



Instituto Tecnológico
GeoMinero de España

boletín

geológico

y minero

VOLUMEN 102

Septiembre - Octubre 1991

NUMERO 5



REVISTA BIMESTRAL DEL ITGE FUNDADA EN 1874

ISSN 0366 -0176

El Instituto Tecnológico GeoMinero de España, ITGE, que incluye, entre otras, las atribuciones esenciales de un «Geological Survey of Spain», es un Organismo autónomo de la Administración del Estado, adscrito al Ministerio de Industria y Energía, a través de la Secretaría General de la Energía y Recursos Minerales (R. D. 1.270/1988, de 28 de octubre). Al mismo tiempo, la Ley de Fomento y Coordinación General de la Investigación Científica y Técnica le reconoce como Organismo Público de Investigación. El ITGE fue creado en 1849.

Volumen 102
Número 5
Septiembre - Octubre 1991

boletín geológico y minero

revista bimestral de geología, minería y ciencias conexas fundada en 1874 - 5.ª serie

Sumario

Geología	B. ABALOS, L. EGUILUZ y J. I. GIL IBARGUCHI: Evolución tectono-metamórfica del Corredor Blastomilonítico de Badajoz-Córdoba. II: Las unidades alóctonas y trayectorias PTt 3
Minería	A. E. FERRER MODOLELL: Estudio metalográfico del yacimiento polimetálico de Sant Martí Sacalm (macizo de Les Guilleries, prov. de Girona). 58
Aguas subterráneas	X. FONT CISTERO y A. NAVARRO FLORES: Aplicación de métodos estadísticos uni- y multivariantes a estudios de contaminación. El caso de la Cubeta de La Llagosta 71
Geoquímica	S. DEL BARRIO MARTIN, R. BENITO GARCIA y F. J. VALLE FUENTES: Contribución del binomio horno de microondas-espectrometría de plasma al análisis de suelos 92
Geotecnia	V. G. RUIZ DE ARGANDOÑA, A. MARTINEZ HERNANDO y M. MONTOTO: Determinación experimental de la permeabilidad de la roca matriz o «intact rock»: Factores condicionantes 100
Ingeniería GeoAmbiental	B. MARISCAL: Características climáticas y ambientales durante el Holoceno en Almizaraque. Análisis polínico de los sedimentos fluviales de Villaricos (Almería) 112
Estudio de minerales y rocas	A. APARICIO, J. M. BRELL, R. GARCIA, J. TENA y J. GOMEZ: El metamorfismo de bajo grado en el Paleozoico del sector central de la Cordillera Ibérica 121
Información	150 Aniversario Lucas Mallada (1841-1991) (Colaboraciones de E. Llorente, E. García, F. J. Ayala y J. Tusell) 134 E. GARCIA ALVAREZ: Minería e industrias de la construcción ante el Mercado Unico de 1993 144 Noticias y Notas Bibliográficas 148

DIRECCION, REDACCION Y PUBLICACION

Ríos Rosas, n.º 23 - 28003-Madrid
Teléfono 441 70 67

ADMINISTRACION, DISTRIBUCION Y SUSCRIPCION

Doctor Fleming, 7. 2.º - 28036-Madrid
Teléfono 250 02 03

INSTITUTO TECNOLOGICO GEOMINERO DE ESPAÑA

CENTRO DE PUBLICACIONES
MINISTERIO DE INDUSTRIA, COMERCIO Y TURISMO

El Instituto Tecnológico GeoMinero de España hace presente que las opiniones y hechos consignados en sus publicaciones son de la exclusiva responsabilidad de los autores de los trabajos

Los derechos de propiedad de los trabajos publicados en esta obra fueron cedidos por los autores al Instituto Tecnológico GeoMinero de España.
Queda hecho el depósito que marca la Ley.

EXPLICACION DE LA PORTADA

Tubo de lava en una colada tefrítica correspondiente a la Serie IV. Borde oriental de Las Cañadas del Teide (Tenerife).

Autor: Félix Bellido Mulas.

Depósito legal: M. 3.279 - 1958
ISSN 0366 - 0176
NIPO 232 - 91 - 020 - 2

Imprenta IDEAL, S. A. - Chile, 27 - Telef. 259 57 55 - 28016-MADRID

Evolución tectono-metamórfica del Corredor Blastomilonítico de Badajoz-Córdoba. II: Las unidades alóctonas y trayectorias PTt.

Por B. ABALOS (*), L. EGUILUZ () y J. I. GIL IBARGUCHI (**)

RESUMEN

Este trabajo, el segundo de una serie de dos, presenta los resultados de las investigaciones realizadas sobre el metamorfismo y evolución tectonotérmica del tercio central del Corredor Blastomilonítico de Badajoz-Córdoba en lo que se refiere a la Unidad Alóctona. Se realiza el estudio petrológico detallado del metamorfismo registrado por los materiales de cada una de las láminas tectónicas que componen el apilamiento alóctono; se calculan las condiciones de presión y temperatura alcanzadas en diversos momentos de los episodios metamórficos M₁ (Proterozoico Superior) y M₂ (Hercínico), y se interpretan a la luz de las relaciones metamorfismo-deformación. Los recorridos Presión-Temperatura-tiempo (PTt) determinados permiten establecer las relaciones que existen entre unidades metamórficas con características litoestratigráficas e historias tectono-térmicas diferentes, evidenciar el carácter polimetamórfico del Corredor Blastomilonítico de Badajoz-Córdoba y discutir su significado en el contexto de procesos de subducción-colisión durante la orogenia pan-africana.

Palabras clave: Metamorfismo, Geotermo-barometría, Trayectorias PTt, Corredor Blastomilonítico de Badajoz-Córdoba, Ossa-Morena, Macizo Ibérico.

ABSTRACT

This paper, the second of a two-fold contribution, presents the results of works dealing with the metamorphism and tectonothermal evolution of the central part of the Badajoz-Córdoba Shear Zone. Attention is paid to the metamorphism of the so-called Allochthonous Unit, for which a detailed petrologic study is given. The pressures and temperatures attained at different moments of the M₁ (Upper Proterozoic) and M₂ (Upper Paleozoic) episodes have been esteemed and interpreted in the light of metamorphism-deformation relationships. Pressure-Temperature-time paths reconstructed let establish the relations between metamorphic units with different lithostratigraphic characteristics and tectonothermal histories demonstrate the poly-metamorphic evolution of the Badajoz-Córdoba shear zone and discuss their meaning in a context of pan-african (Upper Proterozoic) subduction-collision events.

Key words: Metamorphism, Geothermo-barometry, PTt paths, Badajoz-Córdoba Shear Zone, Ossa-Morena, Iberian Massif.

1. INTRODUCCION

En este trabajo se aborda la segunda parte del estudio del metamorfismo de los materiales aflorantes en la banda de cizalla o Corredor Blastomilonítico de Badajoz-Córdoba, iniciado e introducido en ABALOS et al. (1991). Como se indica en el citado artículo, el Corredor Blastomiloníti-

co está constituido por un complejo gneísico alóctono emplazado tectónicamente sobre un conjunto para-autóctono de naturaleza metapelítica (Unidad Para-autóctona). ABALOS et al (1990) proponen una subdivisión de los materiales del Corredor Blastomilonítico de forma tal que se puede establecer una columna completa de la Unidad Alóctona citada anteriormente a base de un conjunto de láminas apiladas tectónicamente y separadas por importantes zonas de cizalla que presentan características litoestratigráficas e historias metamórficas diferentes:

(*) Depto. de Estratigrafía, Geodinámica y Paleontología. Univ. del País Vasco. Apdo. 644. 48080 Bilbao (España).
(**) Depto. de Mineralogía y Petrología. Univ. del País Vasco. Apdo. 644. 48080 Bilbao (España).

- Gneises Milonita de Higuera de Llerena, en la base.
- Lámina Blastomilonítica de Gneises Migmáticos.
- Lámina Eclogítica.
- Complejo Leptino-anfibolítico.
- Serie Negra, en el techo del apilamiento.

A continuación se desarrolla un estudio detallado del metamorfismo de estas unidades y se indican algunas de las características del metamorfismo sufrido por materiales de las series paleozoicas situadas al NE de la Falla de Hornachos (que limita por el NE al Corredor) y de los materiales metapelíticos de las cuencas carboníferas existentes en su seno. Finalmente, se analizan las evoluciones PTt sufridas por las diferentes unidades presentes y se discuten su posible significado tectonotérmico, el ambiente tectónico y los procesos geodinámicos condicionantes de la distribución observada de evoluciones PTt.

2. METAMORFISMO DE LA UNIDAD ALOCTONA

La Unidad Alóctona está afectada por un metamorfismo de grado variable entre la parte de alta temperatura del grado bajo y el grado alto. Este metamorfismo es más intenso hacia la base de la Serie Negra y en el conjunto basal del apilamiento de unidades tectónicas, donde predomina el grado medio. El metamorfismo más extendido se relaciona con la fase de deformación regional D₂, y se superpone a otro anterior que se ha conservado relicto y que alcanza el grado alto entre los materiales metapelíticos de los gneises milonita de Higuera de Llerena y de los gneises de Azuaga, entre algunas metabasitas (en las que presenta caracteres eclogíticos) y en la base de la Serie Negra.

2.1. METAMORFISMO DE LOS TERMINOS PELITICOS Y CUARZO-FELDESPATICOS DE LOS GNEISES MILONITA DE HIGUERA DE LLERENA Y DE LOS GNEISES DE AZUAGA

2.1.1. Asociaciones minerales

En los gneises milonita de Higuera de Llerena se han reconocido las asociaciones (láminas 1 y 2):

- cuarzo - plagioclasa - Fd potásico - biotita - granate - sillimanita
 - cuarzo - plagioclasa - Fd potásico - biotita - sillimanita - (granate) - (cianita)
 - cuarzo - plagioclasa - Fd potásico - biotita - (granate) - (cianita) - sillimanita - moscovita
- en las facies gneísicas de grano grueso y fino, y:
- cuarzo - feldespatos - (granate) - (cianita) - fibrolita - biotita - moscovita

retromorfoseada por cloritas y sericita en el tramo ultramilonítico suprayacente. En estas últimas rocas las relaciones texturales observadas permiten establecer que en el curso del metamorfismo progrado a una asociación de grado medio con granate-cianita-moscovita-biotita se superpone otra de grado alto con biotita-granate-sillimanita. En esta última el granate aparece en equilibrio, conteniendo en su interior agujas de fibrolita. La moscovita aparece prácticamente en todos los casos como fase secundaria asociada a los procesos de retromorfosis.

En la sucesión de gneises pelíticos y cuarzopelíticos que constituye la lámina blastomilonítica de gneises migmáticos el metamorfismo M₁ alcanza la anatexia.

Los gneises biotíticos son gneises migmáticos con sillimanita en los que predominan las asociaciones como (lámina 2):

- cuarzo - plagioclasa - Fd potásico - biotita
- cuarzo - plagioclasa - Fd potásico - biotita - granate - sillimanita
- cuarzo - plagioclasa - Fd potásico - biotita - granate - sillimanita - (cianita) - moscovita
- cuarzo - plagioclasa - Fd potásico - biotita - sillimanita - (granate) - (cianita) - (moscovita₁) - moscovita₂
- cuarzo - plagioclasa - Fd potásico - biotita - granate - hornblenda

apareciendo la última asociación indicada en gneises biotíticos con hornblenda. La sillimanita suele aparecer en cristales columnares formando agregados, como colas alargadas de fibrolita nucleadas en cristales relictos de cianita, o como agujas de fibrolita en el interior de feldespatos. Junto con cuarzo, feldespatos y biotita, forma una asociación estable por encima de la curva de destrucción de la moscovita, claramente de grado alto y de carácter migmático. Algunas variedades de gneises biotíticos llevan cianita o

LAMINA 1



Ejemplos de asociaciones metamórficas observadas en los gneises milonita de Higuera de Llerena. 1, granate-biotita-cianita/sillimanita-cuarzo-feldespato; 2, cuarzo-biotita-cianita parcialmente transformada en sillimanita; 3, nódulo de sillimanita parcialmente moscovitizada en cuyo interior quedan algunos cristales rotos de granate y de cianita; 4, asociación con granate-sillimanita-biotita-cuarzo. Barras de escala: 0.2 mm. Nícoles paralelos.

granate y cianita como fases relictas que evidencian un metamorfismo progrado de presiones intermedias y grado medio anterior a la anatexia. Estos minerales, junto con cristales orientados de moscovita y cuarzo en el interior de porfiroclastos de granate, permiten definir las asociaciones del metamorfismo progrado en grado medio:

- cuarzo - feldespatos - biotita - moscovita - granate - cianita

En las variedades miloníticas y ultramiloníticas aparecen cristales o placas de moscovita retro-

metamórfica recrecidas sobre masas de sillimanita o en el interior de bandas biotíticas.

