

Efectos de la alteración hidrotermal en los minerales accesorios del granito de la Cabrera (Sistema Central Español). Estudio al microscopio electrónico de barrido (SEM + EDS).

Ruth GONZÁLEZ LAGUNA¹, Rafael P. LOZANO FERNÁNDEZ^{1,2} y Cesar CASQUET MARTÍN¹.

¹Departamento de Petrología y Geoquímica. Facultad de C.C. Geológicas. Universidad Complutense. Ciudad Universitaria s/n, 28040 Madrid, España.

²Museo Geominero (ITGE). Ríos Rosas, 23, 28003 Madrid, España. E-Mail:

Abstract: The La Cabrera granitic pluton shows several distinctive subsolidus hydrothermal alterations related to either densely microfractured bands, fault selvages and pegmatite-lined miarole rims. Less altered granites contain as the igneous accessory assemblage the following minerals: zircon, thorite, apatite, ilmenite, monazite and xenotime. Based mainly on mineralogical changes, three types of alterations have been recognized from a SEM-EDS study of accessory minerals: Type-I alteration is characterized by the formation of Ca-rich accessory minerals like titanite, apatite, allanite, epidote and Ti-oxides, at the expenses of the igneous minerals; Type-II alteration is characterized by the formation of new hydrothermal monazite, xenotime, Ti-oxides and ilmenite; Type-III alteration gives rise to calcite, fluor-carbonate, pyrite, haematite and Mg-chlorite. The three types of alterations represent successive hydrothermal pulses of unknown age and of progressively decreasing temperature.

Key words: Hydrothermal alteration of granites, monazite, xenotime, allanite, apatite, La Cabrera granite, Spanish Central System.

Resumen: El plutón granítico de La Cabrera muestra varias alteraciones hidrotermales subsolidus relacionadas con bandas con alta densidad de microfracturación, salbandas de fallas y bordes de miarolas tapizadas por pegmatitas. En los granitos menos alterados se reconocen los siguientes minerales accesorios ígneos: circón, torita, apatito, ilmenita, monacita y xenotima. Hemos disitnguido tres tipos de alteraciones sobre la base de cambios mineralógicos, mediante el estudio de los minerales accesorios con SEM-EDS: La alteración Tipo I se caracteriza por la formación de minerales cálcicos como titanita, apatito, allanita, epidota además de óxidos de Ti a partir de los minerales ígneos; la alteración Tipo II, se caracteriza, a su vez, por la formación de nueva monacita y xenotima hidrotermal, además de óxidos de Ti (rutilo?) e ilmenita. La alteración Tipo III da lugar a calcita, fluor-carbonato, pirita, hematites y clorita magnésica. Los tres tipos de alteraciones representan sucesivos pulsos hidrotermales de edad desconocida y de temperatura progresivamente menor.

Palabras clave: Alteración hidrotermal de granitos, monacita, xenotima, allanita, apatito, granito de La Cabrera, Sistema Central Español.

Introducción

La circulación de fluidos hidrotermales a través de las rocas graníticas provoca diferentes tipos de alteraciones de sus minerales, en función de las condiciones físico-químicas del fluido (P_{fluido} , T, fO_2 , pH, etc). La percolación del fluido hidrotermal tiene lugar a favor de discontinuidades (fallas y fracturas) de diversa escala, siendo particularmente importante la que tiene lugar a favor de microfracturas extensionales, reconocibles en la roca en forma de planos de inclusiones fluidas secundarios (PIFS). Estas microfracturas se distribuyen en familias de distinta orientación dentro del macizo rocoso. La alteración asociada a cada familia es máxima en las rocas donde la densidad de microfracturas es más elevada (bandas de alteración), a veces detectables fácilmente a simple vista (p.ej. en el caso de las episienitas, González Casado *et al.*, 1996), y otras no. Asimismo, también se pueden observar alteraciones en fallas (como rellenos y reemplazamientos de las salbandas). La superposición de familias de PIFS de distinta época se corresponde con la sucesión de alteraciones hidrotermales reconocibles a partir del estudio mineralógico y textural de las rocas afectadas. Sin embargo, la complejidad textural de la mineralogía visible al microscopio petrográfico, así como, el pequeño tamaño que presentan a menudo los minerales hidrotermales, conduce frecuentemente a simplificaciones excesivas. En este trabajo, se muestra como el estudio al microscopio electrónico de barrido (SEM + EDS), de los minerales que corrientemente se denominan accesorios en rocas graníticas (p. ej. la monacita y la xenotima), proporciona valiosa información sobre la historia de la alteración hidrotermal, no fácilmente reconocible a partir de los minerales principales.

El estudio se ha realizado en el plutón de La Cabrera (Sistema Central Español), debido a la simplicidad litológica del mis-

mo y a la existencia reconocida de diferentes alteraciones hidrotermales superpuestas relacionadas con bandas de microfracturas y con fallas. Además, este plutón es singular por la presencia de cavidades miarolíticas, a veces de gran tamaño, tapizadas por minerales pegmatíticos tardimagmáticos y rellenas posteriormente por una sucesión compleja de minerales cálcicos, de origen hidrotermal (González del Tánago *et al.*, 1986; Lozano, 1996; González del Tánago, 1997; Lozano *et al.*, 1997; González del Tánago y De La Iglesia, 1998; Lozano *et al.*, 1998; Lozano *et al.*, 1999). Estas alteraciones están sin duda relacionadas con las alteraciones ligadas a bandas microfracturadas y a favor de fallas, reconocidas en el macizo granítico, fuera de las cavidades miarolíticas.

El plutón de La Cabrera está constituido fundamentalmente por granitos biotíticos de grano grueso (monzogranitos) y leucogranitos de grano fino más diferenciados, que a veces presentan cordierita, existiendo además, localmente, facies marginales granodioríticas, biotíticas y biotítico anfibólicas (Fig.1) (Bellido, 1979). Las miarolas son abundantes tanto en el monzogranito como en los leucogranitos.

Aspecto general de las alteraciones.

Consideramos alteraciones, en este trabajo, a los productos, en general, de la acción del fluido hidrotermal, lo que incluye reemplazamientos (alteración s.s.) y también rellenos de espacios abiertos (fracturas o cavidades miarolíticas).

