contenido medio en Ni de 42.77 % en peso, mientras que el P medio es 14.87 % en peso ( $n=10$ ) (Fig. 3B). Hemos encontrado algunos cristales de morfología irregular, asociados espacialmente a las plessitas (Fig. 6B). Las schreibersitas del borde plessítico (30–50  $\mu\text{m}$ ) son ricas en Ni (media: 44.17 % en peso) y contienen algo más de P que las rhabditas (media de P:

15.30 % en peso;  $n=7$ ). Por el contrario, los cristales del interior de las plessitas son más grandes (100–120  $\mu\text{m}$ ) pero más pobres en Ni (media: 38.14 % en peso) y P (media: 14.59 % en peso;  $n=4$ ). Por último, la schreibersita recubre la parte externa de los nódulos de troilita + grafito (0.5–1.8 mm) (Fig. 3B). Su contenido medio en P es similar a los anteriores tipos (14.99 % en peso), aunque incorpora mucho menos Ni (18.05 % en peso;  $n=7$ ).

Los cristales de cohenita del meteorito de Retuerta del Bullaque son muy grandes (hasta 13 mm, Fig. 3A-C y 5A), similares a los encontrados en el siderito de Cañón del Diablo, donde las secciones de este mineral pueden alcanzar más de 8 mm de longitud (Moore *et al.*, 1967). La presencia de cohenita (9.5 % de la superficie) indica que este nuevo siderito se formó a partir de fundidos con un cierto contenido en C, típicos de muchos meteoritos del grupo principal del complejo IAB (Scott & Goldstein, 2012). El enfriamiento del fundido debió producirse a alta presión, ya que la cohenita se forma con altos regímenes barométricos (Lipschutz & Anders, 1963; Brett, 1966; Tsuzuki *et al.*, 1984; Kaminsky & Wirth, 2011).

Al igual que los cristales de cohenita, la presencia de nódulos de troilita-grafito de tamaño centimétrico es común en los meteoritos IAB (Kissin, 1979). Probablemente, los nódulos del meteorito de Retuerta del Bullaque (Fig. 3A-C), se formaron a partir de la cristalización de un magma residual inmiscible (dentro del sistema Fe–Ni–S–C) (Pravdivtseva *et al.*, 2008), a temperaturas cercanas al eutéctico (Scott & Goldstein, 2012).



Tabla 2.—Composición química del metal

| Muestra             | ICP-AES    |            |           |           | ICP-MS     |            |            |            |            |            |            |
|---------------------|------------|------------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|                     | Ni<br>mg/g | Co<br>mg/g | P<br>µg/g | S<br>µg/g | Cr<br>µg/g | Mn<br>µg/g | Cu<br>µg/g | Zn<br>µg/g | Ga<br>µg/g | Ge<br>µg/g | As<br>µg/g |
| RB-1 <sup>(1)</sup> | 70.59      | 4.57       | 2288      | 31        | 1.41       | 2.16       | 111        | 52.5       | 70.3       | 387        | 14.4       |
| RB-3 <sup>(1)</sup> | 79.94      | 4.92       | 2049      | 17        | <7.1       | 2.10       | 125        | 70.4       | 67.4       | 343        | 12.9       |
| Media               | 75.27      | 4.75       | 2169      | 24        |            | 2.13       | 118        | 61.5       | 68.9       | 365        | 13.7       |

<sup>(1)</sup>Muestra disuelta con ácido nítrico 6M.

| Muestra             | ICP-MS     |            |            |           |            |            |            |            |            |            |            |
|---------------------|------------|------------|------------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|                     | Mo<br>µg/g | Sn<br>µg/g | Sb<br>µg/g | W<br>µg/g | Ru<br>µg/g | Rh<br>µg/g | Pd<br>µg/g | Os<br>µg/g | Ir<br>µg/g | Pt<br>µg/g | Au<br>µg/g |
| RB-2 <sup>(2)</sup> | 3.34       | 4.22       | 1.34       | 1.0       | 6.80       | 1.70       | 3.94       | 2.66       | 1.97       | 11.50      | 2.00       |
| RB-4 <sup>(2)</sup> | 3.12       | 3.91       | 0.61       | 0.9       | 6.68       | 1.67       | 3.85       | 1.71       | 1.92       | 7.42       | 1.39       |
| Media               | 3.23       | 4.07       | 0.98       | 1.0       | 6.74       | 1.69       | 3.90       | 2.19       | 1.95       | 9.46       | 1.70       |

<sup>(2)</sup>Muestra disuelta con agua regia.