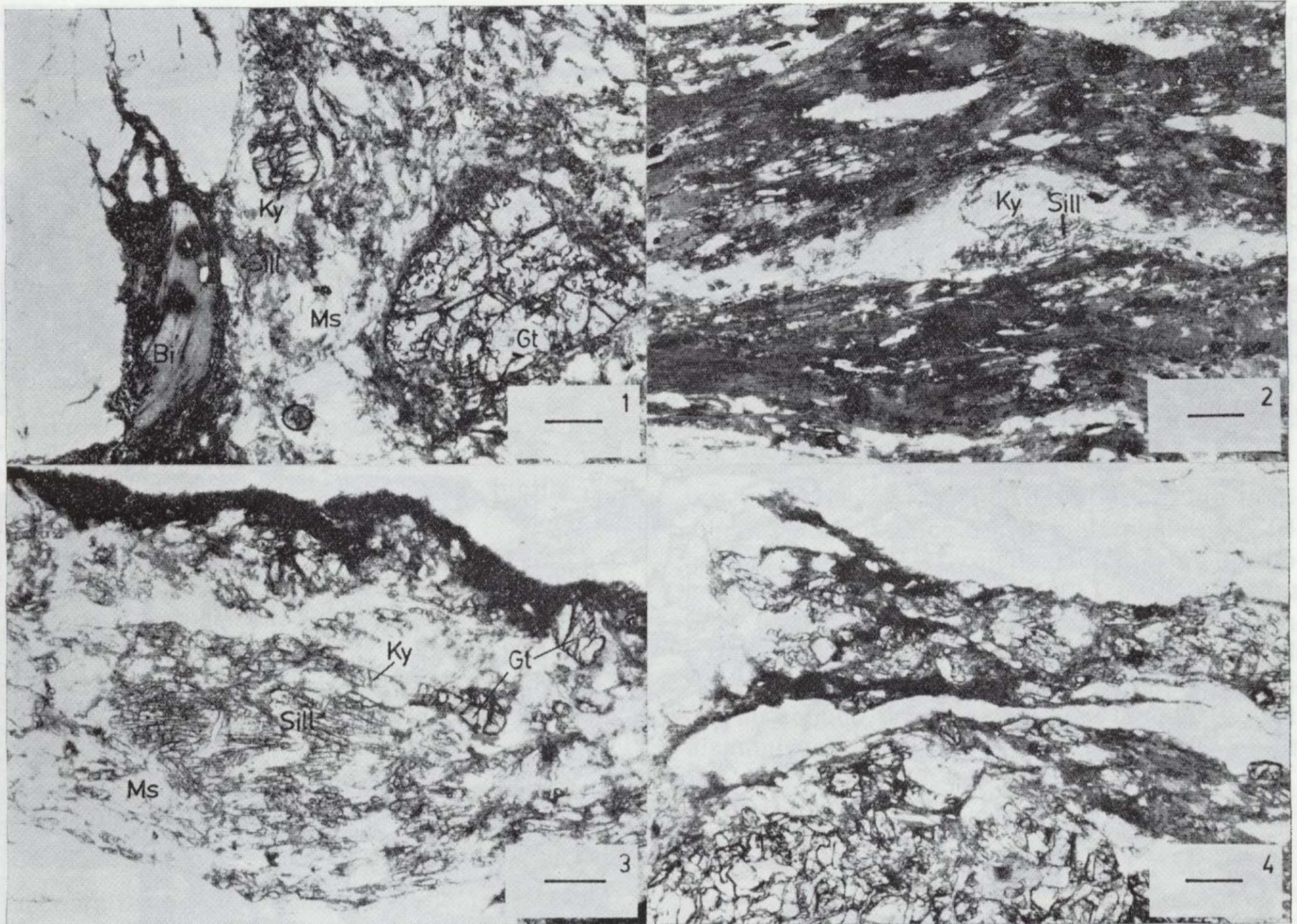
En rocas blastomiloníticas intercaladas entre anfibolitas y eclogitas las asociaciones presentes son, principalmente, del tipo:

- cuarzo - plagioclasa - Fd potásico - biotita - granate - rutilo

y aparecen retromorfoseadas en diverso grado por cloritas, moscovita, ilmenita, sericita y carbonatos:

- cuarzo - feldespatos - moscovita - biotita

LAMINA 1



Ejemplos de asociaciones metamórficas observadas en los gneises milonita de Higuera de Llerena. 1, granate-biotita-cianita/sillimanita-cuarzo-feldespato; 2, cuarzo-biotita-cianita parcialmente transformada en sillimanita; 3, nódulo de sillimanita parcialmente moscovitizada en cuyo interior quedan algunos cristales rotos de granate y de cianita; 4, asociación con granate-sillimanita-biotita-cuarzo. Barras de escala: 0.2 mm. Nícoles paralelos.

granate y cianita como fases relictas que evidencian un metamorfismo progrado de presiones intermedias y grado medio anterior a la anatexia. Estos minerales, junto con cristales orientados de moscovita y cuarzo en el interior de porfiroclastos de granate, permiten definir las asociaciones del metamorfismo progrado en grado medio:

cuarzo - feldespatos - biotita - moscovita - granate - cianita

En las variedades miloníticas y ultramiloníticas aparecen cristales o placas de moscovita retro-

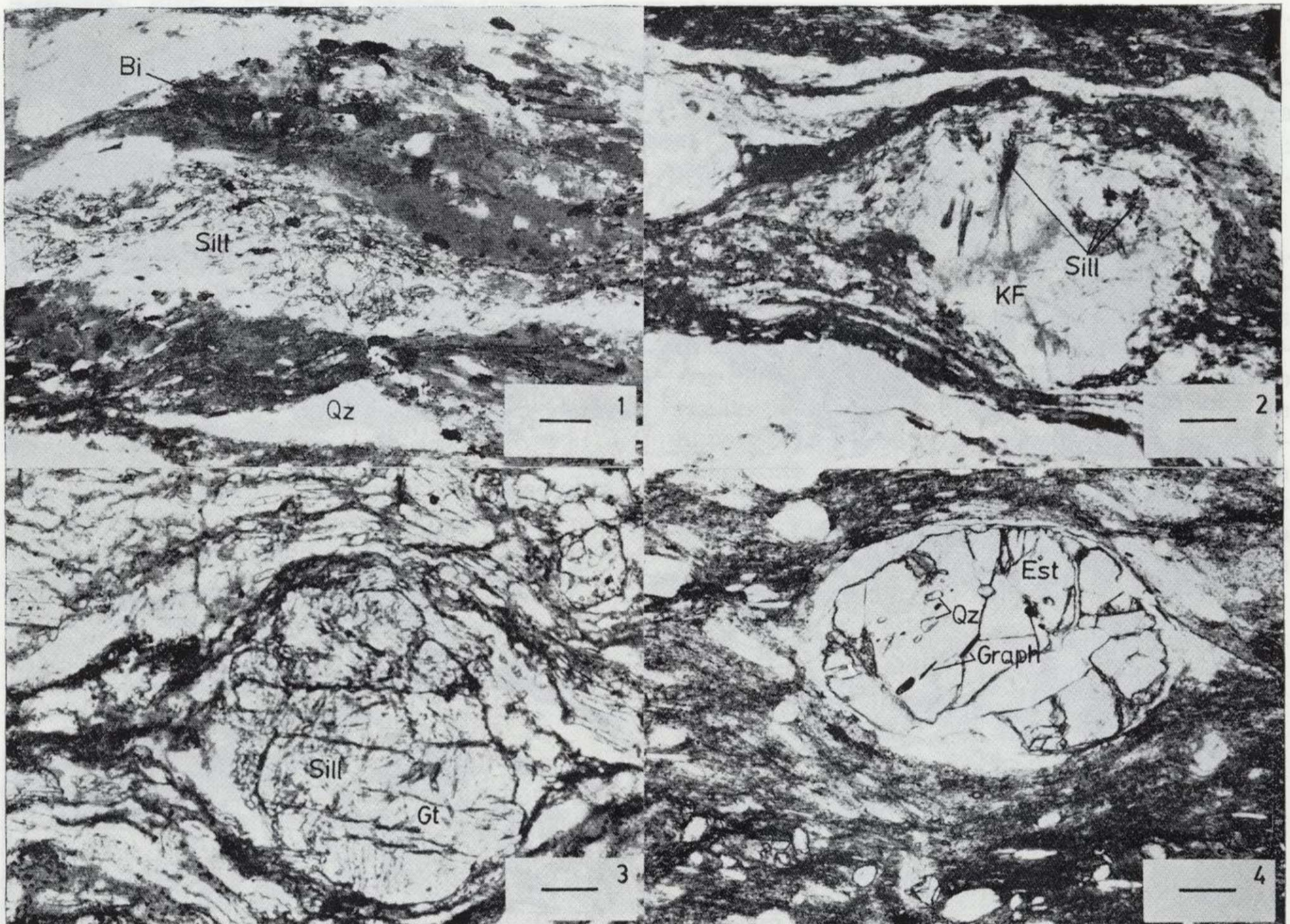
metamórfica recrecidas sobre masas de sillimanita o en el interior de bandas biotíticas.

En rocas blastomiloníticas intercaladas entre anfibolitas y eclogitas las asociaciones presentes son, principalmente, del tipo:

cuarzo - plagioclasa - Fd potásico - biotita - granate - rutilo

y aparecen retromorfoseadas en diverso grado por cloritas, moscovita, ilmenita, sericita y carbonatos:

cuarzo - feldespatos - moscovita - biotita



Ejemplos de asociaciones metamórficas observadas en los gneises de Azuaga (1 y 2), en los gneises milonita de Higuera de Llerena (3) y en un corredor ultramilonítico (4). 1, Cuarzo-feldespatos-biotita-sillimanita en un gneis migmático; 2, agujas de sillimanita en el interior de un blasto de feldespato potásico en asociación con granate y biotita; 3, agujas de sillimanita en el interior de un porfiroclasto de granate en asociación con cuarzo y biotita; 4, porfiroclasto de estauroлита con inclusiones orientadas de grafito y cuarzo en una ultramilonita con fengita-biotita-granate-cianita. Barras de escala: 0.2 milímetros. Nícoles paralelos.

