



Petrología y geoquímica del plutón de Cardeña-Virgen de La Cabeza (batolito de Los Pedroches)

Petrology and geochemistry of Cardeña-Virgen de La Cabeza pluton (batholith of Los Pedroches)

LARREA, F. J.; CARRACEDO, M.; CUETO, L. A.; QUESADA, C.; GIL IBARGUCHI, J. I.; FERNANDEZ, F. J. y ORTEGA, L. A.

El plutón de Cardeña-Virgen de La Cabeza es uno de los cuerpos intrusivos que integran la unidad granítica del batolito de Los Pedroches. Dentro de este plutón, se ha establecido el emplazamiento sucesivo en el tiempo de: 1) adamellitas biotíticas, 2) granitos biotíticos porfídicos \pm cordierita, 3) leucogranitos \pm cordierita. Las adamellitas biotíticas muestran localmente paso gradual hacia las facies granodioríticas del batolito. Existe además un importante complejo filoniano que se intruye posteriormente, formado por diques riodacíticos de dirección NO-SE, lamprófidos, aplitas, pegmatitas y filones mineralizados de cuarzo. Geoquímicamente, la adamellita y el granito biotítico porfídico constituyen una asociación aluminó-cafémica de carácter calcoalcalino. Los enclaves anfíbólicos (términos cafémicos) poseen carácter metaaluminoso. Los leucogranitos se desvían de la tendencia general definiendo una asociación aluminosa y leucocrática. Los diagramas de variación para elementos mayores, menores, trazas y tierras raras de adamellitas, granitos biotíticos porfídicos y de granodioritas, rocas, estas últimas, con las que se encuentran íntimamente relacionadas, son compatibles con procesos de diferenciación magmática por cristalización fraccionada a partir de un magma inicial de composición granodiorítica más básico.

Palabras clave: adamellitas, granitos, granodioritas, tránsito gradual, asociación aluminó-cafémica, cristalización fraccionada.

The Cardeña-Virgen de La Cabeza intrusion belongs to the granitic unit of the Los Pedroches batholith. the chronology of the intrusion of the different rock-types that make up the pluton is as follows: 1) biotitic adamellite, 2) porphyritic, cordierite-bearing, biotitic granite. 3) cordierite bearing leucogranite. The biotitic adamellite locally shows a transition to the granodioritic facies of the batholith. A great amount of NW-SW oriented dikes with rhyodacitic composition intruded subsequently. Lampophyres, aplites, pegmatites and ore-bearing quartz veins complete the dike complex. Adamellite and biotitic granite define an

aluminous-cafemic association with calcalkaline affinity. The amphibole-bearing enclaves represent the cafemic terms of the series and have a metaaluminous character. The leucogranite deviates from the general trend defining and aluminous, leucocratic association. Variation diagrams for major, minor and trace elements, including REE, of adamellite, porphyritic biotitic granite and granodiorite of the main pluton (which is intimately associated with the Cardeña-Virgen de La Cabeza intrusion) suggest a process of magmatic differentiation through fractional crystallization starting from a slightly more basic granodioritic magma.

Key words: adamellite, granite, granodiorite, transition, aluminous-cafemic association, fractional crystallization.

LARREA, F. J.; CARRACEDO, M.; GIL IBARGUCHI, J. I.; ORTEGA, L. A. (Dpto. de Mineralogía y Petrología. Univ. País Vasco. Apto. 644, 48080 Bilbao). CUETO, L. A.; QUESADA, C.; FERNANDEZ, F. J. (División de Geología. I. T. G. E. Ríos Rosas 23, 28003 Madrid).

INTRODUCCION: EL CONTEXTO GEOLOGICO

El batolito de Los Pedroches, situado al sur de la Península Ibérica, constituye un complejo ígneo que se extiende casi ininterrumpidamente desde la depresión del río Guadiana hasta la del Guadalquivir, a través de las provincias de Badajoz, Córdoba y Jaén, ocupando un área aproximada de 2.000 Km².

La alineación ígnea, de dirección NW-SE y con morfología ligeramente sigmoidal, se orienta subconcordantemente con las directrices estructurales hercínicas regionales, emplazándose en materiales de edad finiprecámbrica a carbonífera (Tournaisiense superior a Namuriense basal) pertenecientes al sector meridional de la Zona Centroibérica (Macizo Hercínico Ibérico).

La asociación magmática se compone básicamente de dos unidades ígneas (Fig. 1):

— *Unidad granodiorítica*. Constituída fundamentalmente por granodioritas biotíticas ± anfíbol y que ha sido denominada clásicamente granodiorita de Los Pedroches. Asociado a esta unidad se desarrolla un complejo filoniano de dirección N-S. La unidad granodiorítica aflora de forma conti-

nua en los sectores central y occidental de la alineación magmática (plutón granodiorítico de Los Pedroches), mientras que hacia el Este aflora en masas de pequeñas dimensiones (granodiorita de El Humilladero —OVTRACHT et TAMAIN, 1973; LARREA, 1987—, al norte de La Virgen de La Cabeza y granodiorita de La Fernandina —CARRACEDO *et al.* in prep—, en Linares).

— *Unidad granítica*. Compuesta mayoritariamente por adamellitas biotíticas ± cordierita, granitos biotíticos ± cordierita y leucogranitos, distribuidos en diversos cuerpos plutónicos conectados o no con la unidad granodiorítica, y que en conjunto definen una orientación ligeramente oblicua con respecto a esta última. De W a E, estos plutones son los de: Valdetorres-Gamita, Campanario-La Haba, Sta. Eufemia, El Guijo, Cerro Mogábar, Cardeña-Virgen de la Cabeza, Linares y Arquillos (Fig. 1).

Cortando a las dos unidades individualizadas se emplaza un espectacular haz filoniano de composición ácida (riodacítica) de dirección N 120-140, además de diques aplíticos (aplopegmatitas), lamprófidos y filones de cuarzo con mineralizaciones de Bi, Pb, Ag, Cu, W, U...

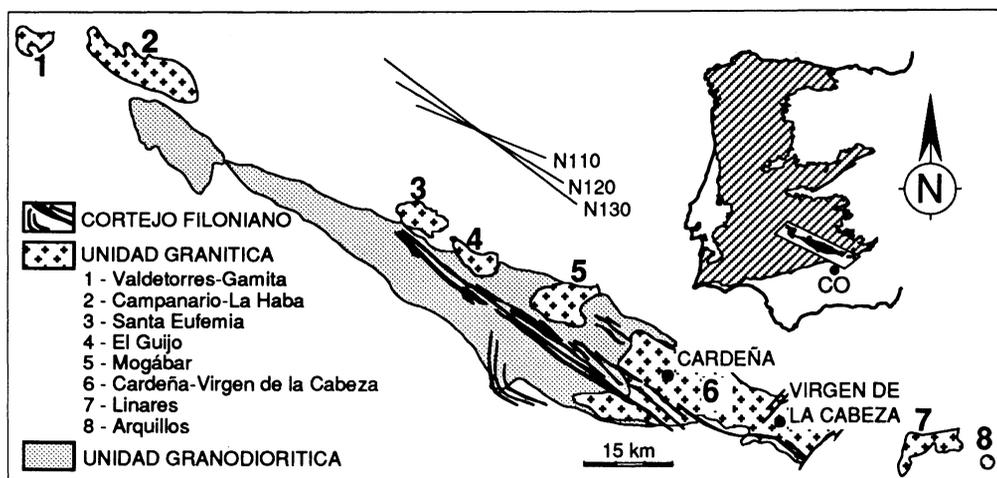


Fig. 1. Esquema cartográfico del batolito de Los Pedroches

La intrusión del batolito en niveles corticales someros con metamorfismo regional de grado muy bajo, produce una aureola de metamorfismo de contacto de anchura variable (700-2000 m) alcanzándose localmente condiciones de corneanas piroxénicas.

