

**METASOMATISMO Y GRANITIZACION EN EL COMPLEJO
METAMORFICO DE BEJAR - BARCO DE AVILA - PLASENCIA.
PETROGENESIS DE LOS GRANITOS DE
TENDENCIA ALCALINA**

J. M. UGIDOS*

RESUMEN.—El área estudiada comprende rocas graníticas y metamórficas parcialmente descritas en anteriores publicaciones. En este trabajo se añaden nuevos datos petrográficos y químicos que muestran la existencia de un importante metasomatismo potásico responsable del desarrollo de los granitos de dos micas. La interpretación petrogenética se basa en el citado metasomatismo y en la variación de la presión de vapor de agua durante los estadios anatéticos. Las relaciones espacio-temporales entre los procesos anatéticos y la intrusión de granitos calcoalcalinos sugiere que estos granitos representan el foco térmico que causó el metamorfismo y por otra parte son la fuente de potasio en el proceso metasomático que condicionó la formación anatética de los granitos de dos micas.

SUMMARY.—Included in the studied area are granitic and metamorphic rocks partly described in previous papers. In the present work new petrographical and chemical data are adduced which show an important potassic metasomatism responsible for the two mica granites development. Petrogenetic interpretation is based on this metasomatism and on water vapor pressure variation during anatectic stages. Time and space relations between anatectic processes and calcoalcaline granite intrusion suggest that these granites were the thermal source which caused metamorphism and, on the other hand, the potassium source for the metasomatic process which conditioned anatectic formation of the two-mica granites.

INTRODUCCION

En un trabajo anterior (UGIDOS, 1974 a) se han expuesto las condiciones bajo las que se han desarrollado los principales acontecimientos metamórficos de la región Béjar-Plasencia, concluyéndose que la formación de migmatitas y granodioritas cordieríticas había tenido lugar bajo presiones de H₂O inferiores a la presión total. Posteriormente (UGIDOS, 1974 c) se ha hecho referencia a la relación entre los granitos de dos micas con los niveles metamórfico-anatéticos de las mismas áreas.

* Departamento de Petrología y Geoquímica. Facultad de Ciencias. Salamanca.

Se pretende establecer, ahora, el nexo de unión entre metamorfismo y formación de los granitos de tendencia alcalina, así como las causas que los han determinado.

La base de la interpretación petrogenética general está por una parte en el estudio de la petrografía resultante a consecuencia del metamorfismo y por otra en el estudio de procesos que han tenido lugar en conexión con el mismo, si bien ligeramente posteriores y que han conducido a la granitización de los primeros productos. El estudio petrográfico realizado se completa con la consideración de fenómenos que han determinado la inestabilidad de la mineralogía producida durante los primeros estadios del metamorfismo y con la aportación de datos químicos.

Se ha señalado (UGIDOS, 1974 a) que la asociación mineralógica más representativa del metamorfismo creciente está integrada por sillimanita-cordierita-biotita-feldespato potásico-cuarzo, formando parte de distintos tipos de migmatitas y de las granodioritas cordieríticas. Sin embargo, sólo en áreas muy concretas y de extensión restringida es posible observar esta asociación ya que es muy frecuente su transformación en asociaciones más hidratadas según los siguientes efectos:

— Sillimanita: transformada parcialmente en moscovita que se dispone en láminas anhedrales alrededor de restos del mineral originario.

— Feldespato potásico: pasa, en ocasiones, a la asociación moscovita + cuarzo que sustituye casi por completo al primero. El componente albítico del feldespato se individualiza como tal y se dispone conjuntamente con los otros productos de la transformación.

— Biotita: es el mineral menos afectado y su alteración, cuando tiene lugar, es a clorita con formación de esfena o rutilo.

— Plagioclasas: alteradas en mayor o menor grado a sericita.

— Cordierita: generalmente transformada en productos pinnítico-cloríticos que seudomorfizan al anterior mineral. En algunos casos y asociados a los productos de la alteración se encuentran también pequeños granos de andalucita.

La mineralogía resultante es, por lo tanto, mucho más hidratada que la original y en su formación han intervenido procesos de movilización potásica.

En el gráfico que se adjunta (Fig. 1) puede apreciarse la importancia de la variación de la P_{H_2O} en la estabilidad del equilibrio:

Moscovita + Cuarzo \rightleftharpoons Feld. K + $SiAl_2O_5$ + H_2O aún en el caso de que no haya descenso en la temperatura. Se deduce, por tanto, que las aso-

ciaciones mineralógicas hidratadas que aquí se consideran pueden ser debidas no a un proceso de retrogresión (en el que está implicado un descenso de temperatura) sino simplemente a un fenómeno de hidratación que tiene lugar durante el metamorfismo, el cual puede continuar bajo las nuevas condiciones, más ricas en agua.