Las alteraciones presentes en el plutón de La Cabrera pueden describirse, en función de su extensión, intensidad y forma, de la siguiente manera:

Alteración regional.

Se ha reconocido en todo el macizo y es de intensidad por lo general débil. No va

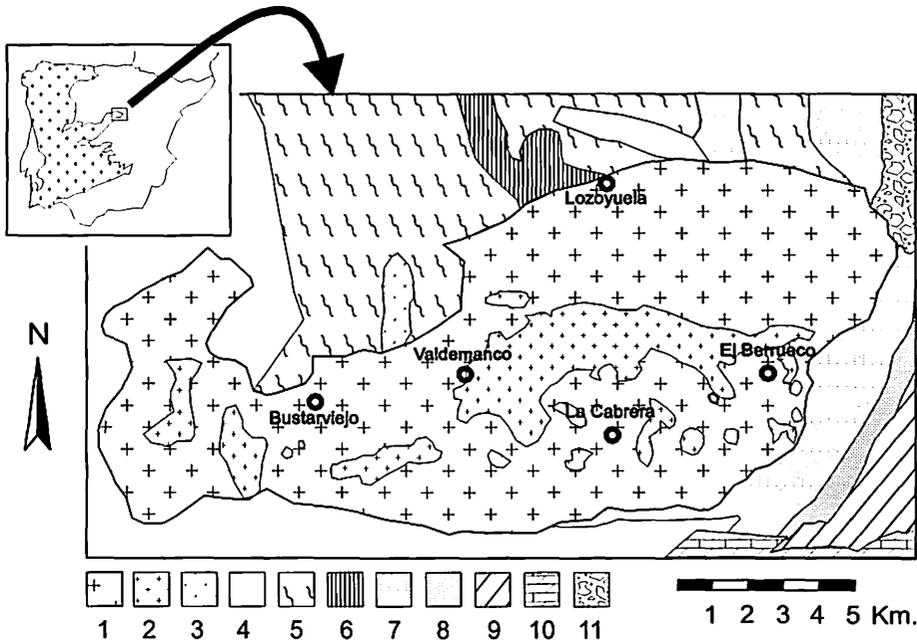


Figura 1 : Marco geológico del plutón de La Cabrera. 1: granito biotítico de grano medio-grueso. 2: leucogranito de grano fino. 3: granitoides migmatíticos. 4: ortoneises glandulares. 5: ortoneises bandeados biotíticos. 6: leuconeises y ortoneises glandulares con glándulas. 7: paraneises, esquistos y metasamitas. 8: esquistos con intercalaciones de cuarcita. 9: pizarras negras con intercalaciones de cuarcita. 10: dolomias y areniscas. 11: bloques y cantos de cuarcitas y pizarras.

acompañada de cambios de color que permitan reconocerla a “simple vista”. Los granitos considerados “frescos” muestran siempre esta alteración en mayor o menor grado (Fig.2).

Alteraciones localizadas.

Se reconocen a simple vista en el campo por sus tonalidades rojizas, que destacan frente al color blanquecino o gris claro del granito fresco. Hemos distinguido cinco tipos:

Bandas de alteración:

Son bandas sobre el terreno, de color rosa, que pueden encontrarse aisladas o formando enjambres anastomosados (Fig.2C). Afectan indiferentemente al granito masivo y a las cavidades miarolíticas con relleno pegmatítico (Fig.2C), y corresponden a zo-

nas con una elevada densidad de microfracturación. La alteración es más intensa que la de tipo regional mencionada anteriormente. Las direcciones generales de estas bandas son predominantemente N-S y en menor proporción E-O.

Alteración en relación con fallas:

(A) Alteración simple. Son bandas de alteración que contienen en su interior un plano de falla (Fig.2B). Las direcciones reconocidas son, como las del caso anterior N-S (o bien NNO-SSE, NNE-SSO) y E-O, con buzamientos subverticales. La falla central se genera dentro de las bandas de alteración consecutivamente a la etapa de microfracturación extensional (Lockner *et al.*, 1991), al igual que sucede en las episienitas (González Casado *et al.*, 1996). Se recono-

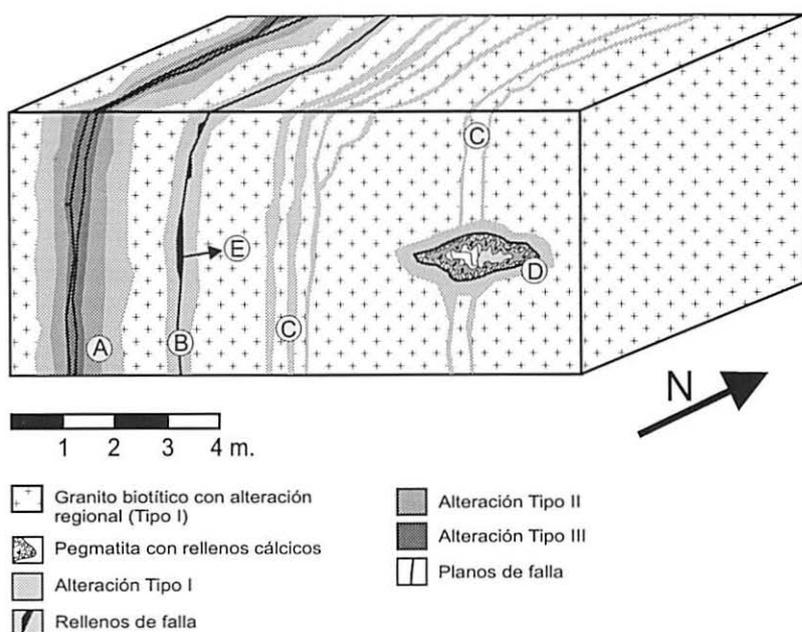


Figura 2: Esquema idealizado que muestra las relaciones espaciales de las alteraciones descritas. **A:** zona de fracturación donde aparecen las alteraciones Tipo I, II y III. Note la nucleación de varias fallas. **B:** Banda de microfracturación con nucleación interna de falla con alteración Tipo I. **C:** Enjambre de bandas de microfracturación. **D:** Halo de alteración Tipo I envolviendo una pegmatita. Se ha representado también algunas bandas (C) que penetran eventualmente en estas pegmatitas. En todos los casos se ha tomado la dirección N-S de referencia dado que es la más abundante.

cen en el campo por el color rosado del granito, más intenso hacia el plano de falla.