El emplazamiento del complejo ígneo es posterior a la fase principal sinesquistosa de deformación hercínica de la zona (Namuriense), y anterior al Estefaniense Inferior-Medio. Dataciones radiométricas (Rb/Sr, roca total) dan edades comprendidas entre 308 ± 7 y 302 ± 6 Ma para el conjunto del batolito exceptuando los leucogranitos (LALIEUX, 1982-83). Mientras que el plutón de El Guijo, uno de los plutones que componen la unidad granítica, presenta una edad de 300 ± 6 Ma (FERNANDEZ, *et al.*, 1990).

Aunque una de las características del batolito de Los Pedroches es su carácter eminentemente ácido, se han observado también, en mucha menor proporción, rocas de naturaleza más básica (gabros, dioritas) en los sectores occidental —Valle de La Serena— y oriental —Virgen de La Cabeza— del mismo. Las rocas básicas de la Serena se hallan afectadas por la D1 hercínica y son anteriores al emplazamiento de la unidad

granodiorítica que las engloba como enclaves (ARRIOLA, *et al.*, 1983). Las rocas básicas de La virgen de La Cabeza aparecen como enclaves en los granitos y adamellitas biotíticas que componen la unidad granítica (LARREA, 1987) y no presentan deformación.

EL PLUTON DE CARDEÑA-VIRGEN DE LA CABEZA

El plutón de Cardaña-Virgen de La Cabeza, situado en la parte oriental del batolito de Los Pedroches, al N de las provincias de Córdoba y Jaén, ocupa un área aproximada de 600 Km². Tiene forma alargada y bordes sinuosos. Al N y al S presenta un contacto intrusivo con las pizarras carboníferas de edad Viseense medio-superior a Namuriense inferior (QUESADA *et al.*, 1987) del Culm de Los Pedroches. Hacia el W contacta de forma tanto gradual (tercios central y meridional) y más raramente neta (en el tercio septentrional) con el plutón granodiorítico de los Pedroches. Hacia el E queda recubierto por los materiales postpaleozoicos de la cuenca del Guadalquivir.

Las terminaciones sur y centro-occiden-

tal del plutón de Cardeña-Virgen de La Cabeza (Fig. 2) resulta de especial interés para el estudio de la relaciones genéticas entre la unidad granodiorítica y los plutones graníticos satélites que componen la unidad granítica del batolito de Los Pedroches. En esas zonas, existe un paso o tránsito gradual entre la granodiorita de Los Pedroches, en facies común, y la facies de granitos porfídicos de grano grueso de dicho plutón similares estos últimos a los granitos porfídicos de grano grueso de los demás plutones graníticos satélites que componen el batolito. Este contacto, de tipo transicional (ERASO, 1980; LALIEUX, 1982-83; SANCHEZ PEREZ *et al.*, 1988; LARREA *et al.*, 1988; FERNANDEZ *et al.*, 1990; CARRACEDO *et al.*, 1990; CARRACEDO, 1991; FERNANDEZ *et al.*, en prensa; LARREA *et al.*, en prensa), se materializa a través de unas rocas que hemos denominado adamellitas biotíticas porfídicas de grano grueso.

A continuación se describen los tipos litológicos principales que componen el plutón de Cardeña-Virgen de La Cabeza:

Granitos biotíticos porfídicos

Esta litología constituye la facies principal del plutón. Corresponde a granitos de grano grueso-medio y de grano fino, química y mineralógicamente afines, y con relaciones graduales entre ellos. Son rocas de color gris claro, inequigranulares, con marcado carácter porfídico formadas por cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa y biotita. Destaca la presencia de cristales globuloso-redondeados de cuarzo (0.5-1.5 cm) y de megacristales poiquilíticos de feldespato potásico de tamaño variable entre 2 y 8 cm con distribución irregular en la roca. Los megacristales de feldespato potásico marcan direcciones de orientación variable con máximos coincidentes con el eje direccional del plutón (N120-140), lo que sugiere la existencia de procesos convectivos dentro de la cámara magmática.

Al microscopio presentan una textura hipidiomórfica, inequigranular y porfídica. Los minerales principales son: *cuarzo* en agregados globosos o cristales intersticiales xenomorfos; *feldespato potásico* peritico, tanto en forma de fenocristales y/o megacristales maclados y poiquilíticos, con inclusiones de «Frasl», como intersticial; *plagioclasa* (An₁₃₋₂₅) maclada y/o con zonación normal; *biotita* con fuerte pleocroísmo en forma de placas o agregados policristalinos de individuos de pequeño tamaño. Los minerales accesorios son: *circón*, *apatito*, *opacos*, *cordierita*, ± *andalucita*. La cordierita forma cristales prismáticos de tamaño variable con distribución irregular, siendo más frecuente cerca de la zona de contacto con el encajante sedimentario. Los minerales secundarios son: *clorita*, *sericita*, *pinnita*, *moscovita* (procedente de la desestabilización de biotita, feldespato, cordierita y andalucita), *epidota*, *esfena* y *opacos*.

Adamellitas biotíticas porfídicas de grano grueso

Estas rocas afloran en la zona de tránsito gradual entre el plutón granodiorítico de Los Pedroches y los granitos biotíticos del plutón de Cardeña-Virgen de la Cabeza. Respecto a la granodiorita de Los Pedroches, presentan incremento progresivo del contenido en cuarzo y feldespato potásico, acompañado de un empobrecimiento gradual en plagioclasa y biotita. Al mismo tiempo, y también de forma gradual, adquieren una textura porfídica, reflejada fundamentalmente en la presencia de megacristales de feldespato potásico (1-8 cm) y cristales globulosos redondeados de cuarzo 0.5-1.5 cm). El anfíbol no aparece ni siquiera como mineral accesorio en estas rocas, en las que, sin embargo, aparece cordierita. La presencia de enclaves microgranudos disminuye notablemente a medida que las rocas adquieren un carácter granítico más acusado.