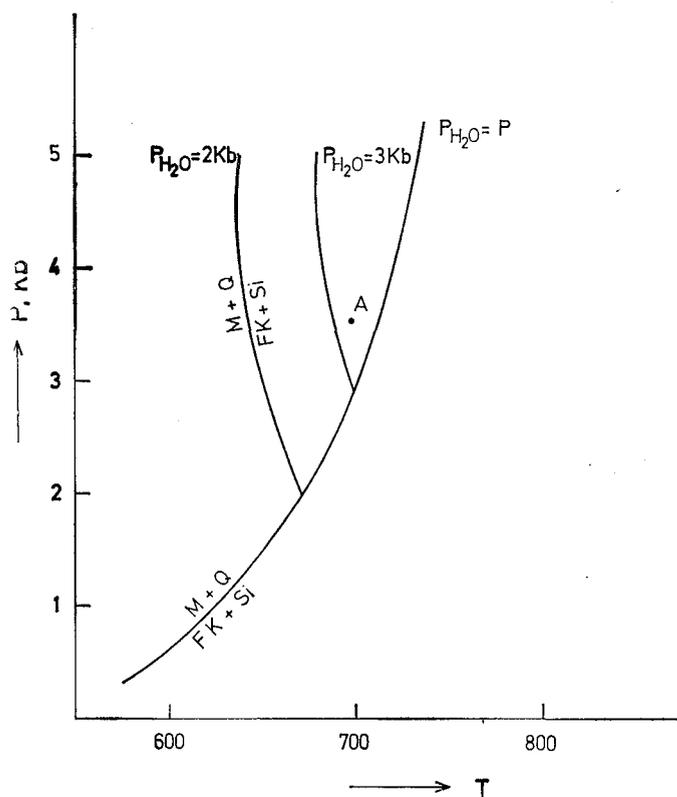


FIG. 1

Una asociación mineralógica integrada en parte por feldespato potásico (FK) y un mineral aluminico (Si) obtenidos en condiciones señaladas por el punto A, para P_{H_2O} menor de 3 Kb puede hacerse inestable por incremento de P_{H_2O} , sin que necesariamente haya descenso en la temperatura, pasando a la asociación moscovita (M) y cuarzo (Q). Gráficas basadas en WYLLIE (1971) y TOURET (1971). Las gráficas de KERRICK (1972) para condiciones de P_{H_2O} inferiores a P_t son diferentes a las de los autores citados pero los efectos de la variación son los mismos

Los tipos petrográficos resultantes, con una mineralogía más hidratada, no tienen una distribución regular y definida (ni siempre la transformación tiene lugar en todos los minerales con la misma intensidad) y se les incluye en el conjunto petrográfico denominado "granitos heterogéneos", dentro del cual y a escala de metros se encuentran pasos de rocas nebulítico-graníticas,

en las que han tenido lugar los procesos citados, con rocas anatécicas en las que éstos no se han producido y se conserva la mineralogía inicial estable. Se presenta, así mismo, la transición gradual a granitos de dos micas en los que va desapareciendo el carácter nebulítico y tienen ya una textura homogénea y mineralogía estable con ocasionales palimpsestos de rocas metamórficas o de cordierita (pinnita) y sillimanita.

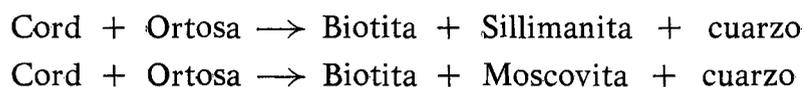
La gran abundancia de la cordierita en toda la región estudiada y otras implicaciones de tipo petrogenético hacen que este mineral sea objeto de un apartado que se considera a continuación.

Significado de la cordierita

El problema de la cordierita y sus productos de alteración ha sido ampliamente considerado en trabajos experimentales, algunos de los cuales se citan:

WYART y SABATIER (1959) partiendo de composiciones químicas equivalentes a las de sedimentos pelíticos obtienen a 800°C y 1.800° bars un sistema de cuatro componentes: biotita, cordierita, espinela y un baño líquido integrado por cuarzo, alúmina y feldespato.

Según sus experiencias, la biotita se mantiene estable durante el período de enfriamiento. La espinela está condicionada a sedimentos pobres en sílice y desaparece durante el citado período si hay suficiente cantidad de sílice en exceso. La cordierita tiende a desaparecer por reacción con los otros constituyentes según las reacciones:



MICHEL-LEVY (1960) indica que si bien la alteración de la cordierita tiene lugar a clorita bajo condiciones hidratadas, un fluido acuoso con una solución de 1-2 % de potasio produce una alteración a moscovita y flogopita. Entre 400° y 500°C la transformación no es completa y se acentúa notablemente con contenido creciente en aluminio.

SCHREYER y SCHAIRER (1961), SCHREYER y YODER (1964) y SCHREYER y SEIFERT (1969) en sus trabajos sobre la estabilidad de la cordierita muestran que en condiciones de 5-10 Kbars y temperaturas de 500° a 700°C bajo condiciones hidratadas la cordierita se altera según la reacción:



y si las rocas tienen un contenido normal en potasio, moscovita y sericita toman el lugar de los aluminosilicatos. El potasio de los aluminosilicatos

puede venir de soluciones filtrantes o es posible que se origine por un "breakdown" de la biotita según:



LAL (1969) señala como productos naturales en la retrogresión de la cordierita la asociación andalucita-distena y también pinnita en una fase anterior a la formación de los otros dos minerales.

SEIFERT y SCHREYER (1970), en su estudio sobre las condiciones de formación y campos de estabilidad de cordierita demuestran que el hecho de aparecer sillimanita junto con clorita y cuarzo como productos de transformación de la primera es debido a un desequilibrio provocado por la formación retrógrada de la clorita a partir de la biotita, siendo entonces posible una persistencia metaestable de la sillimanita. Este caso no es frecuente y constituye una excepción más que la regla general, tal como había sido expuesto por GREEN (1963).