(B) Alteración compleja. Se trata de alteraciones hidrotermales superpuestas en las salbandas de fallas que han sido probablemente activas en más de una ocasión. De nuevo se trata de fallas con una dirección general N-S (o bien NNO SSE, NNE-SSO) y de buzamientos subverticales. Las zonas centrales de estas bandas suelen mostrar abundante fracturación, filoncillos de cuarzo y carbonatos y, en ocasiones, restos de una antigua etapa de alteración de tipo episienítico. Se reconocen en el campo por un intenso color rojizo en el centro que se atenúa progresivamente hacia el granito "fresco" (Fig.2A), lo que origina una aparente zonalidad.

(C) Rellenos de falla. Estos rellenos constituyen filones (Fig.2E) dentro del plano de falla, con una mineralogía sencilla, habitualmente cuarzo y calcita y en ocasiones otros minerales cálcicos (González Laguna, *et. al.*, 1999).

Halos en torno de cavidades miarolíticas:

El granito alterado se encuentra alrededor de las miarolas que muestran tapizados de minerales pegmatíticos y rellenos centrales de minerales cálcicos hidrotermales (Fig. 2D). Se reconocen en el campo por su color rosado, menos intenso hacia sus bordes.

Rellenos centrales de cavidades miarolíticas:

Como se ha mencionado anteriormente esta "alteración" consiste básicamente en

un complejo relleno de las cavidades miarolíticas tapizadas por pegmatitas tardimagmáticas. Estos rellenos son mayoritariamente de minerales cálcicos (epidota, prehnita, laumontita, entre otros; p.ej., Lozano *et al.*, 1998) (Fig.2).

Descripción microscópica de las alteraciones. Tipología

A partir del estudio de los minerales accesorios en los granitos alterados (se excluyen por lo tanto de este estudio las alteraciones de tipo "relleno"), se han reconocido diversas alteraciones que hemos agrupado provisionalmente en tres tipos: Tipo I: Este tipo de alteración es la más común ya que es característica de la alteración regional débil, aunque también se observa en bandas de alteración rosa con o sin una falla central, en los halos en torno de las cavidades

miarolíticas y en las zonas distales de las bandas de alteración complejas ligadas a fallas (Fig.2). Las alteraciones de Tipo II y Tipo III, están únicamente asociadas a la zonas más internas de las bandas complejas relacionadas con fallas (Fig.2). Un resumen de las principales características de las alteraciones reconocidas se muestra en la Tabla 1.

Alteración de Tipo I

La alteración regional débil se caracteriza por la cloritización parcial de la biotita, una ligera sericitización-epidotización del núcleo más básico de la plagioclasa, la pertitización del feldespato potásico y una silicificación que va acompañada de la recristalización del cuarzo. En el granito biotítico de grano grueso son más importantes los primeros tres tipos de alteración, mientras que la silicificación es más intensa en los leucogranitos. En el interior de biotitas, de los granitos menos alterados, se

Tabla 1: Resumen de las principales características de las alteraciones reconocidas.

TIPOS DE ALTERACION	YACIMIENTO	ACCESORIOS SECUNDARIOS CARACTERÍSTICOS	REACCIONES HIDROTERMALES CARACTERÍSTICAS	OTROS ASPECTOS DE LA ALTERACION
ALTERACION PENETRATIVA REGIONAL DÉBIL	Granito biotítico de grano grueso y leucogranito	Anatasa? Apatito Allanita Epidota Torita Titanita	xenotima (1) + monacita(1)+Ca ²⁺ ⇒ allanita + apatito ± torita ilmenita(1) + Ca ²⁺ ⇒ titanita + anatasa	Cloritización Sausuritización Circones sin alterar. Feldespato K "de visu", blanco
ALTERACIONES LOCALIZADAS	TIPO I Halos de pegmatitas. Bandas de alteración, alteración simple y en las zonas más distales de las alteraciones complejas asociadas a fallas.	Anatasa? Apatito Allanita Epidota Torita Titanita	xenotima (1) + monacita(1)+Ca ²⁺ ⇒ allanita + apatito ± torita ilmenita(1) + Ca ²⁺ ⇒ titanita + anatasa	Cloritización Sausuritización Circones alterados y semi reemplazados Feldespato K "de visu" rosa
	TIPO II Zonas centrales de las alteraciones complejas asociadas a fallas.	Rutilo? Xenotima Monacita Ilmenita	titanita ⇒ rutilo + ilmenita(2) + Ca ²⁺ allanita(1) + apatito ⇒ monacita + xenotima + Ca ²⁺	Disolución de clorita Fe con relleno parcial de micro cavidades. Feldespato K "de visu" rojo
	TIPO III Zonas centrales de las alteraciones complejas asociadas a fallas.	Pirita Fluorcarbonato Calcita Clorita Mg Hematites	Formación de calcita y F-carbonato a partir del excedente de Ca ²⁺ de la anterior etapa + Ca ²⁺ externo	Práctica desaparición de la clorita Fe. Feldespato K "de visu" rojo. Desaparición del circon

conservan bien los minerales ígneos accesorios: circón, torita, apatito, ilmenita, monacita y xenotima, con alteración incipiente o nula (Lám.1, Fotos 1 y 2).

La alteración regional débil se hace gradual, pero rápidamente muy intensa en las zonas de alteración localizada, mencionadas anteriormente. En estas zonas la alteración se caracteriza petrográficamente por la presencia de feldespato potásico, que se encuentra ligeramente anubarrado (probablemente como consecuencia de la generación de una microporosidad incipiente y completamente pertitzado (David *et al.*, 1995). Las plagioclasas se han transformado en albita y presentan núcleos alterados a mica blanca + epidota + titanita. La biotita se transforma por completo en clorita. Se reconoce una primera clorita rica en Fe que pseudomorfiza a la biotita ígnea y una segunda en forma de agregados vermiculares, con una composición química semejante, que reemplaza localmente a la primera (Lozano *et al.*, 1996).