cuarzo - feldespatos - moscovita - biotita - granate

cuarzo - feldespatos - moscovita - cianita

cuarzo - moscovita - cianita

cuarzo - feldespatos - moscovita - biotita - granate - cianita

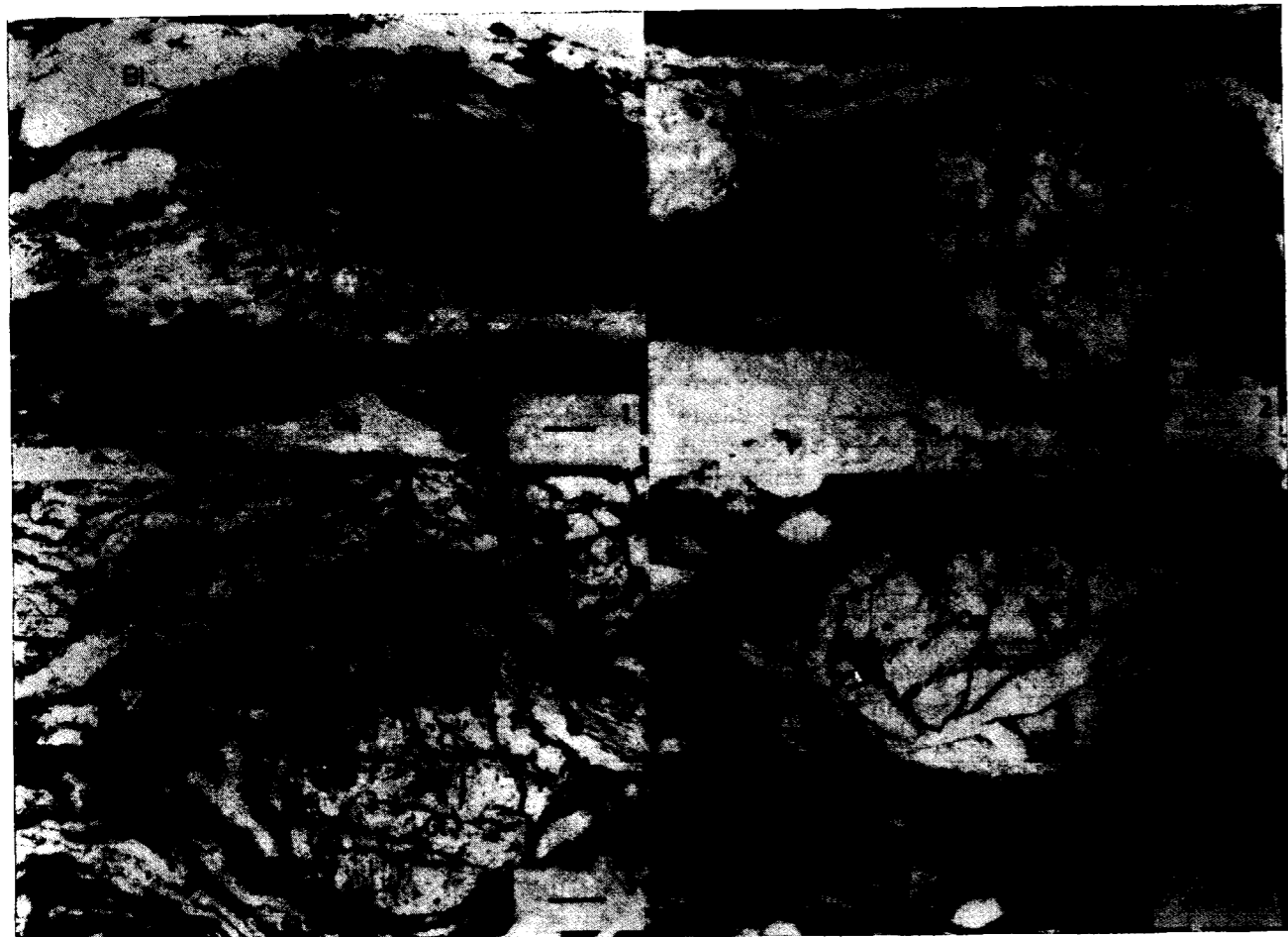
cuarzo - feldespatos - moscovita - biotita - granate - (andalucita) - moscovita₂

Estas asociaciones aparecen en materiales que por su modo de afloramiento se pueden interpretar unos como diferenciados leucocráticos en el

interior del conjunto migmático que constituyen los gneises biotíticos, y otros como niveles aislados que conservan las asociaciones del metamorfismo progrado (asociaciones con cianita), más o menos modificadas durante el clímax metamórfico de grado alto posterior.

Los corredores de ultramilonitas y milonitas que se intercalan entre los gneises biotíticos y moscovíticos presentan asociaciones que derivan de las presentes en tales materiales fuente. No obstante, en estos materiales los feldespatos no son

LAMINA 2



Ejemplos de asociaciones metamórficas observadas en los gneises de Azuaga (1 y 2), en los gneises milonita de Higuera de Llerena (3) y en un corredor ultramilonítico (4). 1, Cuarzo-feldespatos-biotita-sillimanita en un gneis migmatítico; 2, agujas de sillimanita en el interior de un blasto de feldespato potásico en asociación con granate y biotita; 3, agujas de sillimanita en el interior de un porfiroclasto de granate en asociación con cuarzo y biotita; 4, porfiroclasto de estaurólita con inclusiones orientadas de grafito y cuarzo en una ultramilonita con fengita-biotita-granate-cianita. Barras de escala: 0.2 milímetros. Nícoles paralelos.

cuarzo - feldespatos - moscovita - biotita - granate
 cuarzo - feldespatos - moscovita - cianita
 cuarzo - moscovita - cianita
 cuarzo - feldespatos - moscovita - biotita - granate - cianita
 cuarzo - feldespatos - moscovita - biotita - granate - (andalucita) - moscovita₂

Estas asociaciones aparecen en materiales que por su modo de afloramiento se pueden interpretar unos como diferenciados leucocráticos en el

interior del conjunto migmatítico que constituyen los gneises biotíticos, y otros como niveles aislados que conservan las asociaciones del metamorfismo progrado (asociaciones con cianita), más o menos modificadas durante el clímax metamórfico de grado alto posterior.

Los corredores de ultramilonitas y milonitas que se intercalan entre los gneises biotíticos y moscovíticos presentan asociaciones que derivan de las presentes en tales materiales fuente. No obstante, en estos materiales los feldespatos no son

tan frecuentes. La diferencia principal respecto a las rocas anteriores estriba en la presencia de asociaciones particulares como:

cuarzo - feldespatos - moscovita - biotita - granate - estaurólita - cianita
 cianita - cuarzo - biotita

que conllevan la única aparición de estaurólita encontrada y la presencia de rocas prácticamente monominerálicas formadas por cianita (lámina 2).

En el complejo leptino-anfibolítico, los gneises cuarzo-feldespáticos (con cierto carácter alcalino) constituyen los términos litológicos más comunes y presentan las asociaciones:

cuarzo - Fd potásico - opacos
 cuarzo - plagioclasa - opacos
 cuarzo - plagioclasa - Fd potásico - biotita - opacos
 cuarzo - plagioclasa - Fd potásico - biotita - opacos
 cuarzo - plagioclasa - Fd potásico - moscovita - opacos
 cuarzo - plagioclasa - Fd potásico - biotita - moscovita - granate - epidota - clorita - sericita - opacos

siendo en este último caso epidota, clorita y sericita productos de alteración retrometamórfica comunes.

En cuarcitas negras, rocas calcosilicatadas y mármoles las asociaciones encontradas son:

cuarzo - grafito
 cuarzo - biotita - grafito
 cuarzo - feldespatos - zoisita - epidota - granate - hornblenda - esfena
 calcita - tremolita

2.1.2. Química mineral

— Granates (tabla I)

En los gneises milonita de Higuera de Llerena los granates son comparables a los de la lámina blastomilonítica de gneises migmatíticos en cuanto a sus contenidos de piropero y de espesartina (fig. 1). Su composición es bastante homogénea, encontrándose ligeras zonaciones de algunos elementos. Los contenidos en moléculas de almandino son de 58-59 por 100, y los de espesartina de 25-27 por 100. En su conjunto, las zonaciones

observadas son asimilables a una evolución retrógrada asociada a un descenso de T que alcanza su punto álgido a mitad de camino entre los centros y los bordes de los granates. Desde aquí hacia los bordes el zonado es indicativo de una evolución tardía de tipo progrado. Los máximos contenidos en piropero se encuentran en los centros de los granates (13.3 por 100), descendiendo hacia los bordes (12.7 por 100), con un mínimo intermedio de 10.7 por 100. Lo contrario es lo que se observa en relación con la evolución de los contenidos de almandino y grosularia: los valores más bajos se alcanzan en los centros (58.1 y 25.3 por 100, respectivamente), y de aquí aumentan hacia los bordes (59.4 y 25.5 por 100), con unos máximos intermedios de 59.8 y 26.8 por 100, respectivamente.

Los granates de los gneises biotíticos de la lámina blastomilonítica de gneises migmatíticos (figura 1) son granates relativamente ricos en molécula de piropero (11-14 por 100) y de espesartina (8-17 por 100), y relativamente pobres en grosularia (2-6 por 10), presentando contenidos en almandino variables entre 61 y 70 por 100. Presentan un zonado ligero de tipo retrógrado (fig. 2), disminuyendo hacia los bordes los contenidos de

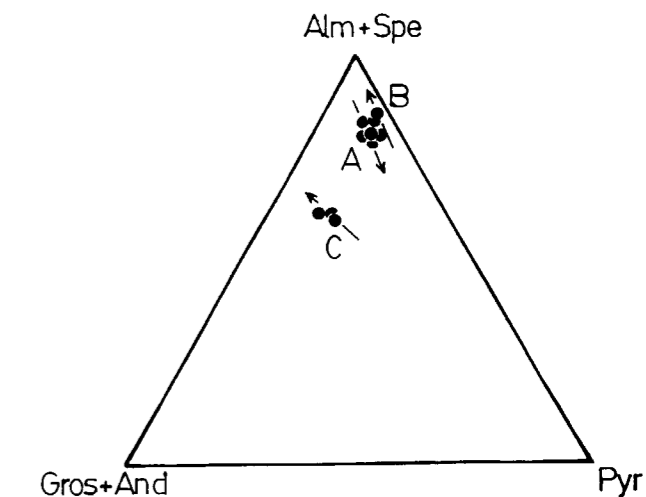


Figura 1.—Diagrama triangular en que se proyectan las composiciones de los granates de los gneises biotíticos (A) y de los gneises moscovíticos (B) de la lámina blastomilonítica de gneises migmatíticos junto con los granates de los gneises milonita de Higuera de Llerena (C). Las flechas indican el sentido del zonado desde los centros hacia los bordes.

TABLA I

Análisis (wt%) y fórmulas estructurales de granates en muestras correspondientes a los gneises milonita de Higuera de Llerena (muestra 319) y a la lámina blastomilonítica de gneises migmáticos (muestra 363, gneises biotíticos; 387, gneises moscovíticos). B, BC y C indican que los análisis corresponden a puntos situados cerca de la periferia, hacia el centro, y en el propio centro de los granates, respectivamente.

Muestra	363-C1	363-B1	363-C2	363-B2	319-B	319-BC	319-C	387-B	387-BC	387-C
SiO ₂	37.06	37.09	37.11	37.05	37.60	37.41	37.63	38.14	37.72	38.36
TiO ₂	0.04	0.17	0.13	0.00	0.03	0.00	0.00	0.13	0.15	0.16
Al ₂ O ₃	21.24	21.25	21.47	21.16	21.47	21.71	21.71	21.99	22.36	21.38
Cr ₂ O ₃	0.02	0.13	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00
Fe ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12
FeO	30.36	30.49	32.22	31.06	35.09	34.98	35.26	26.49	26.81	26.31
MnO	7.29	7.55	3.57	6.37	1.08	1.02	1.30	1.12	1.04	0.99
NiO	0.07	0.00	0.00	0.05	0.02	0.00	0.02	0.04	0.08	0.00
MgO	2.81	2.77	3.43	2.79	2.56	2.76	2.12	3.18	2.69	3.39
CaO	1.09	0.87	2.04	1.50	2.08	2.08	1.92	8.81	9.49	9.29
Na ₂ O	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.00	0.00	0.08	0.00	0.02
K ₂ O	0.02	0.04	0.03	0.00	0.01	0.03	0.03	0.03	0.04	0.00
TOTAL	100.00	100.36	100.01	100.00	100.02	99.99	99.99	100.01	100.48	100.02
FeOt	30.36	30.49	32.22	31.07	35.09	34.98	35.26	26.49	26.81	26.42
Fórmulas estructurales										
Si	2.990	2.986	2.973	2.988	3.028	3.008	3.038	3.001	2.962	3.019
Al IV	0.010	0.014	0.027	0.012	0.000	0.000	0.000	0.000	0.038	0.000
Al VI	2.011	2.002	2.001	2.000	2.038	2.058	2.066	2.040	2.032	1.983
Ti	0.002	0.010	0.008	0.000	0.002	0.000	0.000	0.008	0.009	0.009
Cr	0.001	0.008	0.000	0.000	0.004	0.000	0.000	0.000	0.006	0.000
Fe ⁺⁺⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.007
Fe ⁺⁺	2.049	2.053	2.159	2.095	2.363	2.352	2.381	1.743	1.761	1.732
Mn	0.498	0.515	0.242	0.435	0.074	0.069	0.089	0.075	0.069	0.066
Mg	0.338	0.332	0.410	0.335	0.307	0.331	0.255	0.373	0.315	0.398
Ni	0.005	0.000	0.000	0.003	0.001	0.000	0.001	0.003	0.005	0.000
Ca	0.094	0.075	0.175	0.130	0.179	0.179	0.166	0.743	0.799	0.783
K	0.002	0.004	0.003	0.000	0.001	0.003	0.003	0.003	0.004	0.000
Na	0.000	0.000	0.002	0.002	0.003	0.000	0.000	0.012	0.000	0.003
O	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12

piropo (desde 13.7 a 11.2 por 100), almandino (de 72.3 a 69.9 por 100) y grosularia (de 5.9 a 4.3 por 100) y aumentando los de espartina (desde 8.1 a 14.5 por 100).