Los contenidos de Ni y Au del meteorito de Retuerta del Bullaque son similares a los encontrados en los sideritos de Kaalijarv y La Serena (Wasson & Kallemeyn, 2002). No obstante, el meteorito de Retuerta del Bullaque es muy rico en cohenita, mientras que en estos dos meteoritos no se ha descrito este mineral (Semenenko *et al.*, 1982; Wasson & Canut de Bon, 1998). La mineralogía (incluyendo cohenita) y la textura de este nuevo meteorito es común a muchos de los sideritos integrantes del grupo principal del complejo IAB, aunque con contenidos algo menores en Ni y Au, como Cañon del Diablo (Vdovykin, 1972), Campo del Cielo (Bunch *et al.*, 1970), Morasko (Kuzminski, 1980) o Smithville (Weinschenk, 1889). Otros sideritos del complejo IAB, pero más ricos en Ni y con contenidos similares de Au (pertenecientes al subgrupo sLL de Wasson & Kallemeyn, 2002), también presentan la misma mineralogía y textura, como por ejemplo el meteorito de Toluca (Bunch *et al.*, 1970).

El mosaico de cristales irregulares del borde externo del siderito de Retuerta del Bullaque (Fig. 3D), indica la recristalización de la kamacita por el calentamiento producido al atravesar la atmósfera. La temperatura alcanzada durante la ablación atmosférica fue de al menos 700° C, ya que la kamacita recristaliza por encima de esta temperatura (D'Orazio *et al.*, 2006). El mosaico cristalino es similar al que forma el ribete de calentamiento atmosférico en el siderito de Withrow (Read *et al.*, 1967), en el de Lac Dodon (Kissin & Herd, 1997)

o en el recientemente clasificado NWA 6163 (Garvie, 2012). Dado que el grado de oxidación terrestre es moderado y conserva efectos del calentamiento atmosférico, la caída del meteorito debe de haber sido relativamente reciente en términos geológicos, compatible con su hipotética datación pleistocena.

## Clasificación

La clasificación actual de los sideritos tiene un carácter principalmente químico, donde adquiere gran relevancia el contenido en algunos elementos que se encuentran en muy pequeñas proporciones (trazas). La técnica más adecuada es la Activación Neutrónica, ya que tiene límites de detección muy bajos y el análisis es no destructivo (Wasson *et al.*, 1989). No obstante, se ha demostrado que la combinación de análisis realizados con ICP-AES e ICP-MS, es igualmente válida para clasificar sideritos (D'Orazio & Folco, 2003; Xu *et al.*, 2008).

Los contenidos en Ni, Ga y Ge son parámetros geoquímicamente importantes. El Ni es un parámetro independiente del resto de elementos y se correlaciona directamente con el ancho de las bandas de Widmanstätten (a mayor contenido en Ni, más estrechas son las bandas; Goldstein *et al.*, 2009). Ga y Ge son los elementos siderófilos más volátiles, por lo que su fraccionación es muy útil a la hora de distinguir grupos de sideritos (Goldberg *et al.*,