Estas transformaciones afectan en distinta medida a los minerales accesorios presentes en la biotita ígnea y conducen a la formación de minerales accesorios nuevos (secundarios), incluidos dentro de la clorita. Entre estos últimos se han reconocido los siguientes: torita, apatito, titanita, óxidos de Ti, allanita y epidota con contenidos variables de Tierras Raras (TR). De todos ellos, la titanita es el más abundante.

La allanita se encuentra de dos formas diferentes: a) Como cristales idiomorfos con su eje mayor paralelo a los planos (001) de la clorita (Lám.1, Foto.3). En este caso, los cristales presentan en su interior un zonado tenue, aunque complejo, y se encuentran reemplazados parcialmente por titanita. b) Como reemplazamientos irregulares de la monacita y de la xenotima en asociación con apatito y a veces torita secundaria (Lám.1, Foto.2; Lám.2, Foto 1; Lám.3, Foto.3). Esta última se puede presentar a veces como rellenos de microfracturas en la allanita y el

apatito. La ilmenita primaria está parcialmente reemplazada por un agregado de cristallitos alotriomorfos de un óxido de Ti (anatasa?). Esta asociación es reemplazada, a su vez, por titanita. El circón primario pierde su idiomorfismo, siendo reemplazado parcialmente por titanita (Lám.1, Foto.4) o por un agregado de allanita, apatito y torita (Lám.3, Foto.3). La torita ígnea se conserva como inclusiones en el circón y en la xenotima primarios. Tanto la torita como el apatito ígneos parecen conservarse intactos durante esta alteración.

Alteración de Tipo II

La petrografía convencional no permite reconocer fácilmente este tipo de alteración. No obstante, se ha detectado la formación de una porosidad incipiente en la clorita, con crecimiento de moscovita en sus planos de exfoliación, así como una mayor intensidad de la alteración de los feldespatos.

Esta etapa se caracteriza por la formación de xenotima, monacita, óxido de Ti e ilmenita secundarios. La xenotima secundaria se encuentra rodeando a los granos de circón ígneos (Lám.2, Foto.4). A su vez la monacita secundaria rellena microfracturas en los mismos (Lám.2.Foto.2) o bien recubre a la xenotima primaria (Lám.3, Foto.2). El óxido de Ti (rutilo?), ocupa "microcavidades" dentro de la clorita (Lám.2, Foto.3), encontrándose rodeado por calcita o cuarzo más tardíos. La ilmenita secundaria se encuentra asociada a los planos de exfoliación de la clorita.

Alteración de Tipo III

La alteración de Tipo III modifica el granito previamente alterado, en la parte más interna de las alteraciones complejas ligadas a fallas. La clorita y los feldespatos son reemplazados casi en su totalidad por pirita, hematites, clorita magnésica y carbonatos. La pirita aparece siempre creciendo en el interior de la clorita. Se presenta como cristales cúbicos aislados o como recubrimientos