SEIFERT y SCHREYER (1970) proponen a partir de sus investigaciones los siguientes casos de retrogresión de la cordierita en presencia de soluciones ricas en potasio.

a) $\text{Cordierita} + \text{OH}^- \rightleftharpoons \text{Moscovita} + \text{Clorita}$ dependiendo de la composición de la clorita si aparece además un aluminosilicato o cuarzo. Teóricamente este "breakdown" tendría lugar dentro del campo de estabilidad de la cordierita pura, si la concentración de potasio es suficientemente alta en la solución.

b) "Breakdown" de la cordierita en aluminosilicatos + clorita + cuarzo y subsecuente sericitización del aluminosilicato por soluciones potásicas, conduciendo a la consumición (al menos en parte) del cuarzo primeramente formado.

c) Transformación de la cordierita en pirofilita + clorita + andalucita a muy bajas presiones de agua y sericitización de la andalucita así como de la pirofilita.

Tal como puede apreciarse, todos los trabajos experimentales muestran que pueden producirse aluminosilicatos entre los productos de retrogresión de la cordierita y es de esperar también cuarzo entre los mismos.

En el presente caso y debido al pequeño tamaño de grano es muy difícil, sino imposible, distinguir por medios ópticos los diferentes modos de origen.

El problema se acentúa debido a que los procesos relacionados con la transformación de la cordierita implican al mismo tiempo un incremento de agua y soluciones potásicas, con lo que el resultado final sólo presenta clorita, moscovita y pinnita.

Sin embargo, en algunos casos ha podido comprobarse la presencia de andalucita asociada a los productos de retrogresión de la cordierita, conservándose el primer mineral en forma de pequeños cristales irregulares dentro de un conjunto clorítico-moscovítico, que seudomorfiza el hábito de cristales cordieríticos anteriores.

En cualquier caso, por lo tanto, parecen claros los siguientes puntos según se deduce de los procesos experimentales y de la observación petrográfica directa:

a) La formación de la cordierita como componente del neosome y de las granodioritas cordieríticas (UGIDOS, 1974 a) ha sido posible en gran parte debido a un defecto de potasio en las rocas afectadas por las condiciones anatécicas, junto con una sobresaturación en alúmina y condiciones relativamente anhidras.

b) En las etapas subsecuentes al paroxismo térmico (o parcialmente solapado en él) ha tenido lugar una movilización potásica que ha provocado los procesos de alteración de cordierita y otros minerales anteriores.

c) Es necesario admitir, así mismo, una modificación notable en la P_{H_2O} en el sentido de que es superior a la existente antes de los procesos de alteración. Si la entrada de agua supone que el potasio movilizado es también alóctono o por el contrario la transformación es isoquímica (excepto para el agua) será discutido más adelante en función de datos químicos.

Granitos heterogéneos

Bajo esta denominación se incluye toda la petrografía de afinidad granítica que se encuentra asociada al dominio migmatítico con el que guardan una estrecha relación de continuidad espacial y mineralógica (v. esquema geológico, UGIDOS, 1974 c).

Dos tipos petrográficos extremos se encuentran en esta zona. Por una parte granitos de dos micas con abundancia de restos de estructuras y minerales formados durante los procesos metamórfico-anatécicos iniciales y por otra migmatitas en mayor o menor grado de evolución, en las que con frecuencia han tenido lugar las transformaciones minerales que se han citado anteriormente.

Pueden establecerse, así mismo, todos los tipos petrográficos intermedios entre los dos citados, existiendo entre todos ellos una transición gradual y continua, si bien según una disposición totalmente irregular.

Relativamente frecuentes son granitos de facies aplíticas semejantes a los granitos aplíticos de nódulos (UGIDOS, 1973 c), que se presentan en aflo-

ramientos de menor extensión y carácter local. Indudablemente su génesis y significado es el mismo que en el caso de los granitos de nódulos ya estudiados y la diferencia es más bien cuantitativa por lo que se refiere al volumen y modo de emplazamiento respecto al encajante. Microscópicamente no existen diferencias texturales ni mineralógicas.

El conjunto de las características petrográficas de los granitos heterogéneos indica que la causa que ha determinado la formación de las rocas de afinidad granítica a partir de las rocas metamórfico anatéticas iniciales, estables en su mineralogía, ha sido la introducción de un componente alítico en algunos casos y en otros un fenómeno de hidratación-movilización potásica. La comparación de los análisis químicos entre las zonas afectadas por estos fenómenos y las no afectadas revela una variación significativa para el potasio.

Estudio comparativo de los análisis químicos

No ha sido posible la obtención de un elevado número de muestras susceptibles de ser analizadas a fin de comparar los resultados analíticos entre las facies afectadas por la hidratación-movilización potásica, con las que no presentan evidencia petrográfica de este fenómeno. En consecuencia, los resultados analíticos han sido comparados a través del método estadístico basado en la obtención de la "t" de Student, aplicable a poblaciones de las que se puede disponer solamente de un pequeño número de datos cuantitativos (Tablas I, II y III).

El desmuestre ha sido realizado después de un estudio petrográfico previo, de tal forma que un grupo de análisis corresponde a nebulitas y granodioritas cordieríticas en las que no parece haberse producido un fenómeno de movilización potásica y la mineralogía no ha sido modificada por fenómenos de hidratación o alteración.

El otro grupo de muestras corresponde al mismo tipo de rocas con la diferencia de haber sido afectadas por los citados fenómenos.

Se designará como serie I al primer grupo y como serie II al segundo.

La determinación de la "t" de Student revela como de significativa a muy significativa la variación de FeO y muy significativa la variación de K₂O. En ambos casos para un nivel de confianza superior al 95 %.