Los granates de los gneises moscovíticos (fig. 1) relacionados con los gneises biotíticos son más ricos en almandino (80.0-82.4 por 100) y más pobres en espartina (2.5-3.0 por 100), mostrando contenidos comparables en piropo (9.0-11.3 por 100) y grosularia (5.7-6.1 por 100). El zonado composicional observado en estos granates (fig. 2) es asimilable en su conjunto a una evolución metamórfica progradada, al contrario de lo que se ob-

serva en los granates de los gneises biotíticos. No obstante, los contenidos más elevados de Mg se encuentran en posiciones intermedias entre los centros y los bordes, observándose un ligero zonado retrógrado desde aquí hacia estos últimos.

Los contenidos máximos en piropo a los que se está haciendo alusión son de 11.3 por 100, siendo los contenidos correspondientes de 8.8 por 100 en los centros y de 10.5 por 100 en los bordes. Algo similar ocurre aparentemente con los contenidos en grosularia (que varía de 5.7 por 100 en los centros a 5.9 por 100 en los bordes,

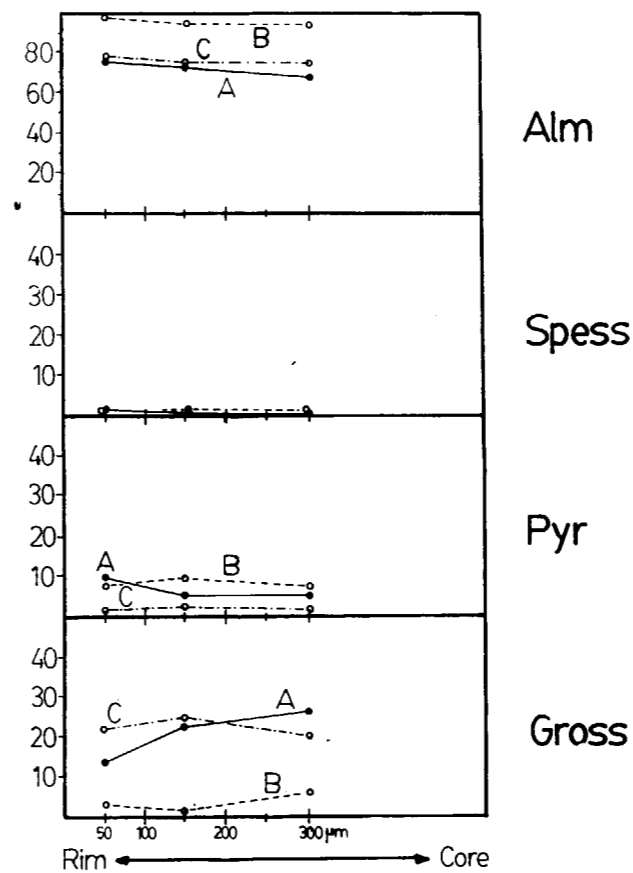


Figura 2.—Patrones de zonación centro (core)-borde (rim) en los granates de los gneises de Azuaga. (A) corresponde a los granates de los gneises biotíticos; (B) a los granates de los gneises moscovíticos; (C) a los granates de los gneises milonita de Higuera de Llerena.

con un máximo intermedio de 6.1 por 100). Por el contrario, los contenidos en almandino y espartina denotan un esquema de zonación inverso, disminuyendo desde los centros (82.4 por 100 y 3.1 por 100, respectivamente) hacia los bordes (80.8 y 2.5 por 100, respectivamente), con unos mínimos intermedios que se cifran en 80.2 por 100 de almandino y 2.4 por 100 de espartina.

Los granates de estos tres tipos de gneises tienen bordes irregulares con frecuencia, y muestran evidencias de haber sido rotos, deformados y reabsorbidos parcialmente con posterioridad al clímax de metamorfismo. Por esta razón, es muy probable que los zonados observados sean restos parciales de patrones de zonación más com-

pletos y complejos y/o el resultado de procesos de homogeneización. Siguiendo a LOOMIS (1986) el reflejo en el zonado de los granates de su intervención sucesiva en las diversas reacciones que lo envuelven durante la evolución progradada determina un aumento en los contenidos de Mg y un decrecimiento de los contenidos de Mn y Fe. A modo de ejemplo, a 5 Kbar de presión litostática y 2.5 Kbar de presión parcial de H₂O tendríamos los siguientes estadios sucesivos en la formación de granate:

- Formación de granate a temperaturas entre 510 y 525° C por divarianza de la asociación granate-biotita-clorita.
- incremento del contenido de Mg de los granates debido a la verificación de las reacciones que consumen la estauroлита.
- Neoformación y recrecimiento de granates por encima de 625° C como resultado de la estabilización de la asociación granate-biotita-sillimanita.

Los patrones de zonación y sus variables composicionales (fig. 2) son comparables entre los gneises biotíticos y los gneises moscovíticos, los cuales son términos comunes entre los gneises de Azuaga. Por el contrario, los patrones y composiciones de los gneises milonita de Higuera de Llerena, situados estructuralmente en la base de los anteriores, son marcadamente diferentes a pesar de que, por ejemplo, tienen las mismas asociaciones que los gneises biotíticos. Probablemente esto significa que las evoluciones tectonotérmicas sufridas por ambos conjuntos o unidades han sido diferentes a pesar de que el resultado final de las mismas es comparable.

— Biotitas (tabla II)

Las biotitas de los gneises milonita de Higuera de Llerena, al igual que las de los gneises biotíticos de la lámina blastomilonítica de gneises migmáticos, son biotitas ricas en el miembro final siderofilita, mientras que las de los gneises moscovíticos presentan contenidos similares en moléculas de annita y de siderofilita o son ligeramente más ricas en la primera. En cuanto a sus relaciones X_{Mg}, las biotitas de los gneises biotíticos son las que presentan los valores más altos de la citada relación (0.71-0.83), siendo las más bajas las de los gneises milonita (0.51) e intermedias las de los gneises moscovíticos

TABLA II

Análisis (wt%) y fórmulas estructurales de moscovitas (363-25, 387-54 y 319-14) y de biotitas (el resto, excepto el análisis 387-59, que corresponde a una biotita cloritizada) de los gneises milonita de Higuera de Llerena (muestra 319) y de los gneises de la lámina blastomilonítica de gneises migmáticos (muestra 363, gneises biotíticos; 387, gneises moscovíticos).

Muestra	363-26	363-27	363-28	363-29	387-58	387-59	387-60	319-19	363-25	387-54	319-14
K ₂ O	9.58	8.47	7.57	9.18	8.58	8.73	9.31	9.58	10.00	10.74	10.35
CaO	0.00	0.00	0.07	0.00	0.21	0.05	0.10	0.00	0.00	0.00	0.02
TiO ₂	2.55	2.19	1.78	2.10	1.32	2.30	2.15	3.74	0.34	1.42	1.00
FeOt	18.81	19.91	17.49	20.45	18.08	20.62	19.74	21.48	1.13	2.03	1.08
MnO	0.25	0.22	0.15	0.29	0.21	0.24	0.17	0.01	0.04	0.52	0.00
Cr ₂ O ₃	0.00	0.11	0.09	0.06	0.00	0.03	0.06	0.08	0.00	0.02	0.02
Na ₂ O	0.19	0.10	0.00	0.14	0.07	0.05	0.03	0.06	0.42	0.63	0.35
SiO ₂	36.18	34.34	37.00	35.13	36.63	36.79	36.97	35.78	47.64	46.93	47.39
Al ₂ O ₃	20.52	20.79	21.50	20.06	20.63	8.59	20.21	19.29	36.26	34.73	35.92
MgO	8.79	8.93	7.62	8.16	7.61	6.91	6.98	7.18	0.85	1.15	0.66
NiO	0.05	0.01	0.00	0.08	0.10	0.04	0.03	0.03	0.00	0.07	0.04
TOTAL	96.92	95.07	93.27	95.65	93.44	84.35	95.75	97.23	96.68	98.24	96.83

Fórmulas estructurales

Si	5.383	5.227	5.582	5.347	5.588	6.438	5.566	5.382	6.204	6.116	6.180
Al IV	2.617	2.773	2.418	2.653	2.412	1.562	2.434	2.618	1.796	1.884	1.820
Al VI	0.982	0.958	1.406	0.947	1.288	0.210	1.153	0.803	3.711	3.452	3.732
Ti	0.285	0.251	0.202	0.240	0.151	0.303	0.243	0.423	0.033	0.139	0.098
Cr	0.000	0.013	0.011	0.007	0.000	0.004	0.007	0.010	0.000	0.002	0.002
Fe ⁺⁺	2.341	2.535	2.207	2.603	2.307	3.018	2.485	2.702	0.123	0.221	0.118
Mn	0.032	0.028	0.019	0.037	0.027	0.036	0.022	0.001	0.004	0.057	0.000
Mg	1.949	2.026	1.713	1.851	1.730	1.802	1.566	1.610	0.165	0.223	0.128
Ni	0.006	0.001	0.000	0.010	0.012	0.006	0.004	0.004	0.000	0.007	0.004
Ca	0.000	0.000	0.011	0.000	0.034	0.009	0.016	0.000	0.000	0.000	0.003
Na	0.055	0.030	0.000	0.041	0.021	0.017	0.009	0.017	0.106	0.159	0.088
K	1.819	1.645	1.457	1.783	1.670	1.949	1.788	1.838	1.661	1.786	1.722
O	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22

(0.62-0.77). En los tres casos las posiciones estructurales de índice de coordinación más elevado están ocupadas casi exclusivamente por K, el cual aparece acompañado en ocasiones por pequeños contenidos de Na. Igualmente, en los tres tipos de litologías las biotitas son ricas en Ti, si bien los contenidos observados en los gneises milonita doblan a los de los otros dos tipos considerados.

— *Moscovitas* (tabla II)

Las micas blancas son micas fengíticas con una pequeña proporción de componente celadónico cuya relación Fe/Mg varía entre 0.75 y 0.99. La extensión en que se opera la sustitución de (Mg, Fe)^{VI}Si^{IV} por Al^{VI}Al^{IV} (sustitución de Tscher-

mak) varía entre 12 y 23 por 100, siendo más importante en las fengitas de los gneises moscovíticos. En el diagrama FeO(t)-Al₂O₃ de MIYASHIRO (1973) estas fengitas se proyectan en el área correspondiente a las zonas de la estauroлита y sillimanita (fig. 3). La posición estructural de índice de coordinación más elevado está ocupada principalmente por K, aunque existe aproximadamente un 5-7 por 100 de componente pargonítico en solución sólida. Los contenidos en Ti son bajos, bastante menores que en las biotitas.