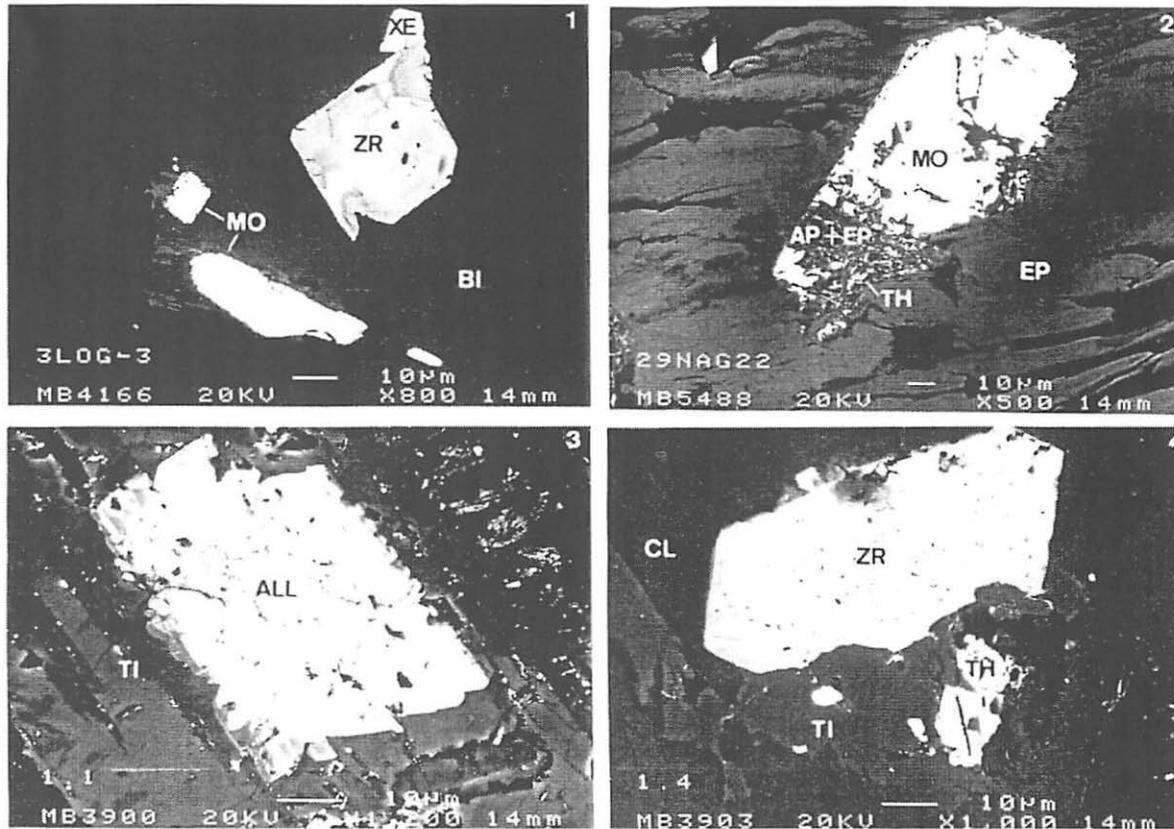


Lámina I. Foto 1: Cristales de monacita, xenotima y circón primarios, en el interior de una biotita del granito de grano grueso. Sector sin alteración. **Foto 2:** Monacita primaria alterada a un agregado de apatito + epidota con TR, conjunto englobado a su vez en epidota con TR + torita. Granito biotítico afectado por la alteración regional (Tipo I). **Foto 3:** Cristal de allanita secundario, parcialmente reemplazado por titanita también secundaria. Las dos tonalidades de la titanita corresponden a dos variedades con diferente contenido en Fe. Granito biotítico alterado de un halo de pegmatita. (Tipo I). **Foto 4:** Cristal de circón primario parcialmente reemplazado por titanita secundaria. Granito biotítico alterado de un halo de pegmatita. (Tipo I). ALL: allanita, AP: apatito, BI: biotita, CL: clorita, EP: epidota con TR, MO: monacita, TH: torita, TI: titanita, XE: xenotima, ZR: circón.

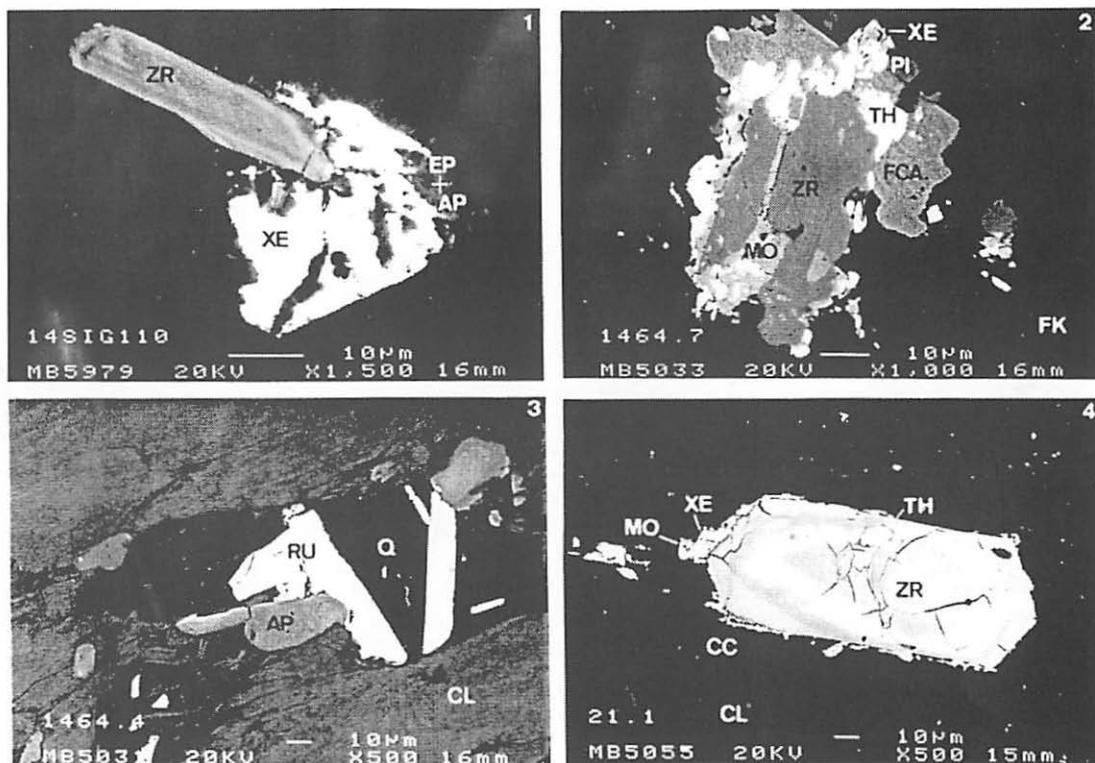


Lámina 2. Foto 1: Cristales de circón y xenotima primarios. La xenotima está parcialmente reemplazada por un agregado de apatito + epidota con TR secundarios. Granito biotítico afectado por la alteración regional (Tipo I). **Foto 2:** Circón, torita y xenotima primarios, parcialmente reemplazado por monacita, F-carbonato, torita y pirita secundarios. Alteración en falla compleja (Tipo II y III). **Foto 3:** Cristales de rutilo secundarios creciendo en el interior de una microcavidad de una clorita. El apatito primario se encuentra recrecido por una fase secundaria. El cuarzo tardío sella la cavidad. Alteración en falla compleja (Tipo II) **Foto 4:** Cristal de circón primario en el interior de una clorita, rodeado por xenotima y monacita secundaria. El circón incluye una torita ígnea. Conjunto englobado a su vez por calcita. Alteración en falla compleja (Tipo II y III). AP: apatito, CC: calcita, CL: clorita, EP: epidota con TR, FCA: F-carbonato, FK: feldespato potásico, MO: monacita, Q: cuarzo, TH: torita, XE: xenotima, ZR: circón.