Las demás variaciones en los otros componentes químicos se muestran como no significativas para el citado nivel y el número de análisis realizados.

Dado que la variación de FeO no está balanceada por una variación significativa de Fe₂O₃, es necesario suponer que parte del mismo ha pasado a la disolución y ha precipitado en otros puntos con la formación de venas

TABLA I *
ANÁLISIS QUÍMICOS SERIE I

	N U M E R O										
	S-35	P-1	O-85	O-84	B-7	PC-28	B-11	M-48	O-44		
SiO ₂	66,53	67,21	66,59	66,27	66,19	65,19	66,70	65,70	64,97		
Al ₂ O ₃	15,35	15,17	12,83	12,50	16,85	16,95	15,92	16,25	17,50		
Fe ₂ O ₃	1,75	1,83	3,34	2,69	2,61	1,90	1,88	2,60	1,56		
FeO	3,15	3,24	5,01	4,12	4,60	3,36	2,73	3,20	2,82		
CaO	1,26	2,72	1,10	1,39	0,93	1,63	1,29	1,30	1,82		
MgO	2,42	2,16	2,16	2,83	1,41	3,27	2,83	1,92	2,78		
Na ₂ O	2,99	2,42	2,42	2,68	2,08	2,62	3,11	2,38	3,11		
K ₂ O	3,34	3,12	3,12	3,17	3,08	3,10	3,10	3,18	3,61		
TiO ₂	0,57	0,38	0,94	0,81	0,65	0,72	0,58	0,86	0,44		
MnO	0,88	0,07	0,11	0,09	0,09	0,10	0,08	0,09	0,09		
P ₂ O ₅	0,36	0,41	0,34	0,43	0,29	0,15	0,33	0,21	0,25		
P.F.	1,76	1,08	1,38	2,69	0,96	1,20	1,35	2,00	1,03		
Total.....	100,36	99,81	99,34	99,67	99,74	100,19	99,90	99,69	99,98		

* Análisis químicos realizados por F. BEA. Departamento de Petrología y Geoquímica. Facultad de Ciencias. Salamanca.

TABLA II
ANALISIS QUIMICOS SERIE II

	N U M E R O												
	A-25	O-88	U-5	B-5	S-28	279	M-11	U-2	M-19	U-6	B-10	B-15	
SiO ₂	67,16	68,08	65,50	65,16	65,22	67,43	67,31	67,12	67,26	65,41	66,97	67,06	
Al ₂ O ₃ ...	15,70	14,25	16,03	15,76	17,66	14,64	14,03	14,85	14,72	16,02	15,28	15,50	
Fe ₂ O ₃ ...	1,98	1,91	1,72	2,09	1,43	2,61	2,00	2,11	2,15	1,95	2,31	1,95	
FeO.....	2,47	3,23	3,10	2,34	1,43	2,89	2,97	3,11	3,28	2,97	3,02	2,50	
CaO.....	2,22	1,34	1,80	2,25	1,75	0,90	1,51	1,26	1,17	1,26	1,68	2,28	
MgO ...	1,40	1,76	1,71	2,23	2,82	2,06	1,51	1,70	2,45	2,28	2,85	1,46	
Na ₂ O ...	3,00	2,83	2,62	2,87	2,54	2,48	3,48	2,34	2,35	3,01	1,91	3,08	
K ₂ O.....	4,25	4,59	4,31	4,38	4,37	4,59	4,22	4,64	3,89	3,76	3,61	4,26	
TiO ₂	0,60	0,87	0,90	0,92	0,75	0,76	0,65	0,71	0,43	0,83	0,69	0,64	
MnO ...	0,09	0,05	0,09	0,11	0,10	0,05	0,05	0,08	0,08	0,09	0,09	0,09	
P ₂ O ₅	0,21	0,10	0,24	0,23	0,30	0,21	0,19	0,37	0,26	0,16	0,33	0,26	
P.F.....	1,10	1,29	2,07	1,30	2,11	1,31	1,56	1,43	1,13	2,55	1,00	1,00	
Total...	100,18	100,30	100,09	99,64	100,48	99,93	99,48	99,72	99,76	100,29	99,74	100,08	

TABLA III

DESVIACION STANDARD Y t DE STUDENT *

	Serie I 9 análisis		Serie II 12 análisis		t 0,95 = 2,09	Significativo (+)
	\bar{X}_I	S	\bar{X}_{II}	S		
SiO ₂	66,15	0,73	66,63	1,01	1,20	—
Al ₂ O ₃	15,48	1,76	15,35	0,98	0,21	—
Fe ₂ O ₃	2,24	0,59	2,01	0,29	1,15	—
FeO	3,58	0,80	2,77	0,52	2,78	+ a ++
CaO	1,43	0,62	1,58	0,55	0,60	—
MgO	2,42	0,56	2,02	0,50	1,68	—
Na ₂ O.....	2,64	0,36	2,71	0,42	0,39	—
K ₂ O	3,20	0,17	4,24	0,33	8,56	++
TiO ₂	0,66	0,18	0,73	0,13	1,00	—
MnO	0,17	0,26	0,08	0,20	1,28	—
P ₂ O ₅	0,30	0,09	0,25	0,07	1,58	—

\bar{X} = valor medio

S = desviación standard

cloríticas asociadas a filoncillos de cuarzo, relativamente frecuentes en todos el dominio metamórfico-granítico.

La variación de K₂O, altamente significativa, indica que se ha dado un auténtico metasomatismo potásico responsable de la granitización de las facies metamórfico-anatécticas previas. Es decir, que la transformación de las migmatitas y granodioritas cordieríticas tiene lugar bajo condiciones abiertas al aporte de productos alóctonos y no en sistema cerrado.