— *Plagioclasas* (tabla III)

Las plagioclasas de los gneises milonita de Higuera de Llerena son oligoclasas cálcicas que

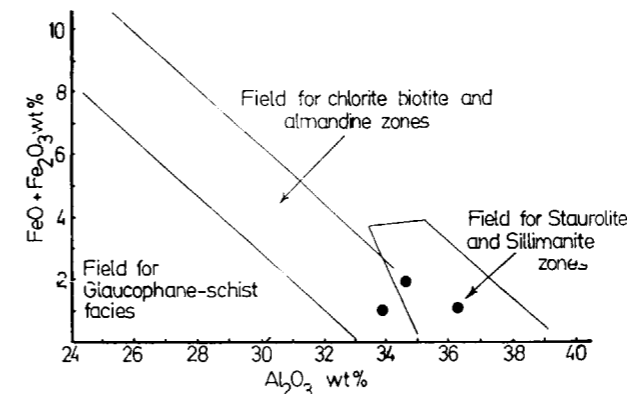


Figura 3.—Proyecciones en el diagrama de MIYASHIRO (1973) de las composiciones de las micas blancas de los gneises de la lámina blastomilonítica de gneises migmáticos.

rozan el campo de composiciones de la andesina (Ab_{69.5}An₂₉FdK_{1.5}). En la lámina blastomilonítica de gneises migmáticos las plagioclasas de los gneises biotíticos presentan pequeños porcentajes de feldespato potásico (del orden del 3 por 100) en disolución sólida, tratándose de oligoclasas cuyas composiciones oscilan entre los términos extremos Ab₈₅An₁₃FdK₂ y Ab_{81.5}An₁₈FdK_{1.5}. Las plagioclasas de los gneises moscovíticos son algo más cálcicas (Ab_{79.5}An₁₉FdK_{1.5}), tratándose de oligoclasas relativamente sódicas.

2.1.3. **Reacciones y evolución metamórfica**

Las reacciones (anexo A) responsables de la aparición de las asociaciones progradadas de grado medio en los gneises biotíticos y moscovíticos

TABLA III

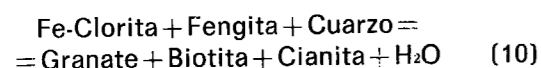
Análisis (wt%) y fórmulas estructurales de feldespatos potásicos (363-53 y 319-15) y plagioclasas (el resto) correspondientes a los gneises milonita de Higuera de Llerena (muestra 319) y a los gneises de la lámina blastomilonítica de gneises migmáticos (el resto).

Muestra	363-17	363-18	363-19	263-20	363-21	363-22	363-53	319-15
K ₂ O	0.11	0.45	0.50	0.44	0.47	0.51	0.26	0.29
CaO	3.48	3.43	3.06	2.59	3.58	3.55	3.92	5.76
TiO ₂	0.02	0.05	0.03	0.00	0.01	0.05	0.00	0.02
FeOt	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.02
MnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.02	0.05
Cr ₂ O ₃	0.02	0.01	0.04	0.35	0.00	0.00	0.00	0.02
Na ₂ O	8.60	9.26	9.92	9.40	9.43	8.90	8.73	7.63
SiO ₂	64.93	64.49	63.68	64.43	63.93	64.29	63.67	61.68
Al ₂ O ₃	22.63	22.65	23.10	22.75	22.52	23.03	23.36	24.86
MgO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.06
NiO	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.03	0.00	0.04
TOTAL	99.79	99.94	100.33	100.02	99.94	100.46	99.99	100.43

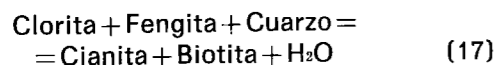
Fórmulas estructurales

Si	2.853	2.845	2.807	2.836	2.826	2.822	2.806	2.722
Al	1.172	1.157	1.200	1.181	1.174	1.192	1.214	1.293
Ti	0.001	0.002	0.001	0.000	0.000	0.002	0.000	0.001
Cr	0.001	0.000	0.001	0.012	0.000	0.000	0.000	0.001
Fe ⁺⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001
Mn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.001	0.002
Mg	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.004
Ni	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.001	0.000	0.001
Ca	0.164	0.162	0.145	0.122	0.170	0.167	0.185	0.272
Na	0.733	0.792	0.848	0.802	0.808	0.758	0.746	0.653
K	0.006	0.025	0.028	0.025	0.027	0.029	0.015	0.016
O	8	8	8	8	8	8	8	8

(moscovita-biotita-granate-cianita) de la lámina blastomilonítica de gneises migmáticos se pueden considerar prácticamente iguales a las reacciones discutidas en un apartado anterior para explicar la aparición sucesiva de la biotita [reacciones (1), (2), (3), (4), (5) y (6)] y del granate [reacciones (7), (8), (9), (10), (11), (12), (13), (14) y (15)] en los esquistos de la Fm. Atalaya. Las relaciones texturales mutuas de granate, biotita y cianita los gneises biotíticos sugieren que las relaciona alguna reacción tal como:



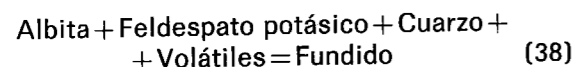
la cual se verifica de izquierda a derecha como consecuencia de los aumentos de temperatura, o como:



reacción esta última que se verifica a temperaturas mayores que la reacción (16) dentro del campo de presiones y temperaturas del grado medio.

El metamorfismo de grado alto, que da lugar en la lámina blastomilonítica de gneises migmáticos a una anatexia generalizada cuyo producto son los gneises biotíticos, es como mínimo de presiones intermedias y da lugar a la presencia de granate en asociación con sillimanita. Las características texturales de esta última parecen sugerir su origen pseudomórfico a partir de cristales o masas de cianita. La anatexia muestra un carácter sin- a post-tectónico respecto a una primera fase de deformación y pre-tectónico respecto a la fase de deformación regional D₂.

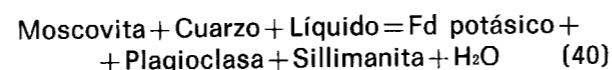
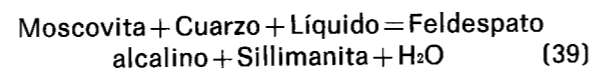
La anatexia de estas rocas, así como la de los gneises milonita de Higuera de Llerena, ocurrió a presiones superiores a 6 Kbar al ser superado por el sistema metamórfico en el espacio P-T el lugar geométrico correspondiente a la banda de fusión de los sistemas graníticos en condiciones de presión parcial de agua próxima o igual a la presión total, de forma que tendríamos:



La curva del «solidus granítico», situada a temperaturas por debajo de las correspondientes a la deshidratación de moscovita y biotita permite una fusión parcial escasa en virtud de la reac-

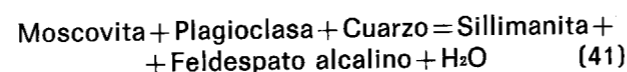
ción anterior debido a la ausencia de una fase fluida suficientemente abundante (POWELL, 1983; THOMPSON, 1983). Sin embargo, la magnitud del proceso de migmatización observada indica que:

— La moscovita existente reacciona con cuarzo y con el escaso líquido generado por (38) según THOMPSON y ALGOR, 1977; THOMPSON y TRACY, 1979; GRANT, 1985):

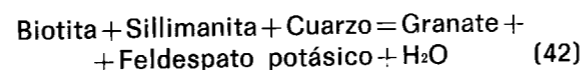


para dar lugar a una desaparición progresiva de la moscovita y una mayor tasa de fusión parcial según la primera reacción citada por el aporte de agua de deshidratación.

— O bien la moscovita y el cuarzo reaccionan con la plagioclasa preexistente según:



Estas tres reacciones no sólo realimentan la fusión parcial por la liberación de agua de deshidratación, sino que generan también silicato aluminico (sillimanita) dentro de la zona de la moscovita-sillimanita. En condiciones de temperaturas más elevadas y en ausencia de moscovita, la destrucción de la biotita según:

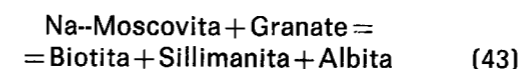


marca la entrada en la zona del granate-feldespato potásico y proporciona una fuente adicional de H₂O para facilitar la anatexia. Esta reacción permite explicar la presencia de granate con agujas de sillimanita en los gneises milonita de Higuera de Llerena.

El aumento de temperatura que se requiere para la verificación de las reacciones anteriores ha ido acompañado de un descenso de la presión que permite la transformación de cianita en sillimanita, determinando igualmente que el silicato aluminico generado por las reacciones (39), (40) y (41) sea sillimanita.

El posible granate existente durante el clímax metamórfico se desestabiliza durante la evolución retrógrada (SILLS, 1983; DUEBENDORFER y FROST, 1988), asociada a la fase D₂. Esta deses-

tabilización empieza en la zona de la moscovita-sillimanita debido a la reacción:



y no se desarrolla de manera completa, sino que afecta exclusivamente a los bordes de los granates que se encaran directamente a los planos de la foliación tanto en los gneises blastomiloníticos como en las milonitas y ultramilonitas.

Los gneises cuarzo-feldespáticos del complejo leptino-anfibolítico no presentan una mineralogía muy favorable (ausencia de minerales índice) para establecer una discusión sobre su evolución metamórfica. Por la mineralogía mostrada, sus caracteres texturales y los de la asociación de gneises anfibólicos y anfibolitas con las que están espacialmente relacionados, se puede indicar que estos materiales aparecen afectados por un metamorfismo de grado medio exclusivamente, sin evidencias de la existencia de procesos de grado alto.

2.1.4. Condiciones presión-temperatura del metamorfismo

En los gneises milonita de Higuera de Llerena las temperaturas calculadas usando el par granate-biotita aportando resultados geológicamente congruentes los tres geotermómetros indicados a continuación (fig. 4). Para los centros de los granates se obtiene:

A 5 Kbar	780 ± 20° C
A 10 Kbar	845° C (HOLDAWAY y LEE, 1977)
	762° C (PERCHUCK, 1977)
	710° C (PERCHUCK et al., 1985)

Para las composiciones de puntos intermedios entre los centros y los bordes:

A 5 Kbar	705 ± 20° C
A 10 Kbar	757° C (HOLDAWAY y LEE, 1977)
	693° C (PERCHUCK, 1977)
	650° C (PERCHUCK et al., 1985)

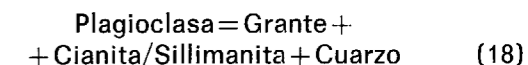
Y para los bordes:

A 5 Kbar	760 ± 25° C
A 10 Kbar	819° C (HOLDAWAY y LEE, 1977)
	741° C (PERCHUCK, 1977)
	692° C (PERCHUCK et al., 1985)

El geotermómetro granate-fengita arroja valores

de temperatura más bajos que los que se acaban de enumerar. Los resultados más realistas se obtienen a través de las fórmulas de GREEN y HELLMAN (1982), siendo éstos del orden de 100-150° C más elevados que los que se obtienen de las fórmulas de KROGH y RAHEIM (1978). Arrojan valores de temperatura para presiones de 1,5 y 10 Kbar de 652 ± 20, 677 ± 20 y 702 ± 20° C (centros de los granates); 617 ± 20, 638 ± 25 y 666 ± 25° C (puntos situados entre los centros y los bordes) y de 642 ± 20, 665 ± 25 y 693 ± 25° C para los bordes de los granates, respectivamente.

Las presiones obtenidas para los gneises milonita de Higuera de Llerena utilizando las diferentes calibraciones geobarométricas de la reacción (18):



(fig. 4) en perfiles centro-borde son: a 600° C, 5.1, 5.3 y 5.1 Kbar; y a 800° C, 6.7, 7.0 y 6.8 Kbar.

En la lámina blastomilonítica de gneises migmáticos las temperaturas calculadas para los gneises biotíticos (fig. 5) usando el par granate-biotita son de 659 ± 25° C para las composiciones de los centros de los granates y de 610 ± 20° C para los bordes a una presión de 1 Kbar (rango de variación de las calibraciones geotermométricas con menor dispersión, excluyendo los resultados anormalmente elevados o bajos), de 678 ± 25° C y 630 ± 20° C a 5 Kbar y de 723 ± 25 y 670 ± 25° C a 10 Kbar, respectivamente.

