

# Caracterización mineralógica de los yacimientos de grafito del Complejo Anatéctico de Toledo

/ IVÁN MARTÍN-MÉNDEZ (1\*), ESTER BOIXEREU (1), CARLOS VILLASECA (2)

(1) Instituto Geológico y Minero de España. Calle Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid (España)

(2) Dpto. Petrología y Geoquímica, Facultad Geología, Instituto de Geociencias IGEO (UCM, CSIC), Madrid (España)

## INTRODUCCIÓN

El grafito está considerado por la Unión Europea como un mineral crítico debido a que tiene una gran importancia estratégica en la industria electrónica y de los nuevos materiales, y a que los yacimientos en Europa son escasos.

Los principales yacimientos de grafito del mundo se encuentran en terrenos granulíticos, como son los del estado de Orissa en la India y los del Complejo granulítico Precámbrico de Wannai en Sri Lanka. También existen otros yacimientos de menor importancia en México y Madagascar (Luque et al., 1992).

En la península Ibérica los yacimientos de grafito son muy escasos, los más importantes se encuentran en Málaga (Peridotitas de la Serranía de Ronda, ligado a sulfuros en rocas ultrabásicas), en Huelva (Almonaster la Real, Cortegana, Aroche y Santa Ana la Real, en áreas de alto grado metamórfico), en Segovia (El Muyo, Madriguera, Becerril y Ayllón, ligado a pizarras negras) y en Toledo (Luque et al., 1992).

En Toledo, las mineralizaciones de grafito aparecen asociadas al Complejo Anatéctico de Toledo (CAT). Éstas fueron explotadas durante el siglo XX. Destacan las minas de Guadamur y la mina "La Española" (Puebla de Montalbán), y fueron durante más de dos décadas, (1939-1961), prácticamente las únicas productoras de grafito en la península. El resto de producción de grafito española, en esa época, procedía de las minas situadas en el Protectorado de Marruecos (Tabla 1).

El presente artículo tiene como objetivo realizar una caracterización física y petrográfica de las mineralizaciones de grafito que aparecen asociadas al citado complejo anatéctico.

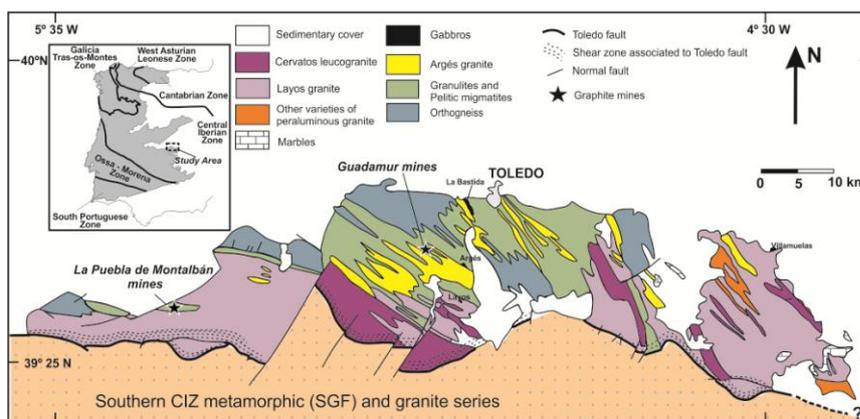


Figura 1. Localización de las zonas mineralizadas dentro del Complejo Anatéctico de Toledo (modificado de Barbero y Villaseca, 2004).

## CONTEXTO GEOLÓGICO

El CAT está situado al sur de la ciudad de Toledo ocupando una superficie de unos 500 km<sup>2</sup> con dirección E-W controlada por el gran accidente tectónico (Banda milonítica de Toledo) que lo separa de los materiales Paleozoicos y Neoproterozoicos de bajo grado del Complejo Esquisto-Grauváquico (Barbero, 1992; Barbero y Villaseca, 2004)

Su límite Norte está delimitado por un conjunto de grandes fracturas alpinas de dirección E-W, que ponen en contacto las rocas de alto grado con los sedimentos Cenozoicos del borde sur de la cuenca del Tajo. Hacia el Sur está limitado por la Banda milonítica de Toledo, una falla dúctil normal que tiene una geometría lítrica en profundidad (Barbero, 1995). Esta zona de cizalla pone en contacto las rocas de alto grado del complejo con los materiales metasedimentarios que forman los Montes de Toledo, y con el plutón de Mora-Las Ventas. En la zona E y W está limitada por los materiales Terciarios que afloran cerca de Tembleque y de Villarejo de Montalbán, respectivamente (Barbero, 1992).