Las adamellitas presentan características petrográficas similares a las del granito bio-

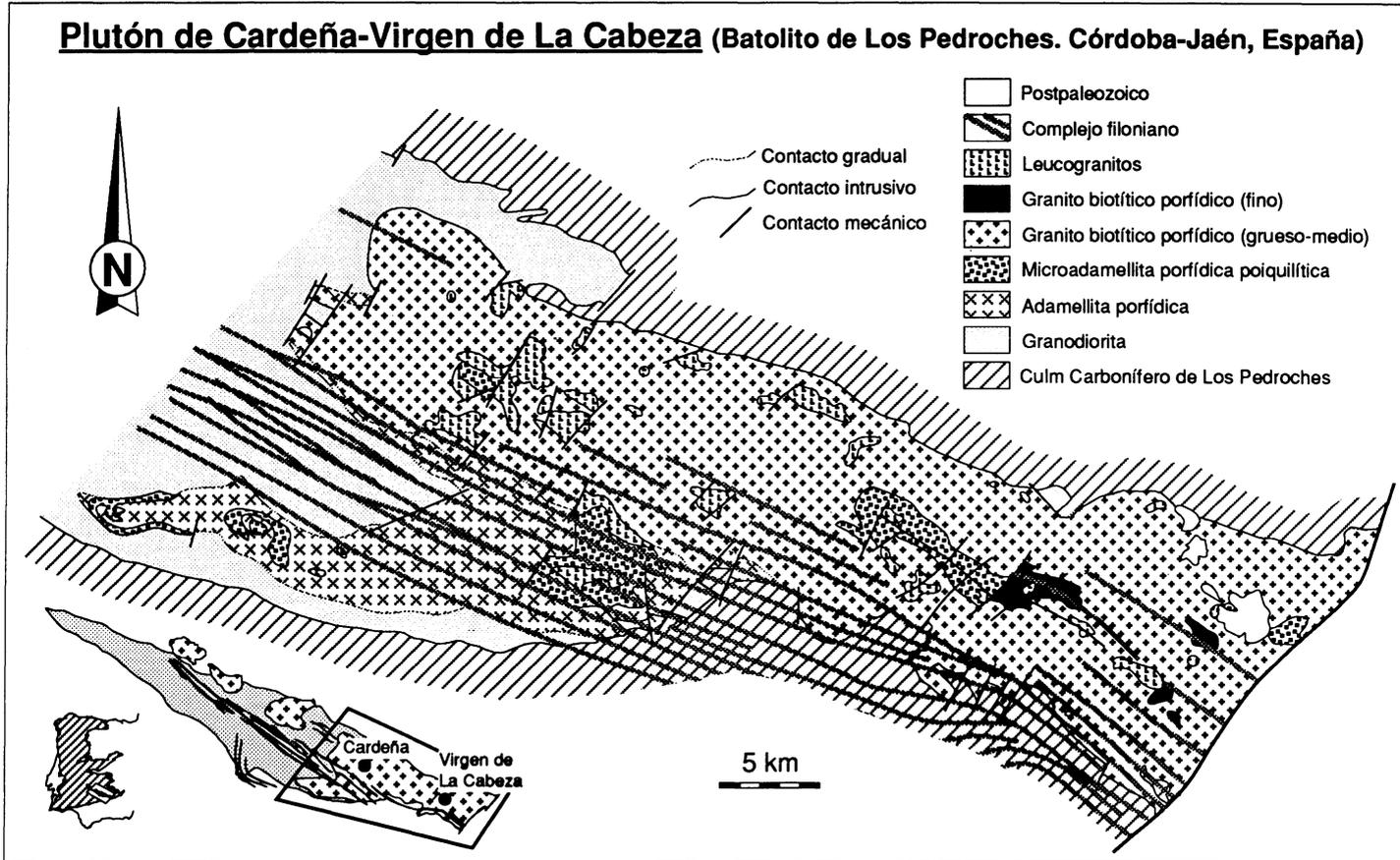


Fig. 2. Esquema cartográfico del plutón de Cardeña - Virgen de La Cabeza

títico porfídico de grano grueso. Mineralógicamente existe mayor abundancia de plagioclasa y biotita, en detrimento del contenido en cuarzo y feldespato potásico.

Microadamellitas porfídicas

Aparecen en relación tanto con granitos biotíticos como con adamellitas biotíticas, ofreciendo características mineralógico-químicas muy parecidas a las que presentan las adamellitas biotíticas de grano grueso.

Sus relaciones con las facies adamelíticas y graníticas de grano grueso son complejas y difíciles de precisar en cuanto a criterios de intrusión no habiéndose encontrado argumentos definitivos que permitan precisar el orden relativo de intrusión. En general los contactos son netos y de aspecto intrusivo; sin embargo, localmente se observan contactos graduales. Se ha interpretado a las microadamellitas como facies marginales, parcialmente cristalizadas, englobadas por los granitos y adamellitas durante el emplazamiento de éstos.

Las microadamellitas son rocas granudas, de color gris y tamaño de grano fino a medio, compuestas por cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa, biotita y en algunos casos moscovita; en proporciones variables aparecen megacristales de plagioclasa con tendencia idiomorfa y tamaño comprendido entre 0.5 y 2.5 cm.

Presentan una textura microgranuda hipidiomórfica, poiquilítica y ligeramente porfídica. Los minerales esenciales son *plagioclasa* maclada y/o zonada bien como fenocristales a menudo corroídos por cuarzo y feldespato alcalino, o en la matriz; *cuarzo* en cristales de aspecto estallado, con desarrollo de texturas poligonales; *feldespato potásico* subidiomorfo perfitico piquilítico y en fenocristales de hasta 1 cm, y feldespato potásico intersticial y xenomorfo; *biotita* en forma de cristales de talla pequeña. Los minerales accesorios son: *circón*, *apatito*, *opacos* y *cordierita*. Los minerales secundarios son: *sericita*, *clorita*, *pinnita*, *epidota*, *opacos* y *moscovita*.

Leucogranitos

Constituyen la facies más evolucionada del plutón, e intruyen a los litotipos descritos anteriormente. Afloran en la parte centro-septentrional del plutón, tanto en forma de masas como de diques de dirección variable. Se trata de rocas de color blanco a rosado, granudas y, muy localmente, porfídicas con fenocristales esporádicos de feldespato potásico de 1-1.5 cm. En general son rocas de grano fino a medio, y compuestas esencialmente por cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa y escasa biotita, destacando la presencia relativamente abundante de placas de moscovita.

Al microscopio presentan textura alotriomórfica, inequigranular, débilmente porfídica. Los minerales principales son: *cuarzo* xenomorfo; *feldespato potásico* generalmente intersticial y más raramente en forma de pequeños fenocristales; *plagioclasa* ($An_1 - 2$) maclada y raramente zonada; *moscovita* y *biotita* accesorias. La moscovita procede en muchos casos de la alteración de biotita, aunque en algunos casos resulta difícil asegurar su carácter secundario. Los minerales accesorios son: *apatito*, *circón*, *opacos* \pm *biotita*; \pm *topacio*; + *casiterita*; + *cordierita* \pm *andalucita*. Los minerales secundarios son: *sericita*, *epidota*, *clorita*, *moscovita*, *pinnita*, *opacos* y *feldespato potásico*. Ocasionalmente, sobre todo en rocas de grano fino, se observan abundantes texturas granofídicas con desarrollo de intercrecimientos gráficas micropegmatíticos y mirmequitas.