El origen de las soluciones potásicas es atribuible a los granitos biotíticos próximos, cuya estrecha relación con los granitos heterogéneos (UGIDOS, 1974 b) permite establecer un proceso de granitización semejante a los considerados frecuentemente en la bibliografía sobre temas graníticos.

Entre los trabajos más interesantes desde un punto de vista teórico-experimental conviene destacar los de WALTON (1960), quien basándose en la ecuación de Stockes-Einstein obtiene unos valores para los coeficientes

* Cálculos realizados según el método citado por C. E. WEATHERBURN (1968) con tablas de R. A. FISHER.

de difusión del orden de 10^{-3} — 10^{-4} ctms/seg., en condiciones de agua supercrítica.

Si la difusión en las rocas tiene lugar según la ecuación citada, se dispone de un mecanismo capaz de conseguir migraciones importantes de material a distancias considerables en tiempos relativamente cortos.

La causa que posibilita este movimiento es la existencia de un gradiente térmico y de concentraciones, mostrando las experiencias de ORVILLE (1962) cómo el potasio migra hacia zonas térmicamente más bajas.

Las diferencias de temperatura, contenido en agua y de concentraciones de potasio entre los granitos biotíticos y rocas encajantes son las causas que determinaron la migración potásica hacia éstas y en consecuencia su granitización, siendo el movimiento de agua hacia zonas del menor energía libre el vehículo que ha permitido un importante desarrollo de metasomatismo.

De la comparación de las características petrográficas de los granitos aplíticos de nódulos, moscovíticos y granitos heterogéneos, se hace patente la relación directa que existe entre todos ellos, en el sentido de que están constituidos por dos conjuntos de componentes de distinto significado petrogenético. Por una parte restos petrográficos anteriores en mayor o menor grado de evolución y de carácter cuantitativo variable: muy abundantes en los granitos heterogéneos, en forma de nódulos en los granitos aplíticos y muy aislados en los granitos homogéneos de dos micas. Por otra parte, un componente aplitoide-granitoide que actúa de englobante del anterior y de importancia variable según los casos.

El estudio conjunto y la evidencia petrográfica, química y de relaciones espaciales indican que en los acontecimientos más intensos del proceso térmico-anatético y probablemente solapado con ellos se ha dado un estadio de aporte de productos externos que ha condicionado una evolución y desarrollo de tipos graníticos cuya representación final más importante son los granitos de dos micas, siendo el resto de los granitos pasos intermedios (por ejemplo, los granitos heterogéneos) o concreciones locales particulares del proceso general (granitos aplíticos de nódulos, granitos moscovíticos).

Granitos y metamorfismo: petrogénesis

Conocidas ya las condiciones de P y T bajo las cuales debió de desarrollarse el metamorfismo (UGIDOS, 1974 a) en la región Béjar-Plasencia, se hace necesario plantear su significado en relación con el conjunto metamórfico-anatético y con el gran volumen de granitos biotíticos presentes, ya que tanto desde el punto de vista del espacio como del tiempo, la mayor parte de los acontecimientos están demasiado próximos entre sí como para no pensar en la posibilidad de una interdependencia causal.

Se han puesto de manifiesto los siguientes datos:

1) "Telescoping" de un metamorfismo sindinámico o al menos pre fase II, siendo el desarrollo de la sillimanita muy largo en el tiempo (UGIDOS, *op. cit.*), llegando a momentos posteriores a la citada fase.

2) Aumento de H_2O y K_2O en la petrología de las rocas metamórficas y anatéticas.

3) Los estadios anatéticos y fenómenos relacionados son posteriores a las principales fases de deformación (UGIDOS, *op. cit.*).

4) Situación del complejo metamórfico alrededor de los granitos biotíticos (v. esquema geológico; UGIDOS, 1974 b).

5) Facies marginales de estos granitos ricas en cordierita semejante a la de las nebulitas y granodioritas cordieríticas, debidas a un proceso de asimilación de las rocas encajantes (UGIDOS, 1974 b).

6) Relación entre los granitos de dos micas con las migmatitas y los granitos heterogéneos de anatexia.

Todos los cuales hacen necesario admitir un incremento de temperatura en conexión con los granitos biotíticos, cuyo carácter tardío respecto a las fases de deformación marca su coincidencia temporal con la fenomenología anatética. Estos aspectos favorecen la idea de que el metamorfismo y fenómenos relacionados han sido inducidos por la intrusión de los granitos biotíticos, como consecuencia del incremento de temperatura que aporta su emplazamiento sobre el gradiente geotérmico anterior.

La temperatura final deducida como mínima de alrededor de 700° en las rocas metamórfico-anatéticas más evolucionadas no ha sido suficiente como para permitir una migración de los productos anatéticos iniciales a niveles superiores ya que las condiciones en que se han formado se encuentran muy próximas a la curva solidus del sistema.

El desarrollo del metasomatismo potásico y el incremento de agua con él asociado, modifica notablemente las anteriores condiciones no sólo en cuanto a la variación química sino también a la temperatura ya que según ha mostrado HORI (in TURNER, 1968) la cantidad de calor transferida fuera por fluidos derivados de magmas es notable y la aureola térmica alrededor de éstos puede, así, ser ampliada.