El CAT es un terreno metamórfico de alto grado localizado en la zona interna de la Zona Centro Ibérica. Este alto grado metamórfico es de edad Varisca (314-310 Ma, Castiñeiras et al. 2008) Se distinguen tres grupos principales de rocas en el CAT (Barbero, 1992; Barbero, 1995; Barbero y Villaseca 2004): (1) Rocas metamórficas de alto grado que pueden ser rocas metasedimentarias de facies granulita que muestran estructuras migmatíticas y ortogneises de composición félsica. (2) Granitoides calcoalcalinos (tipo Argés) y rocas básicas asociadas y (3) Granitoides peraluminicos sinorogenicos de carácter anatéctico (tipo Layos y tipo Cervatos) (Fig.1).

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se reconocieron en el campo todos los indicios de grafito de los que se tenía constancia. Se observaron con detalle las relaciones con la roca encajante, así como entre las distintas mineralizaciones y se recogieron muestras para su posterior estudio petrográfico. Se ha utilizado un microscopio óptico petrográfico modelo Carl Zeiss Standard

palabras clave: Grafito, Toledo.

key words: Graphite, Toledo.

Universal Pol binocular. Las fotografías de las láminas delgadas seleccionadas se han tomado a través de un microscopio Olympus BX51 dotado de 8 una cámara fotográfica digital Olympus DP12 (Departamento de Petrología y Geoquímica, UCM).

Por otro lado se seleccionaron una serie de sectores de la lámina petrográfica para la realización de análisis químicos mediante microsonda electrónica, modelo JEOL JXA-8900 M con cinco analizadores WDS, en el centro de Microscopía Electrónica Luis Bru de la Universidad Complutense de Madrid. Las condiciones de medida fueron 15 kV de diferencia de potencial y un haz de electrones de 20 nA de intensidad de corriente y 5 µm de diámetro (para silicatos) y 1 µm (para sulfuros), el tiempo de medida fueron 10 segundos para la posición de pico y 5 segundos para la posición de cada fondo.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el CAT aparecen minerales de alto grado metamórfico principalmente como son la biotita, el granate, la ilmenita, la sillimanita, la cordierita y el feldespato potásico, además del grafito como mineral accesorio y que se encuentra de forma diseminada, normalmente asociado a la biotita (Barbero, 1995).

Las granulitas del CAT muestran gran abundancia de silicatos aluminicos (cordierita, sillimanita y granate y andalucita) y otros minerales principales: cuarzo, feldespato potásico y plagioclasa. Localmente hay ortopiroxeno, espinela y corindón. En el CAT se explotaron dos sectores principales de granulitas para la obtención de grafito: en Puebla de Montalbán (mina La Española) y en Guadamur.



**Figura 2** Grafito concentrado en microbandas de cizalla en la mina La Española (La Puebla de Montalbán).

	Producción de Grafito (toneladas de mineral)			
	La Esp.	Guad.	R. España	Total
1918	0	0	710	710
1919	0	210	1747	1957
1920	0	100	0	6315
1921	0	0	2772	2772
1922	0	0	530	0
1925	0	0	1945	1945
1926	0	0	603	603
1927	0	0	352	352
1938	0	0	72	72
1939	0	0	54	54
1940	0	0	353	353
1941	0	0	23	23
1942	0	0	251	251
1943	57	0	79	136
1944	91	0	959	1050
1945	129	0	2400	2529
1946	305	0	320	625
1947	0	309	0	309
1948	241	0	25	266
1949	256	0	15	271
1950	310	0	3	313
1951	274	0	0	274
1952	453	0	347	800
1953	319	0	0	319
1954	300	0	109	409
1955	317	0	117	434
1956	300	0	124	424
1957	275	0	0	275
1958	206	0	0	206
1959	415	0	0	415
1960	261	0	0	261
1961	275	0	0	275

**Tabla 1.** Producción de grafito en España en el periodo 1918-1961 (Estadísticas Mineras, IGME).

### Mina "La Española" (Puebla de Montalbán)

Está situada al sur del término municipal de La Puebla de Montalbán. Este yacimiento estuvo en explotación entre los años 1943-1947 y de ella se extrajeron unas 530 t de grafito. En las muestras estudiadas se observa

que el grafito aparece asociado a rocas granulíticas, siempre en las zonas con más biotita. A veces hay concentrados de grafito asociados a pequeñas cizallas de 110 42NE y con cristales de similar tamaño que en las zonas más micáceas de las granulitas. (Fig. 2 y 3).