Diques NO-SE

El plutón de Cardeña-Virgen de La Cabeza está atravesado por un importante cortejo filoniano. Excluyendo las manifestaciones aplíticas, aplopegmatíticas, los filones de cuarzo y los escasos diques tardíos de afinidad lamprofídica, dicho cortejo está constituido por una espectacular red de filones de dirección N 120-140. Estos filones presentan una notable continuidad, en ocasio-

nes de hasta decenas de kilómetros. Cortan a todas las rocas que integran el plutón. Los tipos litológicos van desde los microgranitos porfídicos (pórfidos o diques riolíticos) hasta las microgranodioritas o microtonalitas porfídicas (pórfidos o diques dacíticos), con escasas variaciones mineralógicas pero notables variaciones texturales entre los diques, e incluso dentro de un mismo dique.

Los diques riolíticos están compuestos por fenocristales de: *cuarzo* que presentan golfos de corrosión; *ortosa* microclínizada, y *albita*: la matriz está formada por *cuarzo*, escasa *biotita*, y *feldespato potásico* formando coronas alrededor del *cuarzo* y *albita*.

Los diques dacíticos presentan un mayor contenido en fenocristales de *biotita* y *plagioclasa* más básica (oligoclasa), y megacristales de *feldespato potásico* orientados paralelamente a los bordes de los diques.

Enclaves

Xenolitos y enclaves microgranudos son relativamente abundantes en las facies adamellíticas, escasos en el granito biotítico porfídico, salvo en el sector del río de Las Yeguas, y totalmente ausentes en los leucogranitos. Aparecen los siguientes tipos de enclaves microgranudos:

— *Básicos*: compuestos por *plagioclasa* de composición intermedia, *biotita* y *anfíbol*. Su origen podría relacionarse con pro-

cesos de mezcla de magmas ácido-básico (CASTRO, 1990; CASTRO *et al.*, 1990).

— *Microtonalíticos*: caracterizados por la acumulación de *biotita* y relacionados probablemente con *schlierens* biotíticos.

— *Microadamellíticos*: similares a la *microadamellita* porfídica.

CARACTERIZACION GEOQUIMICA

En el desarrollo de este apartado se incluirán, junto con los datos del plutón estudiado, datos geoquímicos pertenecientes al plutón granodiorítico de Los Pedroches a fin de comparar resultados, realizar la caracterización geoquímica del plutón de Cardeña-Virgen de La Cabeza en el marco de la asociación magmática a la que pertenece y elaborar una posible hipótesis petrogenética sobre el conjunto magmático.

La representación de los datos geoquímicos de elementos mayores en diagramas de Harker (Fig. 4) muestra una evolución continua en la variación de SiO_2 entre términos granodioríticos, adamellíticos y graníticos. La evolución composicional está caracterizada por el descenso del contenido en Al_2O_3 , $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{t})$, MgO , CaO , TiO_2 y P_2O_5 , y el incremento en K_2O a medida que aumenta el contenido en SiO_2 . El Na_2O se mantiene aproximadamente constante en todas las litologías representadas. Los di-

TABLA I. Composición modal media de las rocas del plutón de Cardeña-Virgen de La Cabeza y de la granodiorita de Los Pedroches.

	Enclaves	Granodiorita	Adamellita	Microadam.	G.B.P.	Leucogranito	Diques
Cuarzo	16,03	26,99	27,79	27,17	30,78	35,33	15,92
Feldesp. K	0,022	9,25	18,52	24,84	27,25	33,60	15,58
Plagioclasa	39,42	50,43	41,41	36,46	32,01	26,69	16,84
Biotita	22,39	11,83	10,37	10,51	8,19	2,249	4,26
Moscovita	0	0,39	1,12	0,35	1,07	1,27	0,82
Anfíbol	19,89	0,02	0	0	0	0	0
Cordierita	0	0	0,08	0,07	0,11	0,10	0
Accesorios	2,25	0,99	0,70	0,77	0,62	0,60	0,42

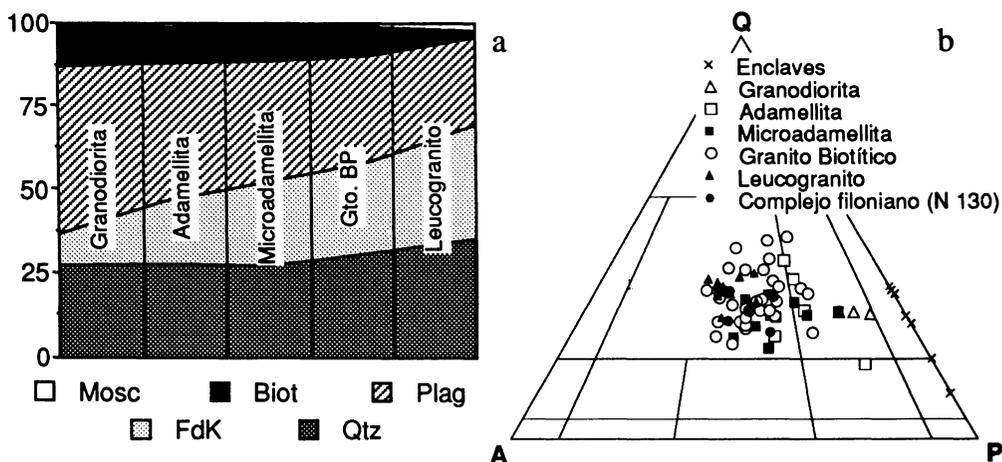


Fig. 3. Histograma acumulativo (a) y diagrama QAP (b) donde se reflejan las composiciones modales de las muestras estudiadas.

ques riodacíticos se integran bien en la secuencia geoquímica, mientras que los leucogranitos se separan del comportamiento general en algunos de los elementos mayores considerados (K_2O , P_2O_5 y Al_2O_3 , fundamentalmente). Los enclaves, en particular los de composición más básica, se desvían

de la tendencia evolutiva general en algunos elementos.

Los elementos traza evidencian un comportamiento compatible del V, Cr, Co y Ni, un comportamiento incompatible del Rb, el Sr presenta una evolución más compleja y el resto de los elementos traza analizados

TABLA II. Composición química media de las rocas del plutón de Cardeña- Virgen de La Cabeza y de la granodiorita de Los Pedroches (m: valores medios de "n" análisis; Stdev: desviación standart).