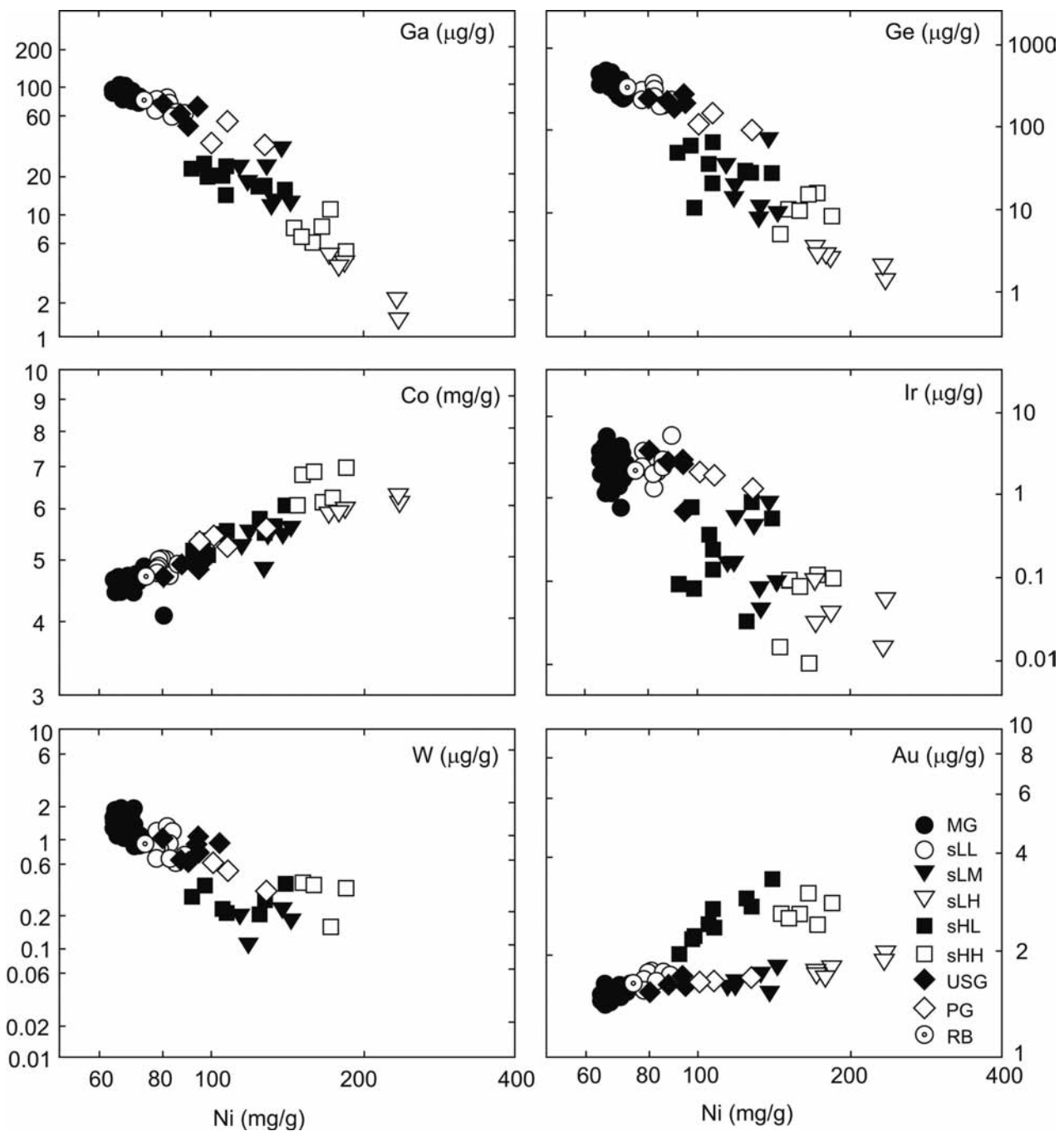


Fig. 7.—A: Situación geoquímica del siderito de Retuerta del Bullaque (RB) con referencia a la clasificación de Wasson & Kallemeyn (2002): IAB-MG, grupo principal del complejo IAB; sLL: subgrupo bajo en Au y Ni; sLM: subgrupo bajo en Au y medio en Ni; sLH: subgrupo bajo en Au y alto en Ni; sHL: subgrupo alto en Au y bajo en Ni; sHH: subgrupo alto en Au y Ni; USG: Grupo de Udei Station ; PG: Grupo de Pitts. Datos tomados de Wasson & Kallemeyn (2002).

1951). También es notable el valor geoquímico de Co, W e Ir. Este último se utiliza para discriminar si dos sideritos del mismo lugar estaban originalmente emparejados (Malvin *et al.*, 1984). Las pautas de

clasificación aceptadas actualmente incluyen el Au como parámetro independiente porque su coeficiente de partición entre el estado sólido y líquido es menor que el del Ni y sitúa mejor las muestras den-

tro de la secuencia de cristalización fraccionada (Wasson & Kallemeyn, 2002).

Siguiendo los criterios de clasificación de Wasson & Kallemeyn (2002), el meteorito de Retuerta del Bullaque pertenece al grupo principal del complejo IAB de sideritos no magmáticos (IAB complex, Main Group: Fig. 7). El grosor de las bandas de Widmanstätten ( $2.0 \pm 0.3$  mm), es coherente con el contenido medio en Ni de la kamacita (6.23 % en peso) y con el contenido global del siderito (Ni: 7.53 % en peso), e indica que se trata de una octaedrita gruesa.