**Figura 3** Muestra de mano de granulita rica en grafito recogida en Puebla de Montalbán, donde pueden observarse las bandas de microcizallas tardías.

### Minas de Guadamur

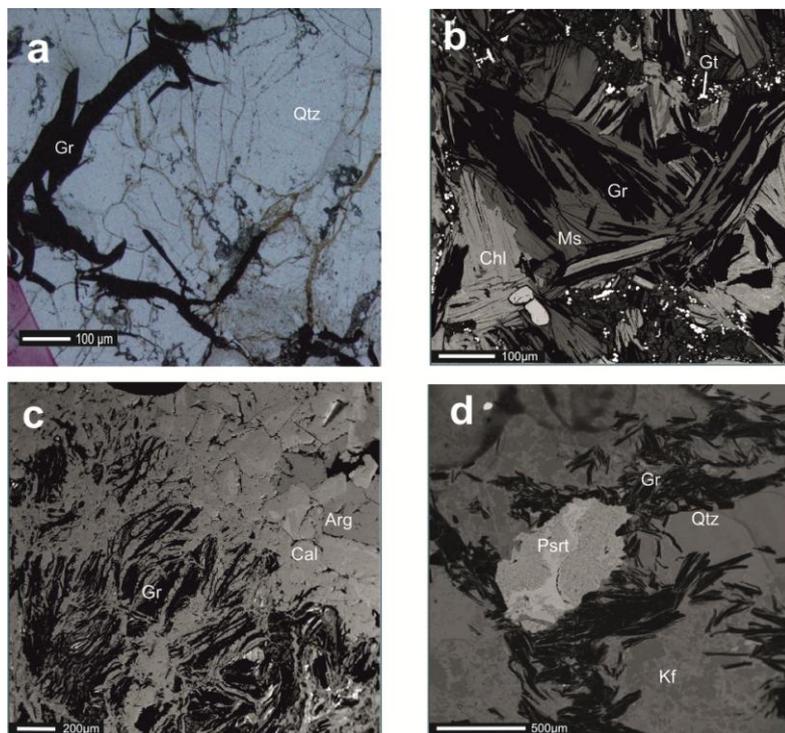
El Coto minero de Guadamur se encuentra situado, al NE de Guadamur, en las proximidades del núcleo urbano (Fig. 4). Estas minas estuvieron en explotación en dos periodos de tiempo, uno que duró apenas dos años, de 1919 a 1920 en la que se extrajeron 310 toneladas, y otro de 1947 a 1961 en la cual se extrajeron unas 4500 toneladas. Éste fue el último yacimiento de grafito explotado en España, cerró en 1961.

El muestreo se realizó en la escombrera de la mina con predominio de rocas filitosas bandeadas con numerosos minerales de alteración. También se recogieron en un afloramiento en el exterior de la mina, muestras de grafito en escamas, que a diferencia de las muestras de las escombreras tenían una textura brechoide con minerales de alteración.

### Caracterización mineralógica

Las muestras recogidas se han identificado con el microscopio petrográfico y se han reconocido minerales accesorios propios de las granulitas: ilmenita, apatito, circón, monacita y xenotima que aparecen en concentraciones variables en muchas de las muestras ricas en grafito estudiadas, sobre todo en las ricas en minerales de alta-T (Fig. 4a).

Se han observado varios tipos de filosilicatos en las muestras, dentro del grupo de las micas se han reconocido biotita, en forma de grandes placas subeuhedrales, de color marrón y un



**Figura 4.** Microfotografías ilustrando texturas del grafito. **Minas de Guadamur:** a Escamas de grafito en cuarzo en una granulita. b Grafito en moscovita, clorita y asociado a goethita. c Venas de calcita con aragonito accesorio en geodas. **Mina La Española:** d Escamas de grafito intersticial con pseudotachilite, cuarzo y feldespato-k. Gr grafito, Qtz cuarzo, Ms moscovita, Chl clorita, Gt goethita, Cal calcita Arg aragonito, Psrt pseudotachilite, Kf feldespato-k.

marcado pleocroísmo, algunas muestran cierta cloritización. La moscovita secundaria es abundante en las muestras de ambas minas, y aparece normalmente asociada al grafito, con colores blanquecinos con una buena foliación y con una anisotropía muy marcada. Suele tener un hábito tabular, formando estructuras en roseta relacionadas con las escamas de grafito (Fig. 4b).