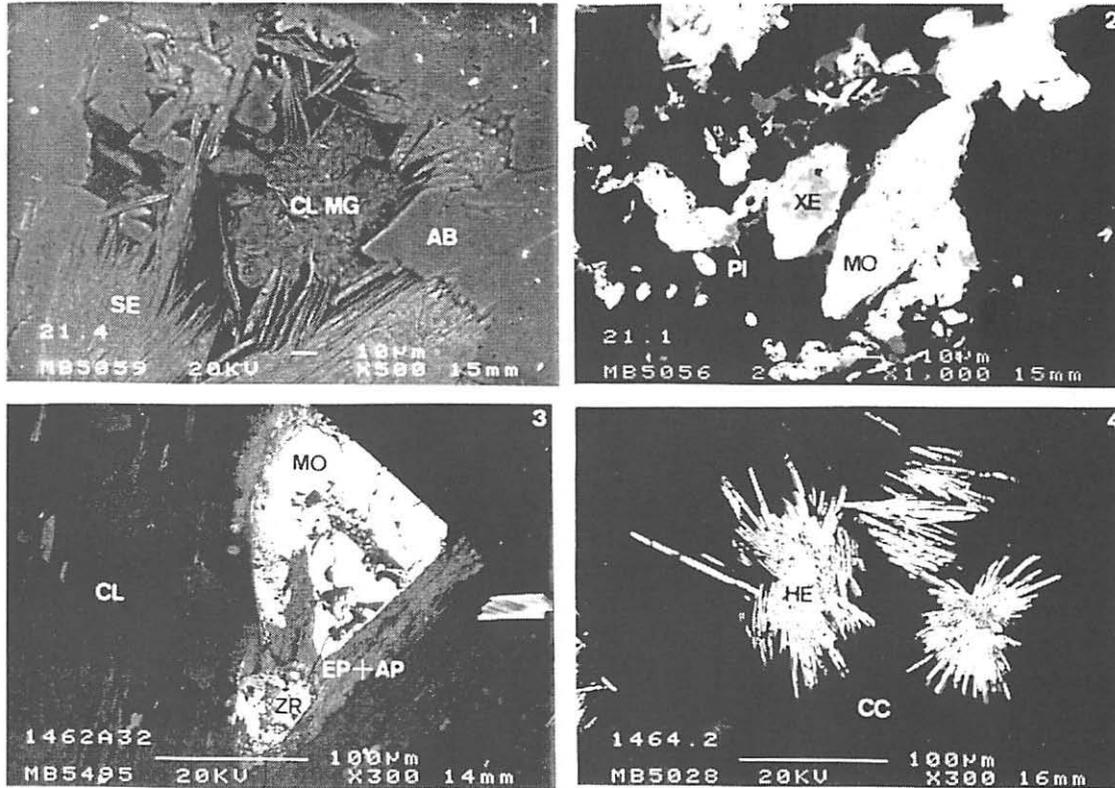


Lámina 3. Foto 1: Clorita magnésica formada en el interior de una microcavidad de un núcleo de plagioclasa albitizado y sericitizado. Alteración en falla compleja (Tipo III). **Foto 2:** Monacita reemplazando a una xenotima probablemente primaria. La pirita recubre parcialmente a la monacita. Alteración en falla compleja (Tipo II y III). **Foto 3:** Conjunto ígneo formado por circón + monacita. Ambos se encuentran parcialmente reemplazados por un agregado de apatito + epidota con TR + torita. Alteración en la zona distal de una falla compleja (Tipo I). **Foto 4:** Cristales tabulares "en roseta", englobados por calcita. Conjunto situado dentro de un núcleo de plagioclasa albitizado. Alteración en falla compleja (Tipo III). AB: albita, AP: apatito, CC: calcita, CL: clorita, CL MG: clorita magnésica, EP: epidota con TR, HE: hematites, MO: monacita, SE: sericita, XE: xenotima, ZR: circón, PI: pirita.

alotriomorfos de la monacita secundaria formada en la alteración Tipo II (Lám.3, Foto.2). La hematites puede aparecer pseudomorfizando totalmente a la pirita o bien puede formar cristales idiomorfos, de morfología tableada (Lám.3, Foto.4), desconectados espacialmente de la pirita (son más frecuente como inclusión en las plagioclasas alteradas que en la clorita). Así, la hematites es característica de la zonas de alteración más intensa. Se han encontrado dos tipos de carbonatos: calcita y fluorcarbonato (Ca+TR). La calcita es muy abundante en toda la roca, pues reemplaza profusamente a clorita y feldespatos, además de rellenar las microcavidades preexistentes. El fluorcarbonato, que ya ha sido descrito en otras alteraciones en granitos de la Sierra de Guadarrama (Villaseca *et al.*, 1999), aparece aquí reemplazando a la xenotima y monacita, tanto las relictas ígneas, como a las producidas por la alteración de Tipo II, y también, probablemente, al circón (Lám.2, Foto.2). También se puede encontrar aislado dentro del feldespato potásico, de la albita o incluso dentro de cuarzo tardío. Asimismo, se ha observado un segundo tipo de clorita de hábito fibroso-radiada, de composición magnésica, como rellenos de huecos, o reemplazamientos, dentro de la clorita de la alteración de Tipo I, o fuera de la misma, asociada a mica blanca (Lám.3, Foto.1), en el interior de cristales de albita o incluso reemplazando a pirita. Esta clorita también ha sido descrita por Lozano *et al.*, (1996) en los rellenos hidrotermales de las cavidades miarolíticas. En las zonas donde esta alteración es más intensa, los circones relictos ígneos llegan a desaparecer, como lo demuestra su total ausencia entre los minerales que ocupan el espacio de antiguas biotitas.

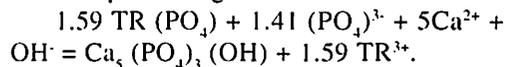
Discusión

El aspecto “*de visu*” del granito altera-

do con tonos rojos progresivamente más intensos desde la alteración I hasta la III, se debe al desarrollo de la coloración del feldespato potásico. En las alteraciones complejas rojas asociadas a fallas, se ha podido comprobar la presencia de cristales muy pequeños (de 15 a 300 μm) de hematites pertenecientes a la alteración de Tipo III, dispersos entre los minerales mayoritarios, y que deben de ser en buena parte responsables del color de este tipo de alteración.

En el caso de los halos en torno de las cavidades miarolíticas, el estricto paralelismo entre los mismos y los bordes externos de las cavidades miarolíticas sugiere una relación genética, todavía no bien conocida, aunque, en cualquier caso, demuestran la existencia de un intercambio de materia entre el granito y el fluido, presente, en ese momento, dentro de la cavidad.

El estudio de la alteración I se ha visto favorecido, en muchos casos, por la inexistencia de otras alteraciones sobreimpuestas, lo que ha permitido determinar nítidamente las relaciones texturales de los productos de la alteración. La característica más relevante de este proceso, en cuanto a minerales accesorios se refiere, es el papel antagónico que muestran la monacita y la xenotima primarias con la allanita y apatito secundarios, reconocido ya por Caballero *et al.*, (1993) en las episienitas de la Sierra de Guadarrama. Según estos autores la transformación a volumen constante de monacita en apatito se puede describir mediante expresión siguiente:



Las Tierras Raras resultantes de esta reacción se fijan en forma de allanita. En la reacción global se introduce Ca y se elimina P. Las TR se comportan como elementos prácticamente inmóviles lo que coincide con la opinión de Ward *et al.*, (1992) y Caballero *et al.*, (1993), y contradice a la de otros autores (p.ej., Cathelineau, 1988; Gieré, 1990).