	Enclaves		Granodiorita		Adamellita biotítica		Microadamellita		Granito B Porfídico		Leucogranito		Diques 120-140	
	m (n=8)	Stdev	m (n=10)	Stdev	m (n=12)	Stdev	m (n=15)	Stdev	m (n=20)	Stdev	m (n=10)	Stdev	m (n=10)	Stdev
SiO ₂	57,38	4,56	66,87	0,8	69,95	1,09	69,71	0,96	71,98	1,02	75,73	0,49	71,14	2,1
TiO ₂	1,03	0,28	0,53	0,03	0,38	0,05	0,4	0,06	0,32	0,07	0,09	0,03	0,34	0,14
Al ₂ O ₃	16,61	0,79	15,58	0,25	15,16	0,48	15,16	0,47	14,34	0,43	13,22	0,53	14,3	0,47
Fe ₂ O ₃	7,34	1,4	3,61	0,31	2,64	0,34	2,74	0,32	2,41	0,32	1,02	0,26	2,47	0,78
MgO	5,12	1,17	2,14	0,26	1,25	0,2	1,2	0,27	0,65	0,31	0,17	0,12	0,92	0,44
CaO	4,82	1,54	2,82	0,18	1,82	0,2	1,99	0,43	1,16	0,38	0,49	0,24	0,79	0,36
Mn ₂ O	0,13	0,03	0,06	0,01	0,04	0,01	0,05	0,01	0,04	0,01	0,03	0,01	0,04	0,01
Na ₂ O	2,97	0,47	3,56	0,84	3,56	0,66	3,63	0,45	3,56	0,21	3,69	0,64	3,33	1,13
K ₂ O	3,09	0,38	3,84	0,09	4,1	0,33	4,01	0,59	4,61	0,41	4,82	0,28	5,02	0,51
P ₂ O ₅	0,42	0,21	0,22	0,02	0,18	0,02	0,18	0,04	0,18	0,06	0,05	0,03	0,17	0,03
PPC	1,24	0,28	0,81	0,28	0,94	0,26	0,95	0,15	0,78	0,02	0,71	0,2	1,51	0,06
Rb	168	83,17	159	7,12	193	17,11	191	32,97	266	53,55	293	94,24	239	96,16
Sr	526	217,35	371	46,84	307	40,32	296	105,4	112	70,64	46	35,4	111	107,3
Zr	152	29,36	128	10,73	109	14,34	146	43,31	148	32,66	56	24,06	125	71,1
V	76	44,02	47	4,31	25	8,56	25	11,38	30	33,08	13	12,55	11	8,8
Cr	226	113,23	171	18,79	156	14,92	144	16,27	149	18,15	136	24,28	139	33,13
Co	15	10,22	15	15,35	5	1,76	5	2,36	6	8	3	1,2	3	2,45
Zn	67	15,03	49	4,84	56	59,27	44	14,28	46	23,71	45	30,72	42	25,42
Ni	48	37,16	22	4,12	9	4,05	10	7,66	14	21,42	9	4,15	8	5,21
Y	14	4,58	12	2,17	11	3,93	9	3,53	16	5,34	14	7,93	17	6,99
F	930	153,22	569	76,2	589	262,13	671	314,33	1041	752,7	643	368,23	620	650,6
Ba	380	103,63	455	43,84	401	117,82	426	168,4	349	194,7	237	162,36	324	225,13
Pb	5	2,66	5	0,96	6	2,18	4	1,06	5	3,99	7	4,4	8	6,65
Pb	35	2,12	6	6,67	28	8,75	24	9,78	33	13,23	41	13,43	54	107,5

ofrecen una gran dispersión de los datos, sin definir tendencias evolutivas concretas. El Sr presenta una conducta ligeramente incompatible en los terminos granodioríticos, invirtiendo su comportamiento a niveles de SiO₂ del orden del 68-70 %, pasando a comportarse como claramente compatible a partir de las litologías adamellíticas. El cambio en la evolución del Sr aparece también paralelamente reflejado en el comporta-

miento del Rb, incrementando aún más su carácter incompatible a partir de las adamellíticas. Los leucogranitos se separan nuevamente en algunos casos de las tendencias evolutivas generales de los grupos descritos. Los diques riódacíticos se integran bien en las líneas evolutivas mientras que los enclaves se adaptan, en mayor o menor medida, a las pautas evolutivas señaladas por el resto de las rocas de la asociación magmática.

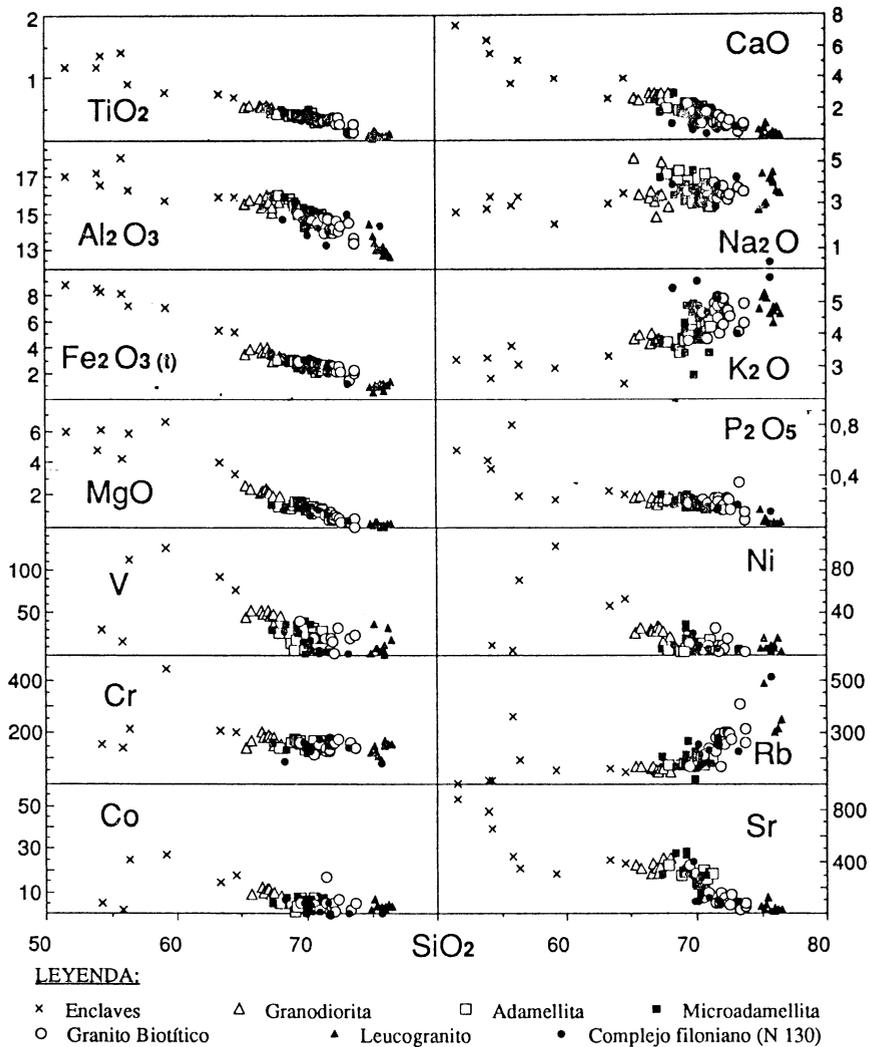


Fig. 4. Diagramas de variación de Harker

Considerando los elementos de las tierras raras (Fig. 5), los granitos porfídicos constituyen las litologías más ricas en REE, mientras que los leucogranitos son las más pobres y presentan la mayor anomalía negativa en Eu. Las granodioritas de Los Pedroches y las ademellitas muestran espectros de REE bastante semejantes y contenidos en REE intermedios entre los granitos y los leucogranitos.