Durante el metamorfismo y antes de producirse el metasomatismo las condiciones de P_{H_2O} condicionan la curva sólidas de tal forma que tiene una pendiente positiva y hace necesaria una mayor temperatura para obtener fundidos anatéticos. El sistema responde, así, a las características de un sistema tipo III de WYLLIE (1971), en condiciones deficientes en agua.

El metasomatismo subsiguiente a este estadio proporciona una gran cantidad de agua al sistema, que se aproxima o llega a un tipo IV, con exceso de agua. Es decir, que ahora las curvas sólidas tienen una pendiente negativa correspondiente a sistemas con exceso de hidratación.

Las consecuencias más interesantes que se deducen de los trabajos de PIWINSKII y WYLLIE (1968), BURHAM (1967), ROBERTSON y WYLLIE (1971), WYLLIE (1971) para sistemas con exceso y defecto de agua y otras variables químicas son:

- a) La curva sólidas del sistema se desplaza hacia más bajas temperaturas como consecuencia del aumento de potasio.
- b) En el mismo sentido actúa el incremento de P_{H_2O} y contenido en agua.
- c) La cantidad de magma anatético depende de los dos factores anteriores y aumenta con el contenido creciente en agua y composición química más próxima a la granítica.

En la Fig. 2, puede apreciarse gráficamente cómo en las nuevas condiciones se dispone de un amplio campo de posible fusión anatética y que además ésta puede producir magmas sobrecalentados, de composición alejada de la curva sólidas y por tanto con posibilidad de ascenso a niveles superiores. La anatexia se continúa, en consecuencia, en unas condiciones más hidratadas que determinan el desarrollo de granitos heterogéneos y magmas graníticos sobrecalentados en los que ya no es estable la cordierita debido a los procesos que se han considerado anteriormente, en el apartado dedicado al significado del citado mineral.

Es decir, que como resultado de los procesos anteriores se derivan magmas graníticos cuya posibilidad de aloctonía es causa de la formación de granitos desenraizados, emplazados en niveles epizonales.

Los granitos de Plasencia-Montehermoso (UGIDOS, 1974 c) parcialmente asociados a granitos heterogéneos son originados según el proceso citado. Así mismo, los otros tipos graníticos de Torremenga y granitos moscovíticos (Ibid.), tienen su origen en la misma causa inicial y estos últimos, al igual que los granitos aplíticos de nódulos (UGIDOS, 1973 b) representan casos concretos del fenómeno general, en los que probablemente la proporción de volátiles o las condiciones de temperatura han jugado un papel ligeramente diferente al primer caso. Es decir, que en función de la temperatura, volátiles o de la conjugación de los dos factores pueden producirse en algunos niveles fenómenos locales de fusión, al mismo tiempo que se da el fenómeno general en un nivel inferior. A este respecto es interesante exponer la opinión de BROWN y FYFE (1970): "There are also no reason why melting at more than one level should not virtually synchronous".

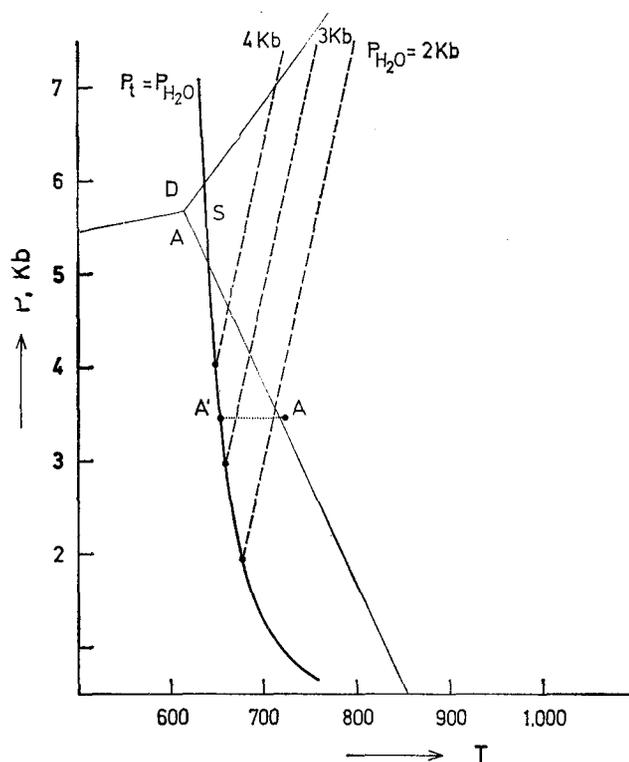


FIG. 2

Un magma anatécico producido en A bajo condiciones de P_{H_2O} inferiores a P_t se encuentra muy próximo a la curva sólidas para $P_{H_2O} = 2 \text{ Kb}$ y difícilmente podrá migrar a niveles superiores. La ampliación del campo hasta A' por adición de H_2O permite un amplio intervalo de posible fusión y sobrecalentamiento y por tanto de migración. Gráficas basadas en TUTTLE-BOWEN (1958) (curva de fusión mínima del granito); RICHARDSON et al. (1968) (equilibrio And-Sill-Dist); ROBERTSON y WYLLIE (1971), WYLLIE (1971), y TOURET (1971) (curvas de fusión del granito para condiciones deficitarias en agua)

DISCUSION

El planteamiento y solución propuesta para explicar el desarrollo del metamorfismo y formación de los distintos tipos de granitos supone aceptar varios puntos, algunos de los cuales traen como consecuencia otras implicaciones que serán discutidas en este apartado.