De este modo podría considerarse la relación allanita (secundaria) / monacita + xenotima (primarias) como una medida del grado de alteración en rocas granítica. El apatito secundario surge como resultado de la desaparición de la monacita y la xenotima, pudiendo recrecer sobre apatitos ígneos o asociándose directamente a la allanita. Poitrasson *et al.*, (2000), han reconocido que, en granitos, la monacita ígnea puede presentar formas de alteración muy distintas, entre ellas transformación química en apatito o reemplazamiento por allanita, asociadas, en estos dos casos, con alteraciones serfécitas débiles del granito del cual procede. No obstante, la mayor parte de los trabajos relacionados con la monacita se centran en rocas metamórficas, donde este mineral se ha utilizado para datar el punto de máxima temperatura de la trayectoria P-T de las rocas (p-ej., Smith y Barreiro, 1990). Curiosamente, también las monacitas metamórficas pueden mostrar alteraciones a apatito y allanita (Finger *et al.*, 1998). Por otro lado, la destrucción de la ilmenita y de la biotita contribuyen no sólo a la formación de óxidos de Ti, sino también al incremento del desarrollo de la titanita. En términos generales, la formación de estos minerales accesorios que contienen Ca, indica la participación de este elemento en la alteración. Como la albitización del núcleo básico de la plagioclasa se produce en esta misma etapa, y ello provocaría un aumento de la actividad del Ca en el fluido, es razonable pensar que ésta pueda ser una de las causas que provoca la destrucción de la monacita y la xenotima primarias. En general parece que los minerales secundarios de esta etapa se forman "*in situ*", esto es, como recrecimiento o reemplazamiento de los minerales primarios.

La alteración de Tipo II se caracteriza principalmente por la neo-formación de xenotima y monacita secundarias, aunque también se genera ilmenita. A pesar de que

el ambiente ígneo es el ámbito más corriente para la formación de la monacita, se ha comprobado la existencia de monacita hidrotermal, sobre todo en filones hidrotermales de cuarzo o de tipo alpino (Kato, 1958). Por otro lado, el rango de estabilidad de este mineral es muy amplio, como lo demuestra su síntesis hidrotermal a 200°C (Anthony, 1957; Hikichi y Hukuo, 1977). Por ello, pensamos que la formación de xenotima, monacita e ilmenita secundarias en la alteración de Tipo II, se debe a una reacción inversa a la de la alteración de Tipo I, dando como resultado la desaparición de la allanita y del apatito formados en la etapa anterior. Este tipo de monacita secundaria ha sido observada por Lanzirotti y Hanson (1996) en rocas metamórficas y reconocida como otro tipo particular de monacita hidrotermal en granitos, por parte de Poitrasson *et al.*, (2000). Aunque las causas que condicionan la re-precipitación de la monacita no se conocen bien, parece que tanto el aumento de la actividad del Ca en el fluido hidrotermal como un medio reductor son factores favorables.

La desaparición de la titanita parece estar relacionada con la formación de ilmenita y un óxido de titanio, probablemente rutilo, presente en microcavidades de la clorita férrica.

Dentro de la alteración de Tipo III se ha englobado la formación de varios minerales secundarios. No obstante, es muy probable que este tipo de alteración sea, a su vez, el resultado de la superposición de varias etapas, ya que se han podido establecer algunas cronologías relativas entre estos minerales: así, los más antiguos serían el fluorcarbonato (Ca+TR) y la pirita, mientras que la clorita magnésica y la calcita serían más recientes. La oxidación que genera hematites sería, probablemente, el proceso más reciente. La cantidad de Ca que se introduce durante este tipo de alteración sugiere la participación en alguna medida, de

una fuente externa al propio granito. El fluorcarbonato se forma cerca de los minerales que le proporcionan las Tierras Raras, lo que parece corroborar la baja movilidad de estas durante los tres tipos de alteración. Se ha observado la progresiva desaparición de la clorita férrica, que culmina con la formación de una nueva clorita muy rica en Mg. La incorporación del Fe, primero en los sulfuros y después en los óxidos, produciría un aumento en la relación Mg/Fe del fluido, lo que facilitarí­a la formación de la clorita Mg al final de esta etapa.

El estado de conservación del circón es también, una medida del grado de alteración. Así, en la alteración de Tipo I, el circón se encuentra muy reemplazado por accesorios secundarios en los halos de las cavidades miarolíticas, mientras que en las bandas, de color rosa más pálido, los circones permanecen prácticamente inalterados. Asimismo, durante la alteración de Tipo III, el circón puede llegar a desaparecer.

Mediante la medida de la relación $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en los minerales cálcicos que constituyen los rellenos centrales de las cavidades miarolíticas, Lozano *et al.*, (1998), han demostrado que éstos son el resultado de varios episodios hidrotermales superpuestos, cuya correlación con los que hemos establecido en este trabajo, resulta por el momento conjetural. No obstante, parece probable que la alteración de Tipo I pueda correlacionarse con la etapa de rellenos epidóticos en las miarolas (Lozano *et al.*, 1997). Asimismo, las cloritas magnésicas reconocidas en el interior de las miarolas (Lozano *et al.*, 1996) es semejante a la descrita en la alteración de Tipo III asociada a fallas.

A la vista de los resultados obtenidos es destacable la gran importancia del estudio de los minerales accesorios como herramienta útil, no sólo para discernir entre distintas etapas hidrotermales, sino también para ordenarlas en el tiempo.

Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado con financiación del proyecto PB96-0575 de la SEUID (MEC). La microscopía electrónica de barrido ha sido realizada en el Centro de Microscopía Electrónica Luis Brú de la UCM bajo la supervisión de D. Alfonso Rodríguez. Agradecemos asimismo al Dr. José González del Tánago la revisión del manuscrito y sus comentarios al mismo.