En conjunto, los contenidos en tierras raras permiten identificar varios estadios evolutivos caracterizados por:

i) Un ligero enriquecimiento en LREE, un empobrecimiento moderado en HREE y un aumento en la anomalía negativa de Eu, correspondiente al tránsito *granodioritas* → *ademellita*.

ii) Un comportamiento incompatible para todas las REE, a excepción del Eu, corresponde a la transición *ademellita* → *granito porfídico*. Este cambio evolutivo producido a partir de las rocas adamellíticas (con contenidos en SiO₂: 68-70 %), coincide con el observado para el Rb y Sr.

iii) Considerando los leucogranitos como integrantes de la secuencia evolutiva, un tercer estadio aparece reflejado por el descenso del contenido en REE con aparición de una acusada anomalía en Eu: tránsito *granitos* → *leucogranitos*.

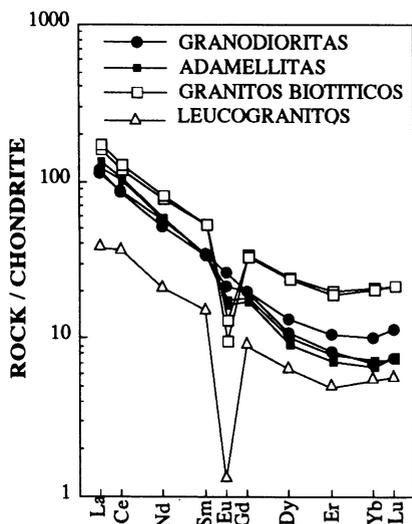


Fig. 5. Diagrama de variación de las tierras raras.

La representación de las litologías consideradas en un diagrama AFM (Fig. 6), sugiere que éstas conforman los términos evolucionados de una serie calcoalcalina. En los diagramas de DEBON y LEFORT (1983) se reconoce el carácter calcoalcalino y mayoritariamente peraluminoso de las litologías del conjunto plutónico considerado. Asimismo, en el diagrama A-B, se observa una buena correlación entre la mineralogía real

TABLA III. Datos analíticos de las tierras raras.

Muestra	GRANODIORITA		ADAMELLITA			GRANITO			LEUCO	DIOQUES N 130	
	AE-3	AE-128	PL-2	MC-3	PL-200	AE-112	AE106	PL-40	PL-222	PA-77	PA-90
La	28,71	27,66	30,60	33,50	39,44	39,34	41,76	29,71	11,61	24,16	35,56
Ce	54,99	55,64	66,43	68,54	72,41	76,03	81,35	59,58	11,86	56,77	69,45
Nd	24,67	27,02	27,50	28,32	31,55	36,6	38,09	30,62	6,06	24,14	27,5
Sm	5,13	5,37	5,33	5,18	5,94	8,21	8,07	6,18	1,55	5,2	5,18
Eu	1,25	1,53	1,03	0,97	0,89	0,56	0,75	0,79	0,07	0,4	0,69
Gd	4,05	4,03	3,81	3,55	4,63	6,92	6,75	4,61	1,42	3,9	3,66
Dy	3,34	2,77	2,63	2,40	3,50	6,16	6,00	2,82	1,27	2,84	2,32
Er	1,74	1,38	1,35	1,22	1,84	3,31	3,16	1,33	0,79	0,13	1,06
Yb	1,67	1,14	1,24	1,12	1,88	3,48	3,34	1,25	0,84	1,16	0,91
Lu	0,29	0,19	0,19	0,20	0,35	0,54	0,55	0,16	0,08	0,24	0,14
LaN/YbN	11,60	16,38	16,66	20,19	14,16	7,63	8,44	16,04	9,33	14,06	26,38
LaN/SmN	3,52	3,24	3,61	4,07	4,18	3,02	3,26	3,03	4,72	2,93	4,32
GdN/YbN	1,96	2,86	2,48	2,56	1,99	1,61	1,63	2,98	1,37	2,72	3,25
Σ REE	125,84	126,73	140,11	145,00	162,43	181,15	189,82	137,05	35,55	120,11	146,47

de la mayoría de las rocas y su situación en los diferentes campos del dominio peraluminoso. Algunas muestras, en su mayoría enclaves, se desvían algo de dicha correlación. En los diagramas de la Fig. 7 se observa que, exceptuando los enclaves básicos y leucogranitos, las litologías mayoritarias definen una asociación aluminico-cafémica compuesta casi totalmente por términos aluminosos (cf. LARREA *et al.*, 1988). Los leucogranitos constituyen una asociación aluminosa y leucocrática. Los enclaves básicos representan términos caféficos, aunque, por el momento, no se dispone de suficientes datos analíticos para precisar su caracterización.

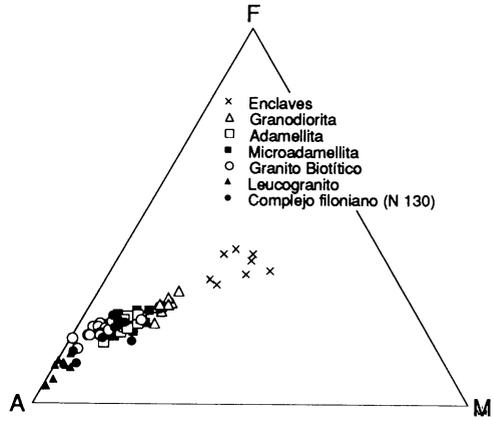


Fig. 6. Diagrama AFM

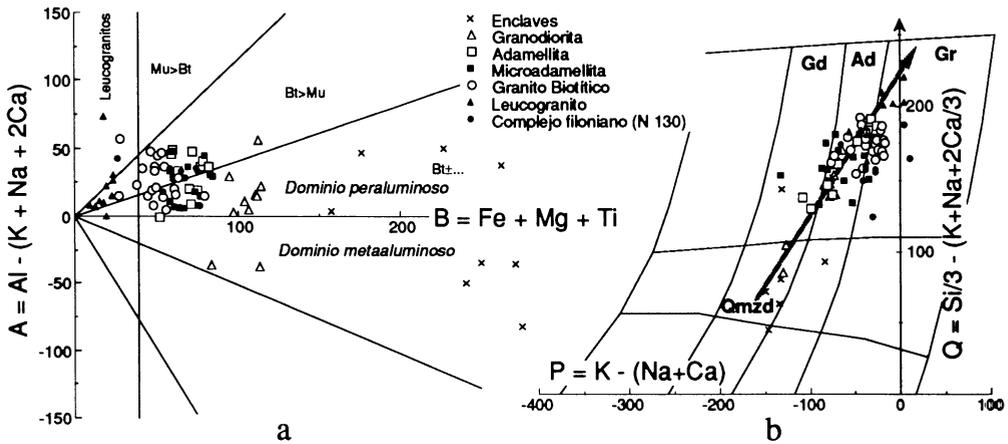


Fig. 7. Diagramas A-B (a) y P-Q (b) de Debon y Le Fort (1982)