La idea de que cuerpos magmáticos o fluidos sobrecalentados son los responsables de la formación de metamorfismos de baja presión y fenómenos asociados ha sido frecuentemente considerada en la bibliografía de los últimos años (por ejemplo, MIYASHIRO, 1961, 1972; DE ROEVER, 1965; ZWART, 1967) y la aplicación de la misma al caso que aquí se estudia permite aportar

una solución unitaria a los diversos fenómenos petrogenéticos que han tenido lugar.

Independientemente de cual sea el material a partir del que se han originado los granitos calcoalcalinos en el Macizo Hespérico, existe acuerdo en que proceden de zonas profundas de la corteza terrestre (CAPDEVILA, 1969; OEN ING SOEN, 1970; FLOOR et al., 1970), si bien pueden representar magmas híbridos según se ha puesto de manifiesto por ALBUQUERQUE (1971) en su estudio de los granitos calcoalcalinos del N de Portugal, similares petrográfica y químicamente a los aquí considerados.

Por otra parte estos magmas calcoalcalinos han pasado por temperaturas de valores próximos a 900°C (cristalización de piroxenos) 800°C (cristalización de anfíboles) (WINKLER, 1967; BROWN y FYFE, 1970; DEN TEX, 1971) y los estadios finales con biotita como único mineral félico han debido de desarrollarse bajo temperaturas entre 700°C y 800°C (BROWN y FYFE, *op. cit.*; WINKLER, 1967).

Según datos de JAEGER (1957, 1959) admitidos y analizados posteriormente por WINKLER (1967) y TURNER (1968) la temperatura alcanzada a una distancia dada del contacto de una masa magmática medida normal al mismo depende de dicha masa, a igualdad de otras condiciones.

El tiempo durante el que se mantiene tal temperatura es función de la anchura del batolito y viene dado por la expresión:

$$t = 0,01 D^2 \text{ (WINKLER, 1967)}$$

D = anchura del batolito expresada en metros

En las áreas aquí estudiadas, la anchura de la masa de granitos calcoalcalinos oscila de 30 a 40 kmts. (v. mapa de la región; UGIDOS, 1974 c) medida transversalmente a la misma lo cual no representa probablemente la anchura real de la intrusión inicial ya que por una parte se han dado fenómenos de asimilación (UGIDOS, 1974 b) con el correspondiente aumento de volumen y por otra existen dos direcciones principales de intrusión de los citados granitos (NE-SO y E-O; UGIDOS, 1973 a) lo cual hace que la extensión aparente de la masa granítica en el actual nivel observable pueda ser superior a la real en niveles inferiores.

No obstante el gran volumen de granitos calcoalcalinos existentes en el área considerada y áreas próximas (hacia NO y O) de granitos similares permite pensar que las anchuras citadas no son una excepción local sino que se continúan a lo largo de una gran extensión. Los datos químicos de NICCOLI (1966) para los granitos del Sistema Central permiten establecer que son mayoritariamente calcoalcalinos. Puede establecerse, entonces, que las temperaturas en los bordes de estas masas magmáticas se han mantenido

durante varios millones de años, suficiente como para desarrollar los fenómenos anatéticos señalados.

La lógica de la hipótesis que se mantiene en este trabajo conduce a pensar en un proceso continuo en el tiempo en el que pueden darse fenómenos anatéticos previos a los que han producido los granitos de tendencia alcalina tardíos o postectónicos y que los magmas así resultantes originaran granitos que serán afectados por las últimas deformaciones.

Igualmente pueden presentarse granitos calcoalcalinos, que ascendieron antes que el conjunto de la masa magmática total a través de estructuras favorables, los cuales estarán deformados si su emplazamiento final tuvo lugar en relación con las últimas fases.

De hecho ya son conocidos estos tipos graníticos en áreas próximas a las aquí consideradas (MONTEIRO, 1973; FERNÁNDEZ LAGUNA, comunicación personal; BEA y UGIDOS, datos no publicados) por lo que pueden admitirse dos series de granitos "older" y dos series de granitos "younger", alcalina y calcoalcalina en cada caso, como consecuencia de un fenómeno general de desplazamiento del foco térmico, representado por los magmas calcoalcalinos, en el espacio y en el tiempo.

BIBLIOGRAFIA

- ALBUQUERQUE, C. A. R. de (1971): *Petrochemistry of a series of granitic rocks from Northern Portugal*. Geol. Soc. Am. Bull., 82, 2783-2798.
- BROWN, G. C. y FYFE, W. S. (1970): *The production of granitic melts during ultrametamorphism*. Contr. Min. Petr., 28, 310-318.
- BURHAM, C. W. (1967): *Hydrothermal fluids at the magmatic stage*. In "Geochemistry of Hydrothermal ore deposits". New York. Ed. H. L. Barnes. Holt, Rinehart and Winston, 34-76.
- CAPDEVILA, R. (1969): *Le métamorphisme régional progressif et les granites dans le segment hercynien de Galice nord orientale (NW de l'Espagne)*. Tesis. Montpellier.
- FLOOR, P.; KISCH, H. J. y OEN ING SOEN (1970): *Essai de corrélation de quelques granites hercyniens de la Galice et du nord du Portugal*. Bol. Geol. y Min., 81 (2/3), 242-244.
- GREEN, J. C. (1963): *High level metamorphism of pelitic rocks in Northern New Hampshire*. Am. Min., 48, 991-1023.
- JAEGER, J. C. (1957): *The temperature in the neighborhood of a intrusive sheet*. Am. J. Sc., 255, 306-318.
- (1959): *Temperatures outside a cooling intrusive sheet*. Am. J. Sc., 257, 44-54.