En los gneises moscovíticos se obtienen resultados irreales en la mayor parte de los casos al utilizar el geotermómetro granate-biotita (temperaturas del orden de 900-1.000° C). Únicamente las calibraciones de PERCHUCK (1977), HOLDAWAY y LEE (1977) y PERCHUCK et al. (1985) arrojan valores fiables, quizá algo elevados todavía. Estos valores son (fig. 6), para los centros de los granates:

A 5 Kbar	765 ± 25° C
A 10 Kbar	825° C (HOLDAWAY y LEE, 1977)
	750° C (PERCHUCK, 1977)
	700° C (PERCHUCK et al., 1985)

Para las composiciones de puntos intermedios entre los centros y los bordes:

A 5 Kbar $690 \pm 20^\circ \text{C}$
 A 10 Kbar 740°C (HOLDAWAY y LEE, 1977)
 680°C (PERCHUCK, 1977)
 640°C (PERCHUCK et al., 1985)

Y para los bordes:

A 5 Kbar $745 \pm 25^\circ \text{C}$
 A 10 Kbar 800°C (HOLDAWAY y LEE, 1977)
 725°C (PERCHUCK, 1977)
 680°C (PERCHUCK et al., 1985)

El geotermómetro granate-fengita arroja valores de temperatura en los gneises biotíticos de (figura 5) 590 ± 20 , 616 ± 20 y $644 \pm 20^\circ \text{C}$ para los centros de los granates y de 572 ± 20 , 593 ± 20

y $620 \pm 20^\circ \text{C}$ para los bordes a presiones de 1.5 y 10 Kbar, respectivamente. Los gneises moscovíticos (fig. 6) arrojan, por su parte, valores de temperaturas para presiones de 1.5 y 10 Kbar de 558 ± 20 , 579 ± 20 y $605 \pm 20^\circ \text{C}$ (centros de los granates); 592 ± 20 , 614 ± 20 y $642 \pm 20^\circ \text{C}$ (puntos situados entre los centros y los bordes) y de 582 ± 20 , 603 ± 20 y $630 \pm 20^\circ \text{C}$ (bordes de los granates), respectivamente.

Las presiones calculadas con el geobarómetro granate-plagioclasa-moscovita-biotita en los gneises biotíticos son, a 600°C , de 8.8 Kbar para los centros de los granates, y de 5.5 Kbar para los bordes; y de 9.8 y 6.1 Kbar a 700°C para los

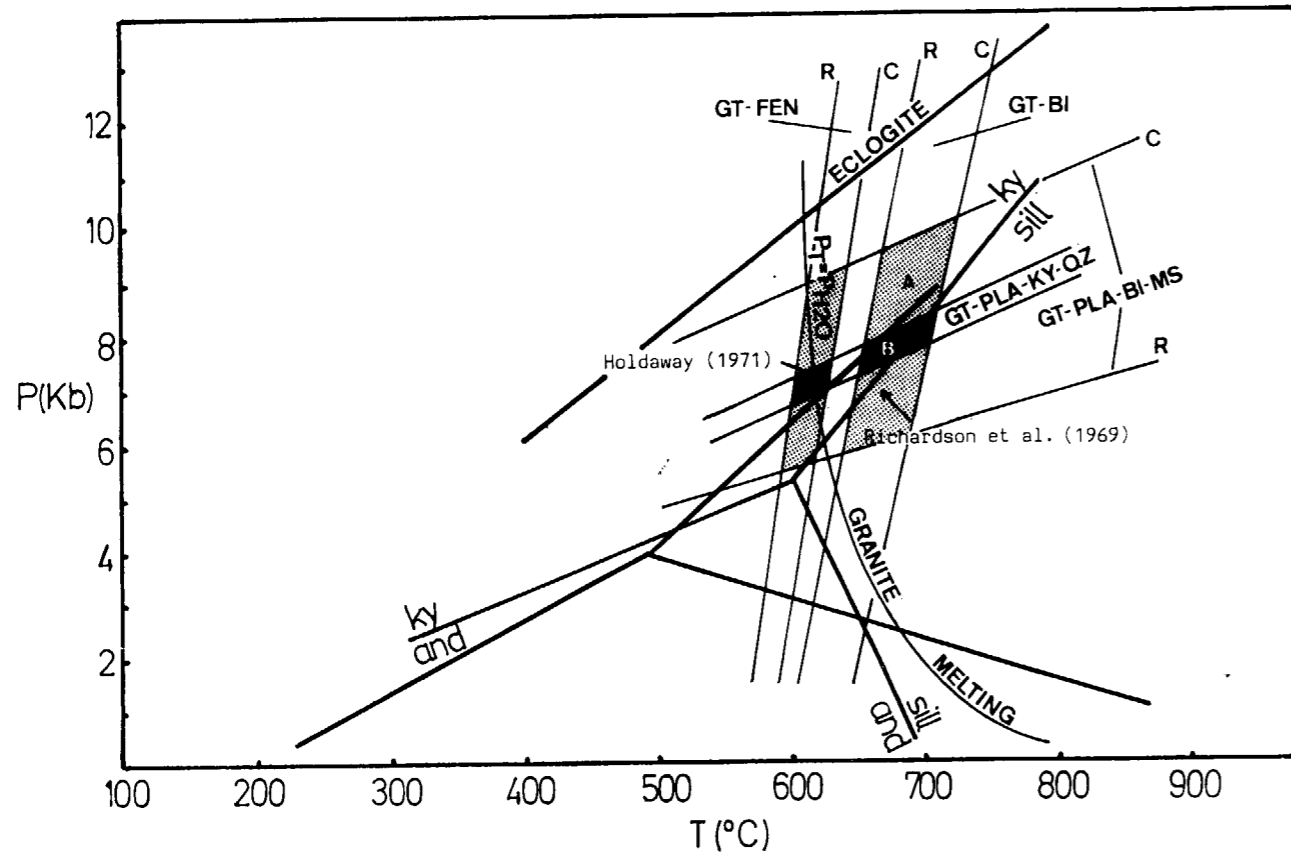


Figura 4.—Diagrama P-T en el que se representan los campos de estabilidad de las asociaciones con granate, biotita, fengita y cianita/sillimanita en los gneises milonita de Higuera de Llerena. Las rectas utilizadas para delimitar los campos de estabilidad corresponden a los geotermómetros granate-biotita (Gt-Bi), granate-fengita (Gt-Fen) y las reacciones (11) y (18) aplicadas a las composiciones de los centros (C), las posiciones intermedias (M) y los bordes (R) de los granates. La trama (A) representa las condiciones de estabilidad obtenidas con las composiciones de puntos de los granates intermedios entre los centros y los bordes (clímax metamórfico), mientras que (B) corresponde a los campos obtenidos con los bordes de los mismos y (C) a la intersección de los dos campos anteriores con el campo de T obtenido con el geotermómetro granate-fengita.

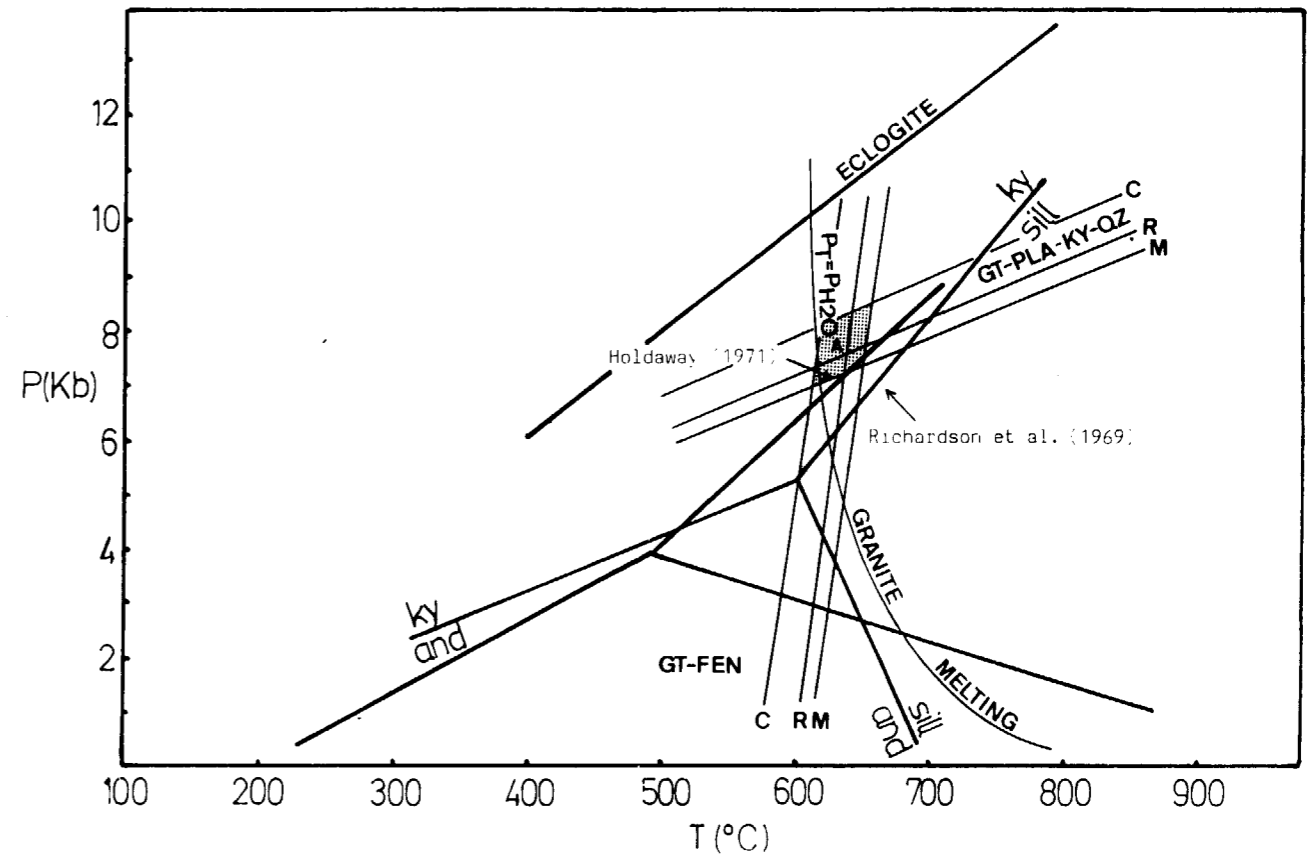
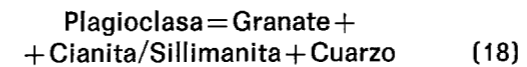


Figura 5.—Diagrama P-T en el que se representan los campos de estabilidad de las asociaciones con granate, biotita, fengita y cianita/sillimanita en los gneises biotíticos de la lámina blastomilonítica de gneises migmatíticos. Las rectas utilizadas para delimitar los campos de estabilidad corresponden a los geotermómetros granate-biotita (Gt-Bi), granate-fengita (Gt-Fen) y las reacciones (11) y (18) discutidas más arriba y aplicadas a las composiciones de los centros (C) y los bordes (R) de los granates. La trama (A) delimita las condiciones de estabilidad calculadas con el geobarómetro granate-plagioclasa-biotita-moscovita y los geotermómetros granate-fengita y granate-biotita, mientras que la trama (B) corresponde a la intersección de estos dos geotermómetros con el geobarómetro granate-plagioclasa-cuarzo.

centros y para los bordes, respectivamente (figura 5).

Las presiones calculadas mediante la calibración geobarométrica de la reacción (18) de NEWTON y HASELTON (1981):



son, para los gneises biotíticos, 6.7 Kbar (centros de granates) y 7.1 Kbar (bordes) a 600°C y 8.8 Kbar (centros) y 9.3 Kbar (bordes de granates a 800°C) (fig. 4). En los gneises moscovíticos (fig. 5) se obtienen las siguientes presiones en un perfil centro-borde: a 600°C , 8.0, 7.0 y 7.2 Kbar; y a 800°C , 10.3, 9.0 y 9.3 Kbar.