## Conclusiones

De acuerdo con el catálogo internacional de meteoritos elaborado por la *Meteoritical Society*, el ejemplar de Retuerta del Bullaque pasa a ocupar el puesto 84 del listado mundial de sideritos (grupo principal del complejo IAB). También representa el cuarto meteorito metálico descubierto hasta la fecha en España, cuyo máximo exponente nacional sigue siendo el ejemplar de Colomera (Granada), en tanto que subsisten las dudas acerca de la procedencia del llamado meteorito de Zaragoza.

Los análisis químicos de ICP-AES e ICP-MS revelan el contenido en elementos mayores en el nuevo meteorito español (Ni y Co), así como toda una serie de elementos traza (P, S, Cr, Mn, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Mo, Sn, Sb, W, Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt y Au), algunos de ellos con gran valor para la clasificación geoquímica.

El estudio textural indica que el meteorito de Retuerta del Bullaque es una octaedrita gruesa, rica en cohenita. La textura es la típica en este tipo de sideritos no magmáticos: figuras de Widmanstätten, líneas de Neumann, plessitas perlíticas y nódulos de troilita + grafito. La abundancia de cohenita (+ grafito) indica que el fundido original tenía una moderada proporción de C y que el metal se formó bajo presiones elevadas. El contenido en P se traduce en diferentes tipos químicos y texturales de schreibersita, incluidos en el metal o recubriendo el núcleo de los nódulos de troilita + grafito.

La caída del meteorito es relativamente reciente porque la oxidación terrestre es moderada y no llegó a borrar completamente los bordes recristalizados durante el calentamiento atmosférico, especulándose con su posible relación con el depósito del abanico aluvial antiguo (Pleistoceno inferior-medio) donde fue hallado, que representaría su máxima antigüedad posible en función de los datos disponibles.

La preservación de la morfología externa del meteorito permite la exhibición pública de la réplica, junto con los ejemplares tipo utilizados para su clasificación y catalogación oficial. Todos ellos figuran ya en la exposición permanente del Museo Geominero (IGME, Madrid), en cuya dirección de internet ([www.igme/museo.es](http://www.igme/museo.es)) puede visualizarse, además, una animación digital generada a partir de la imagen 3D del nuevo meteorito español.

## AGRADECIMIENTOS

A la familia Asensio López (Faustino, Román y Marisol), descubridores del meteorito hace más de 30 años, por comunicarnos el hallazgo y posibilitar su estudio científico, incluyendo la donación del material tipo depositado en el Museo Geominero. A Begoña del Moral y Juan Antonio Martín Rubí (Área de Laboratorios y Servicios del IGME, Tres Cantos, Madrid) por su contribución a la realización e interpretación de los difractogramas; a María Teresa Andrés, Mercedes Castillo y Eduardo Melgar (Área de Laboratorios y Servicios del IGME, Tres Cantos, Madrid) por la preparación de las muestras y las medidas por ICP-MS e ICP-AES; a Livia Vidal (Universidad Complutense de Madrid), por el escaneado del ejemplar en la Facultad de Bellas Artes de dicha institución; a Pepa Torres (Museo Geominero, IGME) y Viviana Vasco por su colaboración en los trabajos de contaje modal digitalizado y renderización del modelo en 3D; a Alfredo Larios por su asesoramiento con la Microsonda Electrónica; y a José Vicente Casado (Litos, León) por la información testifical concerniente al siderito español etiquetado como "Zaragoza". La tarea de seccionar una parte del meteorito fue posible gracias al interés y al empeño brindados por los operarios de la Cerrajería Santiago Isabel Garrido, en Las Ventas con Peña Aguilera (Toledo), así como de la empresa Construcciones Metálicas Lorenzo, S.L., de Cerceda (Madrid). Por último, agradecemos la colaboración de Enrique Díaz (IGME) en la edición del manuscrito y también los comentarios críticos realizados por Javier García Guinea y un revisor anónimo. Este trabajo es una contribución al proyecto 52/2009 (Geodiversidad e Itinerarios Geológicos en el Parque Nacional de Cabañeros) de la Red de Parques Nacionales (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino).