- KERRICK, D. M. (1972): *Experimental determination of muscovite + quartz stability with $P_{H_2O} < P_{total}$* . Am. J. Sc., 272, 946-958.
- LAL, R. K. (1969): *Retgression of cordierite to kyanite and andalusite at Fishtail Lake. Ontario. Canada. Miner. Magaz.*, 37, 466-471.
- MICHEL-LEVY, C. M. (1960): *Sur l'altération de la cordierite*. Bull. Soc. Franc. Min. Crist., 83, 142-143.
- MIYASHIRO, A. (1961): *Evolution of metamorphic belts*. J. of Petr., 2, 277-311.
- (1972): *Metamorphism and related magmatism in plate tectonics*, 272 (7), 629-656.
- MONTEIRO, H. (1973): *Caracteres metalogenéticos de los yacimientos intragraníticos españoles de uranio*. Tesis. Salamanca.
- NICOLLI, H. B. (1966): *Estudio de la geoquímica del uranio en rocas graníticas españolas*. Tesis. Salamanca.
- OEN ING SOEN (1970): *Granite intrusion, folding and metamorphism in Central Northern Portugal*. Bol. Geol. y Min., 81 (2/3), 271-298.
- ORVILLE, P. M. (1962): *Alkali metasomatism and feldspars*. Norks. Geol. Tidssk., 42, 283-316. Feldspar volume.
- PIWINSKII, A. J. y WYLLIE, P. J. (1968): *Experimental studies of igneous rock series: a zoned pluton in the Wallowa Batholith, Oregon*. Journ. Geol., 76, 205-234.
- RICHARDSON, S. W.; BELL, P. M. y GILBERT, M. C. (1968): *Kyanite-sillimanite equilibrium between 700° and 1.500°C*. Am. J. Sc., 266, 513-541.
- ROBERTSON, J. K.; WYLLIE, P. J. (1971): *Rock water systems with special reference to the water-deficient region*. Am. J. Sc., 271, 252-278.
- ROEVER, W. P. DE (1965): *On the cause of preferential distribution of certain metamorphic minerals in orogenic belts of different age*. Geol. Rundsch., 54, 933-944.
- SCHREYER, W. y SCHAIRER, J. F. (1961): *Composition and structural state of anhydrous Mg-cordierites: a reinvestigation of the central part of the system MgO-Al₂O₃-SiO₂*. J. of Petr., 2, 234.
- SCHREYER, W. y YODER, H. S. (1964): *The system Mg-cordierite-H₂O and related rocks*. Neues Jahrb. Mineral. Abh., 101, 271-342.
- SCHREYER, W. y SEIFERT, F. (1969): *Compatibility relations of the aluminium silicates in the system MgO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O and K₂O-MgO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O, at high pressures*. Am. J. Sc., 267 (3), 371-389.
- SEIFERT, F. y SCHREYER, W. (1970): *Lower temperature stability limit of Mg-cordierite in the range 1-7 Kb water pressure: a redetermination*. Contr. Min. Petr., 27, 225-238.
- TEX, E. DEN (1971): *The facies groups and facies series of metamorphism and their relation to physical conditions in the earth crust*. Lithos, 4 (1), 23-43.
- TOURET, J. (1971): *Granulite facies in Southern Norway. I. The mineral associations*. Lithos, 4 (3), 239-251.
- TURNER, F. J. (1968): *Metamorphic petrology. Mineralogical and Field aspects*. New York. McGraw-Hill.
- TUTTLE, O. F. y BOWEN, N. L. (1958): *Origin of granite in the light of experimental studies in the system Na AlSi₃O₈-KAlSi₃O₈-SiO₂-H₂O*. Geol. Soc. Am. Mem. 74.

- UGIDOS, J. M. (1973a): *Estudio petrológico del área Béjar-Plasencia. (Salamanca-Cáceres)*. Tesis. Salamanca.
- (1973b): *Los granitos aplíticos de nódulos en el área Béjar-Barco de Avila. (Salamanca-Avila)*. *Studia Geológica*, 6, 85-93.
- (1974a): *Características del metamorfismo en el área Béjar-Plasencia*. *Bol. Geol. y Min. de Esp.*, 85-86, 73-81.
- (1974b): *Los granitos biotíticos \pm cordierita de Béjar y áreas adyacentes*. *Bol. Geol. y Min. de Esp.*, 85 (2), 66-74.
- (1974c): *Granitos de dos micas y moscovíticos en la región de Barco de Avila-Plasencia y áreas adyacentes. (Avila-Cáceres)*. *Studia Geológica*, 7, 63-86.
- WALTON, M. (1960): *Granite problems*. *Science*, 131, 635-645.
- WEATHERBURN, C. E. (1968): *A first course in mathematical statistics*. Sec. Ed. Cambridge Univ. Press.
- WINKLER, H. G. F. (1967): *Petrogenesis of metamorphic rocks*. Sec. Ed. Berlin, Springer-Verlag.
- WYART, J. y SABATIER, G. (1959): *Transformations des sédiments pélitiques à 800°C sous une pression de 1.000 bars et granitization*. *Bull. Soc. Franc. Crist. Min.*, 82, 201-210.
- WYLLIE, P. J. (1971): *The Dynamic Earth*. New York, John Wiley and Sons.
- ZWART, H. J. (1967): *The duality of orogenic belts*. *Geol. Mijnb.*, 46 (8), 283-310.

(Recibido el 31 - I - 74)