Identificación del proceso genético

Los diagramas de variación de elementos traza representados en la Fig. 8 sugieren que las rocas que conforman la alineación magmática del batolito de Los Pedroches, podrían estar relacionadas genéticamente a través de un proceso de cristalización fraccionada (cf. CARRACEDO *et al.*, 1990; CARRACEDO, 1991). Tan sólo leucogranitos y algunos enclaves se desvían de la evo-

lución general del conjunto de rocas que conforman la asociación magmática.

Como ya se ha señalado, los diagramas de variación para Rb y Sr presentan espectros evolutivos segmentados con cambios de pendiente coincidentes con valores de SiO₂ del 68-70 %. Este fenómeno puede ser explicado por una variación en la contribución cuantitativa de las fases minerales implicadas en la fraccionación. El primer segmento evolutivo —granodioritas a adamellititas—

estaría controlado por la fraccionación de plagioclasa, biotita y anfíbol, manteniéndose el comportamiento ligeramente compatible de los dos elementos traza considerados. En el segundo segmento, a niveles de SiO_2 del orden del 68-70 % —*adamellititas*—, se incorporaría a la fraccionación el feldespato potásico, desapareciendo de ella el anfíbol; el Rb aumentaría entonces su carácter incompatible mientras que por el contrario el Sr pasaría a comportarse como compatible.

Esta variación del comportamiento durante la cristalización fraccionada, se puede observar también en los diagramas de variación de REE del conjunto plutónico. En el primer estadio evolutivo —*granodioritas* → *adamellititas*—, la participación del anfíbol en la fraccionación, con coeficientes de distribución menores para las LREE que para las HREE, provocaría un incremento en el contenido en LREE, en detrimento del contenido en HREE, junto con un ligero descenso del contenido en Eu. En un segundo estadio evolutivo, —*adamellititas* → *granitos porfíricos de grano grueso*—, a partir del 68-70 % en SiO_2 , intervendría en la fraccionación el feldespato potásico, desapareciendo de la misma el anfíbol. Este cambio en la mineralogía fraccionada provoca que todas las REE, con excepción del Eu, se comporten como elementos incompatibles. Por último, un tercer estadio —*granitos porfíricos* → *leucogranitos*—, caracterizado por un empobrecimiento acusado en el contenido total de REE (comportamiento frecuente en magmas muy félsicos, MILLER & MITTFEHLDT, 1983), podría deberse a la fraccionación de minerales accesorios ricos en REE (esfena, apatito, allanita, monacita, xenotima, cf. MCHARTHY & KALBLE, 1978; MILLER & MITTFEHLDT, 1983), o bien a un cambio en los coeficientes del reparto de los elementos que intervienen en la fraccionación, en respuesta a la polimerización del fundido por descenso de la temperatura durante la diferenciación (cf. MAHOOD, 1981; SAWKA *et al.*, 1984; MICHAEL, 1988).

Petrográficamente se ha detectado la presencia de minerales ricos en REE, como circón y apatito, en los granitos porfíricos. Otros minerales también ricos en REE, como monacita y xenotima, se han hallado en aluviones asociados a dichos granitos (NAVEZ, 1978; LEAL & VAQUERO, 1971). Esto sugiere la participación de minerales accesorios en la fraccionación para explicar, al menos en parte, el carácter compatible de las REE en este último estadio (CARRACEDO *et al.*, 1989).

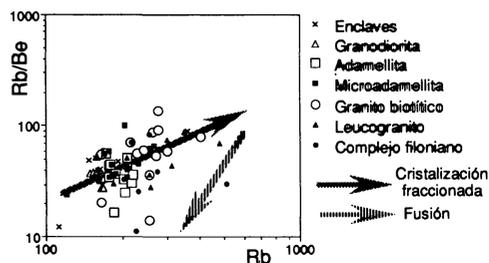


Fig. 8. Diagrama de variación de elementos traza relacionado con el proceso genético.

CONCLUSIONES

El plutón de Cardeña-Virgen de La Cabeza, perteneciente a la asociación magmática del batolito de Los Pedroches, se compone de tres tipos mayoritarios de rocas, emplazadas según el siguiente esquema cronológico: *adamellititas biotíticas* → *granitos biotíticos porfíricos* → *leucogranitos*.

El conjunto plutónico se completa con un complejo filoniano constituido por diques de composición granítico-adamellitica, aplitas, pegmatitas y diques de cuarzo.

Las relaciones de campo, mineralógicas y geoquímicas sugieren una relación genética entre el plutón y la granodiorita de Los Pedroches. Los datos disponibles apuntan hacia una serie de diferenciación magmática continua dominada por un mecanismo de cristalización fraccionada, que evoluciona

desde los términos granodioríticos hasta los graníticos. Los términos intermedios entre los dos extremos de rocas tradicionalmente considerados están representados por las adamellitas biotíticas.

Geoquímicamente, el plutón de Cardeña-Virgen de La Cabeza presenta mayoritariamente términos aluminosos de una asociación alcafémica calcoalcalina, con los leucogranitos definiendo una asociación aluminosa y leucocrática (en el sentido de DEBON y LEFORT, 1983).

La variación en la evolución de Rb, Sr y REE, a niveles de contenidos en SiO₂ del orden del 68-70 % (granodioritas intermedias-adamellitas) se relacionaría con la intervención de feldespato potásico y la desaparición de anfíbol en la fraccionación, coincidiendo con la aparición de megacrists

tales magmáticos de feldespato potásico —además de cordierita accesoria—, y la desaparición de anfíbol en las adamellitas.

Las bajas relaciones isotópicas iniciales del conjunto de rocas del batolito sugieren la participación de un componente mantélico en la región del área fuente. Por el momento no es posible explicar el origen de dicho componente, aunque existen evidencias menores de mezcla de magmas ácidos y básicos (cf. VERNON, 1984; CASTRO *et al.* 1990) y, asimismo, mecanismos de «underplating» de magmas básicos podrían explicar el aporte térmico necesario para producir fusión parcial de la corteza en una región en donde los procesos de imbricación y/o denudación tectónicos ligados a la orogenia hercínica parecen ser poco relevantes (cf. FERNANDEZ *et al.*, 1990).