## Referencias

- Belmonte, S.L.R.; Zucolotto, M.E.; Fontes, R.C. & dos Santos, J.R.L. (2012). 3-D virtual and physical reconstruction of Bendego iron. *75th Annual Meteoritical Society Meeting*. Cairns, Australia, 5149.pdf.
- Boscá y Casanoves, E. (1899). El meteorito de Quesa (Valencia). *Anales de la Sociedad Española de Historia Natural*, 28: 53-56.
- Brett, R. (1966). Cohenite in meteorites: a proposed origin. *Science*, 153: 60-62. doi:10.1126/science.153.3731.60



- Bunch, T.E.; Keil, K. & Olsen, E. (1970). Mineralogy and petrology of silicate inclusions in iron meteorites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 25: 297-340. doi:10.1007/BF00399290
- D'Orazio, M. & Folco, L. (2003). Chemical analysis of iron meteorites by Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry. *Geostandards Newsletters*, 27-3: 215-225.
- D'Orazio, M.; Folco, L.; Welten, K.C.; Caffee, M.W.; Perchiazzi, N. & Rochete, P. (2006). Miller Butte 03002: a new rare iron meteorite (IID) from Antarctica. *European Journal of Mineralogy*, 18: 727-738. doi:10.1127/0935-1221/2006/0018-0727
- Dorransoro, J. & Moreno Martín, F. (1934). Sobre un hierro meteórico de la provincia de Granada. *Anales de la Sociedad Española de Física y Química*, 32: 1111-1115.
- García-Guinea, J.; Sanchez-Chillón, B.; Mazo, A.; Tormo, L.; González-Martín, R.; Correcher, V. & Pardo-Mayora, J.M. (2005). Nuevos datos sobre la escoria de Getafe caída en un vehículo en 1994. *Geogaceta*, 37: 159-162.
- García Guinea, J.; Martín Escorza, C.; Fernández Hernán, M.; Sánchez Muñoz, L.; Correcher, V.; Sánchez Chillón, B. & Tormo, L. (2006). Meteoritos españoles del Museo Nacional de Ciencias Naturales. *Estudios Geológicos*, 62-1: 11-30.
- Garvie, L.A.J. (2012). *The Meteoritical Bulletin*, 99: E15. *Meteoritics & Planetary Science*, en prensa. doi:10.1111/maps.12026
- Goldberg, E.; Uchiyama, A. & Brown, H. (1951). The distribution of nickel, cobalt, gallium, palladium and gold in iron meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2-1: 1-25.
- Goldstein, J.I.; Scott, E.R.D. & Chabot, N.L. (2009). Iron meteorites: crystallization, thermal history, parent bodies, and origin. *Chemie der Erde*, 69: 293-325. doi:10.1016/j.chemer.2009.01.002
- Kaminsky, F.V. & Wirth, R. (2011). Iron carbide inclusions in lower-mantle diamond from Juina, Brazil. *The Canadian Mineralogist*, 49-2: 555-572.
- Kissin, S.A. (1979). The sulfide mineralogy of the group IAB iron meteorites. *Meteoritics*, 14: 444-446.
- Kissin, S.A. & Herd, R.K. (1997). Two new iron meteorites from the Province of Quebec, Canada. *Meteoritics & Planetary Science*, 32: 317-319. doi:10.1111/j.1945-5100.1997.tb01269.x
- Kuzminski, H. (1980). The actual state of research into the Morasko meteorite and the region of its fall. *Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia*, 31: 58-62.
- Lipschutz, M. & Anders, E. (1963). Cohenite as a pressure indicator in iron meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 28: 699-711. doi:10.1016/0016-7037(64)90086-9
- Llorca, J. (2004). Meteoritos y cráteres. Ed. Milenio, Lleida, 189 p.
- Llorca, J.; Casanova, I.; Trigo, J.M.; Madiedo, J.M.; Roszjar, J.; Bischoff, A.; Ott, U.; Franchi, I.A.; Greenwood, R.C. & Laubenstein, M. (2009). The Puerto Lápice eucrite. *Meteoritics & Planetary Science*, 44-2: 159-174.
- Malvin, D.J.; Jones, J.H. & Drake, M.J. (1984). Investigations concerning the magmatic iron meteorites: Static vs. dynamic experiments (abstract). *47th Annual Meteoritical Society Meeting*, 48: 785.
- Martín Escorza, C. (1987). Fenómenos meteoríticos ocurridos en España. *Boletín de la Institución Libre de Enseñanza*, 3: 51-68.
- Martín-Serrano, A. & Nozal Martín, F. (1989). Mapa y Memoria de la Hoja nº 710 (Retuerta de Bullaque) del Mapa Geológico de España a escala 1:50.000 (Segunda serie). Instituto Tecnológico GeoMinero de España, Madrid, 39 pp.
- Martín-Serrano, A. & Nozal Martín, F. (2008). Red fluvial, raiñas y relieves apalachianos del Macizo Ibérico. En: García-Cortés, A. (ed.), *Contextos Geológicos españoles. Una aproximación al patrimonio geológico español de relevancia internacional*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid: 184-191.
- Moore, C.B.; Birrell, P.J. & Lewis, C.F. (1967). Variations in the chemical and mineralogical composition of rim and plains specimens of the Cañon Diablo meteorite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 31: 1885-1892. doi:10.1016/0016-7037(67)90129-9
- Muñoz-Espadas, M.J.; Martínez-Frías, J.; Lunar, R.; Sánchez, B. & Sánchez, J. (2002). The meteorite collection of the National Museum of Natural Sciences, Madrid, Spain: An updated catalog. *Meteoritics & Planetary Science*, 37 (Supplement): B89-B94. doi:10.1111/j.1945-5100.2002.tb00907.x
- Pravdivtseva, O.; Meshik, A.; Petaev, M. & Hohenberg, C.M. (2008). I-Xe ages and the thermal history of the Toluca IAB meteorite. *39th Lunar and Planetary Science Conference*, Texas, EEUU. 2504.pdf.
- Read, W.F.; Grizzle, E.D. & Grizzle, W.M. (1967). Withrow, a new iron meteorite from the state of Washington. *Meteoritics*, 3-4: 219-229.
- Scott, E.R.D. & Goldstein, J.I. (2012). Occurrence of carbides and graphite in iron meteorites and origin of C-rich irons. *43rd Lunar and Planetary Science Conference*. 2671-2672.
- Semenenko, V.P.; Samoilovich, L.G. & Kozlov, I.S. (1982). Features of impact-induced metamorphism in the Kaalijarv meteorite. *Meteoritika*, 41: 96-100.
- Trigo-Rodríguez, J.M.; Borovicka, J.; Llorca, J.; Madiedo, J.M.; Zamorano, J. & Izquierdo, J. (2009). Puerto Lápice eucrite fall: Strewn field, physical description, probable fireball trajectory, and orbit. *Meteoritics & Planetary Science*, 44-2: 175-186.
- Tsuzuki, A.; Sago, S.; Hirano, S.I. & Naka, S. (1984). High temperature and pressure preparation and properties of iron carbides Fe<sub>7</sub>C<sub>3</sub> and Fe<sub>3</sub>C. *Journal of Materials Science*, 19: 2513-2518. doi:10.1007/BF00550805
- Vdovykin, G.P. (1973). The Canyon Diabole meteorite. *Space Science Review*, 14: 758-831. doi:10.1007/BF00224776
- Wasson, J.T. & Canut de Bon, C. (1998). New Chilean iron meteorites: Medium octahedrites from Northern Chile are unique. *Meteoritics and Planetary Science*, 33-2: 175-179.