Tal y como se deduce de la distribución de los campos de estabilidad de los silicatos aluminicos (RICHARDSON et al., 1969; HOLDAWAY, 1971), a temperaturas del orden de $600-700^\circ \text{C}$, dentro del campo de la anatexia, la estabilización de la asociación granate-sillimanita tiene lugar a presiones por debajo de 7-9 Kbar, sobrepasándose estas presiones si la cianita es el silicato aluminico estable, como parece ocurrir con la asociación relicta con Ky. En el caso de los gneises biotíticos, las presiones máximas que se obtienen con los centros de los granates están de acuerdo con el hecho observado de la presencia de cianita, probablemente en equilibrio con los centros de los granates, relicta entre masas de sillimanita. Es necesario insistir en que las tra-

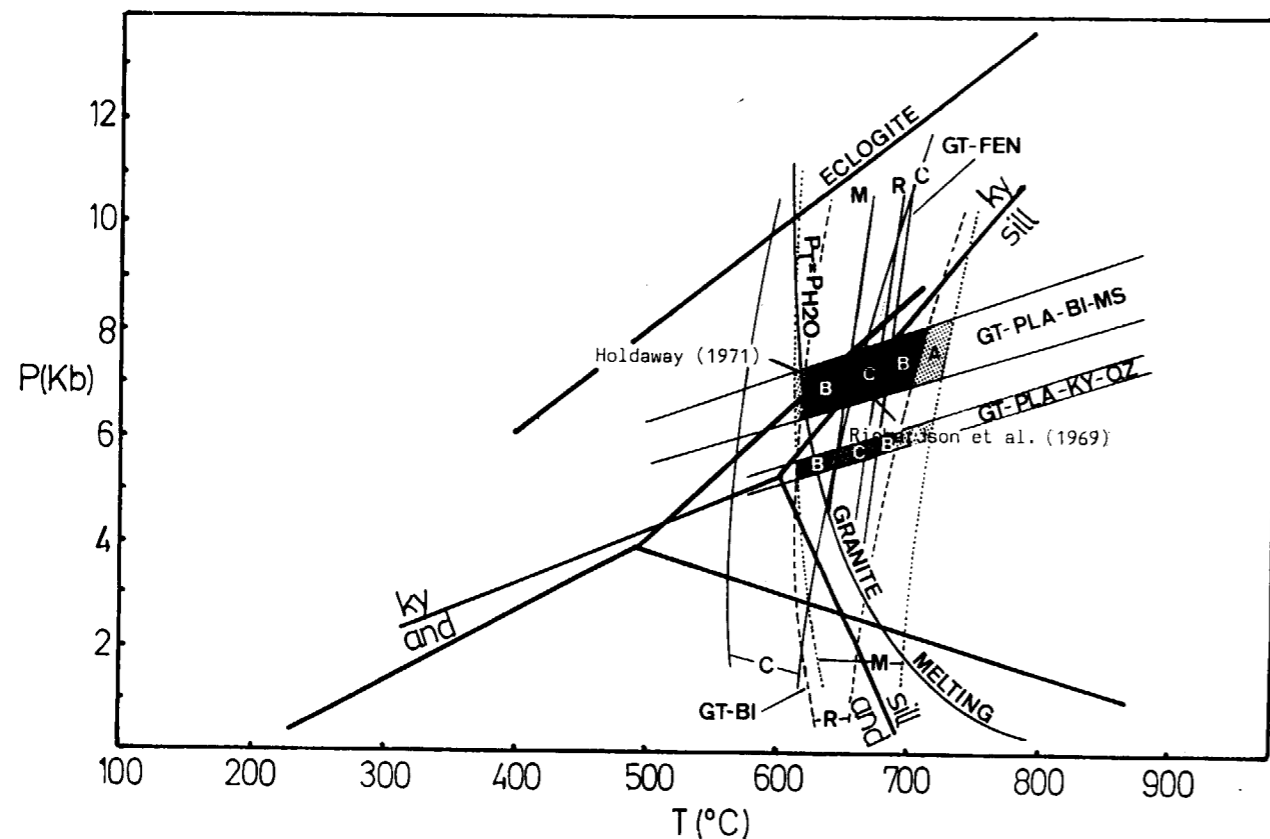


Figura 6.—Diagrama P-T en el que se representan los campos de estabilidad de las asociaciones con granate, biotita, fengita y cianita en los gneises moscovíticos de la lámina blastomilonítica de gneises migmatíticos. Las rectas utilizadas para delimitar los campos de estabilidad corresponden a los geotermómetros granate-biotita (Gt-Bi), granate-fengita (Gt-Fen) y las reacciones (11) y (18) aplicadas a las composiciones de los centros (C), las posiciones intermedias (M) y los bordes (R) de los granates.

yectorias P-T referidas más arriba son aparentes, habría que utilizar muchos más datos para determinarlas con mayor precisión.

2.2. METAMORFISMO DE LA LAMINA ECLOGITICA Y DE LAS METABASITAS DE LA LAMINA BLASTOMILONITICA DE GNEISES MIGMATICOS

El único estudio que aporta alguna evidencia sobre la existencia de asociaciones minerales propias de presiones elevadas entre las rocas metamórficas del Corredor Blastomilonítico de Badajoz-Córdoba es el de MATA y MUNHA (1986), que describe desde el punto de vista petrográfico las rocas con granate-clinopiroxeno aflorantes en el área de Campo Maior (Portugal).

2.2.1. Descripción de los afloramientos

Se han identificado eclogitas únicamente entre los materiales basales de la Unidad Alóctona; en particular, en dos afloramientos situados en términos metabásicos de los gneises de Azuaga, en la denominada lámina eclogítica. El más importante de estos afloramientos se sitúa al E de la localidad de Azuaga, en el área del Cerro de las Mesas (provincia de Córdoba). El segundo, de extensión más reducida y de contexto algo diferente, se localiza al SSO de Valencia de las Torres (fig. 7).

Las eclogitas del Cerro de las Mesas forman parte de un potente tramo de anfibolitas granatíferas que se dispone tectónicamente sobre un conjunto de gneises biotíticos migmatizados y ortogneises leucocráticos que intercalan peque-

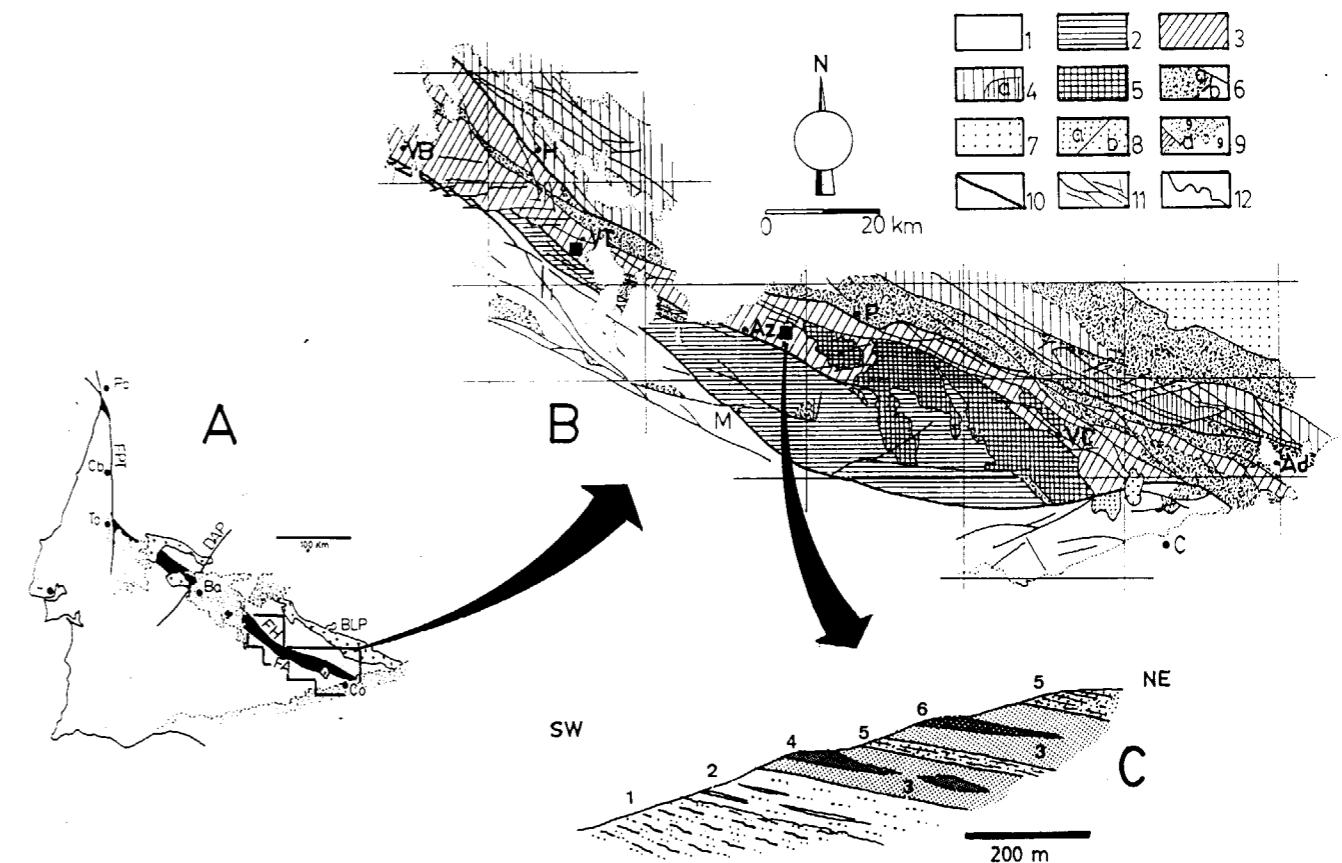


Figura 7.—A) Localización del Corredor Blastomilonítico de Badajoz-Córdoba (en negro) en el contexto del SO de la Península Ibérica. Fa, falla de Azuaga; FH, falla de Hornachos; FPT, falla de Porto-Tomar; DAP, dique de Alentejo-Plasencia; BLP, batolito de Los Pedroches. Las áreas punteadas representan depósitos discordantes terciarios. Localidades: Ba, Badajoz; Co, Córdoba; Cb, Coimbra; Li, Lisboa; Po, Porto; To, Tomar. B) Esquema geológico simplificado de la parte española del Corredor Blastomilonítico de Badajoz-Córdoba. 1, Series del Proterozoico Superior y del Cámbrico de la Zona de Ossa-Morena al S de la falla de Malcocinado; 2, dominio de Sierra Albarrana; 3, Corredor Blastomilonítico de Badajoz-Córdoba, incluyendo las Unidades Alóctona (gneises milonita de Higuera de Llerena, gneises de Azuaga y Serie Negra) y Para-autóctona; 4, terreno Centro-Ibérico; 4a, Unidad de Obejo-Espiel; 5, alineación magmática Villaviciosa de Córdoba-La Coronada (Carbonífero); 6a, series volcano-sedimentarias posttectónicas carboníferas; 6b, discordancia basal del Carbonífero; 7, batolito de Los Pedroches; 8a, granitos hercínicos precoces; 8b, granito de Los Arenales; 9, Terciario discordante (d: discordancia basal); 10, grandes contactos mecánicos; 11, haces de fallas en dirección; 12, contactos mecánicos intrusivos. Localidades: Ad, Adamuz; Az, Azuaga; C, Córdoba; H, Hornachos; M, Malcocinado; P, Peñarroya; VB, Villafraña de los Barros; VC, Villaviciosa de Córdoba; VT, Valencia de las Torres. Los cuadrados negros indican la localización de los afloramientos de eclogitas estudiados. C) Corte geológico esquemático de los gneises de Azuaga en la transversal del área del Cerro de las Mesas: 1, gneises migmatíticos milonitizados; 2, gneises calcosilicatados con mármoles con sillimanita-wollastonita y pegmatoides; 3, anfibolitas granatíferas; 4, rocas máficas-ultramáficas incluyendo metagabros y hornblenditas; 5, anfibolitas bandeadas; 6, eclogitas.

ños niveles de anfibolitas, de rocas calcosilicatadas y de cuarcitas negras (fig. 7).

La unidad anfibolítica que contiene a las eclogitas tiene una potencia de 200-300 m. Su carácter litológico no es homogéneo, incluyendo, junto con el término general de anfibolitas granatí-

feras, anfibolitas de hornblenda-plagioclasa de tamaño de grano grueso, de tamaño de grano fino, bandeadas, y flasher gabros. Se han reconocido, asimismo, masas lenticulares de tamaño decimétrico a decamétrico de rocas de grado alto muy retromorfoseadas (gneises de grano

grueso con granate-plagioclasa-biotita), de meta-harzburgitas y de las propias eclogitas.