BIBLIOGRAFÍA

- ARRIOLA, A., EGUIGUREN, E., GARROTE, A. (1983). El batolito de Los Pedroches en la transversal de Esparragosa de La Serena (Badajoz). *V Reunión del G. O. M.* pp. 19-28.
- CARRACEDO, M. (1991). Contribución al estudio del batolito de Los Pedroches. Tesis Doctoral, Universidad del País Vasco, 443 pp.
- CARRACEDO, M., ORTEGA, L. A., GIL IBARGUCHI, J. I., SANCHEZ CARRETERO, R. (1989). Aportación a la geoquímica de tierras raras en el batolito de Los Pedroches (Córdoba-España). *Studia Geol. Salm.*, 4 pp., 93-104.
- CARRACEDO, M., EGUILUZ, L., GIL IBARGUCHI, J. I., TIJERO, F. (1990). Cartografía, petrología y geoquímica del plutón de Cerro Mogábar, batolito de Los Pedroches (Córdoba-España). *Studia Geol. Salm.*, 4 pp 93-104.
- CASTRO, A. (1990). Microgranular enclaves of the Quintana granodiorite (Los Pedroches batholith). Petrogenetic significance. *Rev. Soc. Geol. Esp.*, 3, pp. 7-21.
- CASTRO, A., MORENO-VENTAS, I., DE LA ROSA, J. D. (1990). Microgranular enclaves as indicators of hybridization processes in granitoid rocks. Hercynian Belt, Spain. Wally Pitcher Conference, Univ. of Liverpool, *Geol. L.*, 25 pp. 391-404.
- DEBON, F., LEFORT, P. (1982). A chemical-mineralogical classification of plutonic rocks and associations». royal Society of Edimburgh: *Earth Sciences*, n.º 73, pp. 135-197.
- ERASO, A. (1980). El batolito de Los Pedroches en la transversal de Cardeña (Córdoba). Tesis de Licenciatura, U. P. V., 87 pp.
- EVENSEN, M. M., HAMILTON, P. J., O'NIONS, R. K. (1978). Rare earth abundances in chondritic meteorites. *Geoch. Cosmoch. Acta*, 42, pp. 1199-1212.
- FERNANDEZ, F. J., CUETO, L. A., LARREA, F. J., QUESADA, C. (1990). El plutón de El Guijo: petrología, geoquímica, edad y relación con otras rocas del batolito de Los Pedroches. *Cuad. Lab. Xeol. Laxe*, 15, pp.89-103.
- FERNANDEZ, F. J., QUESADA, C., CUETO, L. A., LARREA, F. J. (en prensa). Mapa geológico de España, escala 1: 50000 2.ª serie Magna, hoja n.º 882: Cardeña, I. T. G. E. Madrid.
- LALIEUX, P. (1982-83). Etude petrologique et geochemique du batholite de Los Pedroches (Sierra Morena-Espagne). Tesis de grado, Universidad de Bruselas, 136 pp.
- LARREA, F. J., CARRACEDO, M., GIL IBARGUCHI, J. I., SANCHEZ CARRETERO, R., SAN-

- CHEZ PEREZ, J. M. (1988). El magmatismo hercínico del batolito de Los Pedroches: la asociación plutónica en la zona de la Virgen de la Cabeza (Jaén, España). *II Congreso Geológico de España*, 2, pp. 43-46, Granada.
- LARREA, F. J., QUESADA, C., CUETO, L. A., FERNANDEZ, F. J. (en prensa). Mapa geológico de España, escala 1: 50000 2.^a serie (*Magna*), hoja n.º 881: Villanueva de Córdoba. I. T. G. E. Madrid.
- LARREA, F. J. CUETO, L. A., QUESADA, C., FERNANDEZ, F. J. (en prensa). Mapa geológico de España, escala 1: 50000 2.^a serie (*Magna*), hoja n.º 883: Virgen de La Cabeza. I. T. G. E. Madrid.
- LARREA, F. J., CUETO, L. A., QUESADA, C., J. FERNANDEZ, F. J. (en prensa). Mapa geológico de España, escala 1: 50000 2.^a serie (*Magna*), hoja n.º 904. Andújar. I. T. G. E. Madrid.
- LARREA, F. J. (1987). Estudio geológico del Batolito de Los Pedroches en la transversal de La Virgen de La Cabeza (Andujar, Jaén). Tesis de Licenciatura, Universidad del País Vasco, 259 pp.
- LEAL, G. & VAQUERO, C. (1971). La prospección de aluviones sistematizada en la fase estratégica de la investigación minera de grandes áreas. Aplicación al complejo granítico de Los Pedroches (Córdoba). *I Congreso Hispano-Luso-Americano de Geol. Appl.*, pp. 139-160.
- MAHOOD, G. A. (1981). A summary of the geology and petrology of the Sierra la Primavera, Jalisco, Mexico. *J. Geophysics, Res.*, 86, pp. 10137-10252.
- McCARTHY, T. S. & KALBLE, E. D. J. (1978). On behavior of REE during partial melting of granitic rocks. *Chem. Geol.*, 22 pp. 21-29.
- MICHAEL, P. L. (1988). Partition coefficients for REE in mafic minerals of high silica rhyolites: the importance of accessory minerals inclusions. *Geoch. Cosmoch. Acta*, 52, PP. 275-282.
- MILLER, C. F. & MITTFELDEHLDT, D. W. (1983). Depletion of LREE in felsic magmas. *Geology*, 10, pp. 129-133.
- NAVEZ, J. (1978). Relation entre les alluvions stanníferes de la region de Conquista et le granite du mont Mogabar. *Min. Fac. Sc. Sev. Geol. Appl.*, U. L. B.
- OVTACHT, A., TAMAIN, G. (1973). Tectonique, migration des centres chauds et mineralisations dans le sud de la Meseta Ibérique (Espagne). *Lab. de G. E. et A. de la U. Paris-S*, pp. 191-211.
- QUESADA, C. et al. (1987). Mapa geológico-minero de Extremadura, 131 pp., Madrid.
- SANCHEZ PEREZ, J. M., CARRACEDO, M., GIL IBARGUCHI, J. I., SANCHEZ CARRETERO, R., LARREA, F. J. (1988). El magmatismo hercínico del batolito de Los Pedroches: la asociación plutónica en la zona de Pozoblanco (Córdoba, España). *II congreso Geológico de España*, 2, pp. 67-70, Granada.
- SAWKA, W. N., CHAPPELL, B. W., NORRISH, K. (1984). LREE zoning in sphene and allanite during granitoid fractionation. *Geology*, 12, pp. 131-134.
- VERNON, R. H., ETHERIDGE, M. A., WALL, V. J. (1988). Shape and microstructure of microgranitoid enclaves: indicators of magma mingling and flow. *Lithos*, 22, pp. 1-11.

*Recibido, 10-IV-92
Aceptado, 26-VIII-92*