- Wasson, J.T. & Kallemeyn, G.W. (2002). The IAB iron-meteorite complex: a group, five subgroups, numerous grouplets, closely related, mainly formed by crystal segregation in rapidly cooling melts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66: 2445-2473. doi:10.1016/S0016-7037(02)00848-7
- Wasson, J.T.; Ouyang X.; Wang J. & Jerde, E. (1989). Chemical classification of iron meteorites: XI. Multi-element studies of 38 new irons and the high abundance of ungrouped irons from Antarctica. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53: 735-744. doi:10.1016/0016-7037(89)90016-1
- Weisberg, M.K., Smith, C., Benedix, G., Herd, C.D.K., Righter, K., Haack, H., Yamaguchi, A., Chennaoui Aoudjehane, H. & Grossman, J. 2009. The *Meteoritical Bulletin*, No. 96, September 2009. *Meteoritics & Planetary Science*, 44-9: 1355-1397.
- Weinschenk, E. (1889). Ueber einige Bestandtheile des Meteoreisens von Magura, Arva, Ungarn. *Annalen des K.K. Naturhistorischen Hofmuseums*, 4: 93-101.
- Xu, L.; Miao, B.; Lin, Y. & Ouyang, Z. (2008). Ulasitai: A new iron meteorite likely paired with Armanty (IIIE). *Meteoritics & Planetary Science*, 43-8: 1263-1273.

Recibido el 4 de marzo de 2013  
Aceptado el 23 de abril de 2013