También se ha observado clorita, únicamente en las muestras de Guadamur, indicando una más intensa retrogradación que en la zona de la Puebla de Montalbán. Presenta un relieve bastante bajo y con un color más oscuro lo que la diferencia de la moscovita a la que suele ir asociada. En algunas ocasiones aparece como producto de alteración de la biotita.

La calcita es el carbonato mayoritario en las muestras analizadas y se encuentra en muestras de ambas minas. En la zona de Guadamur la calcita se presenta como cristales prismáticos que rellenan grietas y filoncillos tardíos. Sin embargo, en la mina La Española se observan pequeñas venas con cristales prismáticos de calcita (Fig 4 c).

El grafito que presenta forma de escamas, aparece asociado a biotita primaria o con los filosilicatos secundarios (moscovita, clorita y caolinita) en texturas de forma fibrosa y

en el campo se observa que se concentra en bandas formando franjas ricas en grafito (Figs. 2 y 3) (Martín-Méndez, 2015).

Al microscopio se observa que el tamaño varía, en las zonas granulíticas hasta 450 micras y en las escombreras de las minas, entre 150 y 250 micras.

Los estudios de micro-Raman muestran que el grafito está altamente ordenado con espectros bastante parecidos en todas las muestras y donde no parece observarse pérdida de cristalinidad en las muestras más afectadas por los fluidos hidrotermales (Martín-Méndez et al., 2015).

La cantidad modal de grafito es similar o algo mayor en las rocas metasedimentarias de alto grado del CAT, tanto en las migmatitas como en las granulitas residuales alcanzando hasta el 24%. En las dos zonas mineras estudiadas alcanzan valores de hasta el 14% en algunas de las muestras recogidas en Guadamur, y localmente el 25% (Martín-Méndez, 2015).

Además de estos minerales, se han encontrado otros de aún más baja temperatura como son la jarosita, goethita y la chamosita. Estos forman bandas de oxidación en algunas de las muestras observadas debido a la alteración por medio de fluidos hidrotermales.

Es importante remarcar la existencia de

un pseudotachilite que se ha originado por la alteración de las ilmenitas presentes en el CAT (Fig. 4d).

Este pseudotachilite está hidroxidado (10-12 wt% H<sub>2</sub>O, llegando hasta el 25 wt%), además de tener contenidos bajos en FeO, y contenidos elevados en SiO<sub>2</sub> (23 wt%) and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (23 wt%) (Martín-Méndez et al, 2015)

## CONCLUSIONES

El grafito se encuentra como mineral accesorio en las facies granulíticas del CAT, sin embargo está concentrado en bandas de reparto muy heterogéneo y en algunas cizallas tardías dúctil-frágiles, donde se han desarrollado los trabajos mineros de Guadamur y La Puebla de Montalbán.

En las zonas de cizalla, el grafito aparece asociado a moscovita retrogradada, caolinita y clorita, y otros minerales de alteración como jarosita, goethita, chamosita y ocasionalmente pseudotachilite.

El grafito presenta en todos los casos forma laminar, con un tamaño de grano que varía en las zonas granulíticas (450 micras), al observado en las escombreras de las minas (150-250 micras).

## REFERENCIAS

- Barbero L (1992): *Plutonismo sin-orogénico en un área granulítica Hercínica: El Complejo Anatéctico de Toledo. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid.*
- Barbero, L., Villaseca, C., Rogers, G., Brown, P. (1995): *Geochemical and isotopic disequilibrium in crustal melting: An insight from the anatectic granulites from Toledo, Spain. Journal of Geophysical Research, 100: 15745-15765.*
- Barbero L., Villaseca C. (2004): *El macizo de Toledo. En Geología de Geología de España, (Vera J.A. editor), SGE-IGME, Madrid: 110-115.*
- Luque, F.J., Rodas, M. (1992): *Características geológicas de los yacimientos de grafito. (1992). En recursos minerales de España (García Guinea, J., Martínez Frías J., coord.) CSIC, Madrid: 501-513.*
- Castiñeiras P, Villaseca C, Barbero L, Martín Romera C (2008): *SHRIMP U-Pb zircon dating of anatexis in high-grade migmatite complexes of Central Spain: implications in the Hercynian evolution of Central Iberia. Int J Earth Sci 98: 1609-1624.*
- Martín-Méndez, I. (2015): *Caracterización del Grafito en el Complejo Anatéctico de Toledo. Trabajo de Fin de Máster. Universidad Complutense de Madrid.*
- Martín-Méndez, I., Boixereu, E., Villaseca, C. (2015): *Mineralogical and isotopic characterization of graphite deposits from the Anatectic Complex of Toledo, central Spain. Miner Deposits.*