Referencias

- Anthony, J.W. (1957): Hydrothermal synthesis of monazite. *Amer. Miner.*, 42, 904.
- Bellido, F. (1979): *Estudio petrológico y geoquímico del plutón de La Cabrera*. Tesis doctoral. U.C.M. 331pp.
- Caballero, J.M.; Casquet, C.; Galindo, C. y Tornos, F. (1993): The behaviour of REE in episyenites (dequartzified and alkalinized granites) from the Sierra de Guadarrama. Spanish Central System. *Curr. Reser. Geol. App. to Ore Dep.* 609-612
- Cathelineau, M. (1988): Accessory mineral alteration in peraluminous granites at the hydrothermal stage: a review. *Rend. Soc. Ital. Mineral. Petrol.*, 43-2, 499-508.
- David, F.; Walker, L.; Lee, M.R. y Parsons, I. (1995): Micropores and micropore texture in alkali feldspars: geochemical and geophysical implications. *Mineral. Mag.*, 59, 505-534.
- Finger, F.; Broska, I.; Roberts, M.P. y Schermaier, A. (1998): Replacement of primary monazite by apatite-allanite-epidote coronas in an amphibolite facies granite gneiss from the eastern Alps. *Amer. Miner.* 83, 248-258.
- Gieré, R. (1990): Hydrothermal mobility of Ti, Zr, and REE: examples from the

- Bergell and Adamello contact aureoles (Italy). *Terra Nova*, 2, 60-67.
- González Casado, J.M.; Caballero, J.M.; Casquet, C.; Galindo, C. y Tornos, F. (1996): Palaeostress and geotectonic interpretation of the Alpine Cycle onset in the Sierra de Guadarrama (eastern Iberian Central System), based on evidence from episyenites. *Tectonophysics*, 262, 213-229.
- González del Tánago, J.; Bellido, F.; y García Cacho, L. (1986). Mineralogía y evolución de las pegmatitas graníticas de La Cabrera (Sistema Central Español). *Bol. Inst. Geol. Min. España XCVII-I.*, 103-121.
- González del Tánago, J. (1997): Allanita-(Nd) y minerales de elementos raros en las pegmatitas graníticas de La Cabrera, Madrid (Sistema Ibérico Central). *Rev. Soc. Geol. España*, 10 (1-2), 83-105.
- González del Tánago, J y De La Iglesia, A. (1998): Zeolitas y minerales cálcicos de baja temperatura en las pegmatitas graníticas del plutón de La Cabrera (Sistema Central Español). *Estudios Geol.*, 54 (5-6), 181-190.
- González Laguna, R.; Lozano, R.P. y Casquet, C. (1999): Rellenos hidrotermales con minerales cálcicos en fallas del plutón de La Cabrera (Sistema Central Español). Estudio de Inclusiones fluidas. *Bol. Soc. Esp. Min.*, 22-A, 53-54.
- Hikichi, Y. y Hukuo, K. (1977): Synthesis of monazite (CePO₄) by dry method. *Bull. Nagoya Inst. Techn.*, 29, 203-208.
- Kato, T. (1958): A study on monazite from the Ebisu mine, Gifu prefecture. *Min. Jour.* (Japan), 2, 224-235.
- Lanzirotti, A. y Hanson, G.N. (1996): Geochronology and geochemistry of multiple generations of monazite from the Wepawaug Schist, Connecticut, USA: implications for monazite stability in metamorphic rocks. *Contrib. Mineral. Petrol.* 125, 332-340.
- Lockner, D.A.; Byerlee, J.D.; Kuksenko, V.; Ponomarev, A. y Sidorin, A. (1991): Quasi-static fault growth and shear fracture energy in granite. *Nature*, 350, 39-42.
- Lozano, R.P. (1996): *Las pegmatitas de La Cabrera. Geoquímica Isotópica, Geocronología y Mineralogía de las alteraciones sobreimpuestas tardi y post-hercínicas.* Tesis de Licenciatura. Univ. Complutense, Madrid, 90 págs.
- Lozano, R.P., Rodas, M., Barrenechea, I.F., Galindo, C. (1996): Las cloritas de los cuerpos pegmatíticos del plutón de La Cabrera (Sistema Central Español). *Geogaceta*, 20 (7), 1507-1510.
- Lozano, R.P.; Bachiller, N.; Casquet, C. (1997). Fluidos asociados a la formación de epidota + (clorita + cuarzo) de las pegmatitas del plutón de La Cabrera (Sistema Central Español). *Geogaceta*, 21, 155-158.
- Lozano, R.P.; Galindo, C. y Casquet, C. (1998): Aproximación a la geocronología de las pegmatitas del plutón de La Cabrera (Sierra de Guadarrama, Sistema Central Español). *Bol. Soc. Esp. Min.*, 21-A, 134-135.
- Lozano, R.P.; Casquet, C. y González Laguna, R. (1999): Bolsadas pegmatíticas con cavidades rellenas de minerales hidrotermales en el plutón de La Cabrera (Sistema Central Español). Modelo de evolución. *Bol. Soc. Esp. Min.*, 22-A, 63-64.
- Poitrasson, F.; Chenery, S. y Shepherd, T.J. (2000): Electron microprobe and LA-ICP-MS study of monazite hydrothermal alteration: Implications for U-Th-Pb geochronology and nuclear ceramics. *Geochim. Cosmochim. Acta* 64, 19, 3283-3297.
- Smith, H. A. y Barreiro, B. (1990): Monazite U-Pb dating of staurolite grade metamorphism in pelitic schists. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 105, 602-615.

- Villaseca, Reyes, J., González del Tánago, J. y Fernández, M. (1999): Datos preliminares sobre la composición química de minerales accesorios ricos en REE-Y-Th-U-Zr en los granitos hercínicos de Atalaya Real (Madrid, Sistema Central Español). En "Actas II Cong. Ibérico de Geoquímica". Lisboa (Portugal), 333-336.
- Ward, C. D.; Mearthur, J.M. y Walsh, J.N. (1992): Rare earth element behaviour during evolution and alteration of the Dartmoor Granite, SW England. *Jour. Petrol.*, 33, P.4, 785-815.

Recibido: Septiembre 2000

Aceptado: Diciembre 2000