En el afloramiento de Valencia de las Torres las eclogitas se han reconocido intercaladas en un paquete de anfibolitas granatíferas de 10-15 m. de potencia intercalado a su vez entre gneises biotíticos. La unidad anfibolítica presenta un carácter inhomogéneo, pudiéndose reconocer una parte central de aspecto más masivo, entre la que se encuentran las eclogitas y unos bordes con texturas deformacionales más pronunciadas. Este segundo afloramiento se sitúa en las proximidades de un importante accidente tectónico marcado por un tramo de milonitas y ultramilonitas de más de 200 m. de potencia, mientras que el afloramiento anterior ocuparía una posición estructural más alta respecto al citado accidente.

2.2.2. Asociaciones minerales en eclogitas y anfibolitas

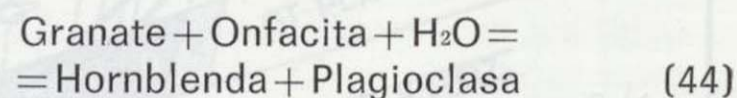
La asociación primaria de las eclogitas es la formada por:

granate - onfacita - zoisita - cuarzo - rutilo

Las onfacitas se han conservado como minerales relictos en el interior de los granates o, mucho

más ocasionalmente, entre la matriz simplectítica que los rodea. La retromorfosis de esta asociación primaria involucra la actuación sucesiva o complementaria de tres tipos de procesos:

- Desestabilización del clinopiroxeno onfacítico primario, relativamente rico en jadeíta, por transformación en una simplectita.
- Desestabilización parcial del granate mediante la reacción (MYSEN y HEIER, 1972):



- Anfibolitización del clinopiroxeno simplectítico secundario.

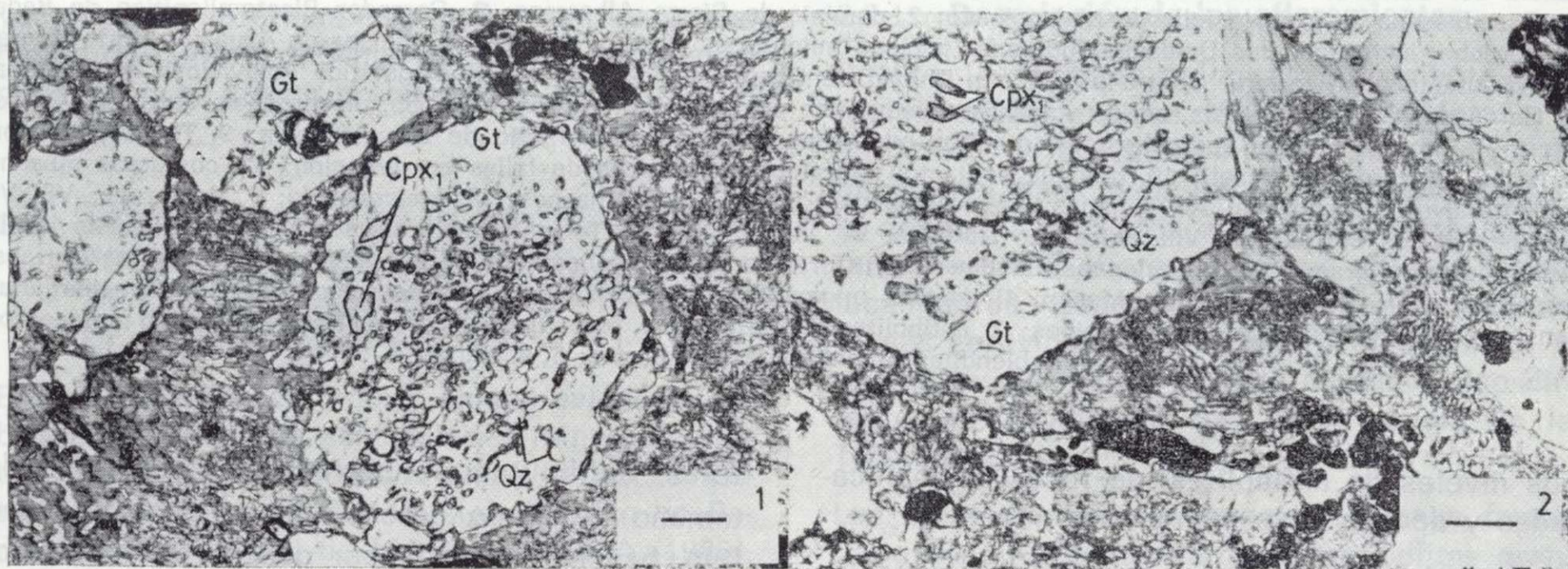
De esta manera, resulta una primera asociación, producto de la retromorfosis de las eclogitas, compuesta por (láminas 3 y 4):

granate - clinopiroxeno simplectítico - plagioclasa - hornblenda - rutilo/ilmenita

La desestabilización de la onfacita tiene lugar a presiones relativamente elevadas y da lugar a la formación de un clinopiroxeno diopsídico secundario que todavía mantiene algún contenido en molécula de jadeíta.

Por su parte, la desestabilización del granate, al

LAMINA 3



Ejemplos de asociaciones observadas en eclogitas. En ambas microfotografías se observan granates idiomorfos con inclusiones de cuarzo (incoloras) y de clinopiroxeno jadeítico primario (grisáceas) rodeados por una masa simplectítica de plagioclasa, clinopiroxeno secundario rutilo/ilmenita y anfíbol. Barras de escala: 0.2 mm. Nícoles paralelos.

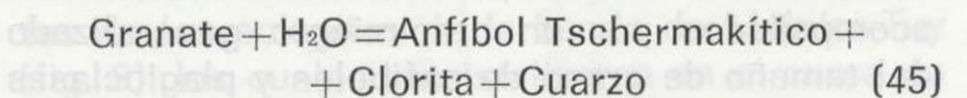
LAMINA 4



Ejemplos de asociaciones observadas en eclogitas retrogradadas con intensidad variable hasta anfibolitas granatíferas. 1, Eclogita en la que se ha desarrollado una amplia corona de anfíbol alrededor de granates a costa de la matriz simplectítica producto de los primeros estadios de retromorfosis en condiciones de presiones elevadas; 2, eclogita en la que la matriz simplectítica ha recristalizado totalmente, excepto en la inmediata proximidad de los granates, se observa también la formación de coronas de esfena alrededor de ilmenita; 3 y 4, las coronas simplectíticas han desaparecido casi totalmente, se reconocen como masas estrechas de aspecto anubarrado que rodean a los granates en algunas áreas, toda la ilmenita se ha convertido en esfena, aunque en el interior de algunos granates pueden quedar aún restos de rutilo. Barras de escala: 0.2 mm. Nícoles paralelos.

estar controlada por los procesos de difusión del H_2O , se verifica parcialmente a favor de los bordes de grano en contacto con onfacita. De esta manera encuentra su cauce de explicación el hecho observado de que los granates están muy raramente en contacto con las onfacitas contenidas en la matriz simplectítica, mientras que el piroxeno primario sí se ha podido conservar en el interior de los granates, hasta donde no se ha podido difundir el H_2O (LIEGEOIS y DU-

CHESNE, 1981). Otra reacción propuesta para la desestabilización del granate por adición de H_2O al sistema durante un descenso de la temperatura (cloritización retrógrada de los granates) es (THOMPSON et al., 1982):



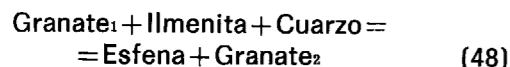
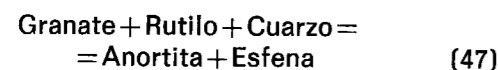
La inversa de esta reacción es capaz de explicar

la formación de granate por deshidratación de una asociación de grado bajo durante el metamorfismo progrado, lo que quizá haya ocurrido en algunas de las anfibolitas.

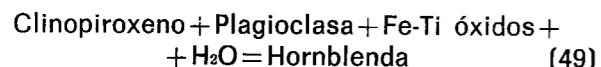
La desestabilización del rutilo para dar ilmenita se verifica a través de la reacción (según BOHLEN y LIOTTA, 1986):



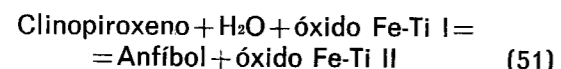
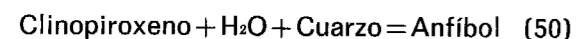
La asociación resultante de un primer estadio de retromorfosis es, a su vez, retrogradada a paragénesis anfibolíticas típicas, transformándose la ilmenita en esfena, o directamente el rutilo, según:



Las simplectitas de clinopiroxeno secundario-plagioclasa son sustituidas por simplectitas de hornblenda-plagioclasa y por hornblenda masiva que, con mucha frecuencia, forma coronas alrededor de los granates (lámina 4). La anfibolitización del clinopiroxeno secundario puede ser debida a la reacción (SPEAR, 1981a):



acompañada o no por reacciones de hidratación como:



las cuales pueden combinarse con la formación de granate a partir de plagioclasa durante estadios metamórficos de presiones aún relativamente elevadas (BARINK, 1984), tal y como lo sugiere el hecho de que algunos granates con coronas kelfíticas tengan aspecto idiomórfico. El rutilo presenta cubiertas de ilmenita, estando esta última en muchas ocasiones rodeada de coronas completas o incompletas de esfena.

Los estadios finales de la retromorfosis están acompañados por un crecimiento generalizado del tamaño de grano de anfíboles y plagioclasas simplectíticos como consecuencia de la verificación completa de las reacciones que desesta-

bilizan y consumen las asociaciones minerales iniciales de altas presiones y del subsecuente templado térmico. Los intercrecimientos simplectíticos de hornblenda y plagioclasa son sustituidos por cristales de hornblenda verde libre de inclusiones y por cristales equigranulares de plagioclasa, de modo que se pasa progresivamente (tanto a escala de afloramiento como a nivel petrográfico) desde las eclogitas a anfibolitas granatíferas que, en muchas ocasiones, llegan a carecer de las peculiaridades texturales que indican su origen a partir de eclogitas. Cabe señalar aquí que las anfibolitas con granate en las cuales se disponen alrededor de los granates cristales de anfíbol verde-azulado formando coronas son muy comunes no sólo en las unidades en las que se han descrito eclogitas, sino también entre los niveles de anfibolitas de potencia métrica a decamétrica que se intercalan por todas partes entre los materiales metapelíticos de la lámina blastomilonítica de gneises migmáticos. Este hecho podría indicar que al menos parte de las citadas anfibolitas con granate sufrieron un episodio metamórfico de altas presiones, tratándose realmente de eclogitas totalmente retrogradadas.

Las anfibolitas granatíferas o de hornblenda-plagioclasa que se observan en multitud de afloramientos sin ninguna relación física con eclogitas presentan las asociaciones:

hornblenda - plagioclasa - zoisita - epidota - clorita - cuarzo - ilmenita/esfena
hornblenda - granate - plagioclasa - cuarzo - biotita - clorita - zoisita - epidota - ilmenita/esfena

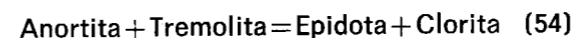
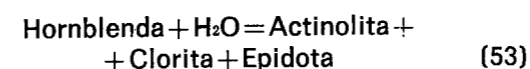
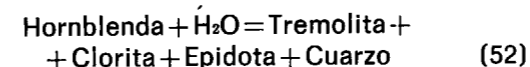
La alteración diaforética de estas rocas no llega a formar asociaciones típicas de la facies de los esquistos verdes, sino que, por el contrario, ocurre dentro de la facies de las anfibolitas con epidota, cerca de la transición entre la facies de las anfibolitas y la de los esquistos verdes (LARDEAUX et al., 1986). Siguiendo a MOODY et al. (1983), las evidencias que permiten establecer la transición entre ambas facies en estas rocas son los siguientes:

— Aparece un anfíbol de composición actinolita-hornblenda actinolítica al mismo tiempo que se hace común la clorita rellenando venas que cortan con ángulos elevados a la folia-

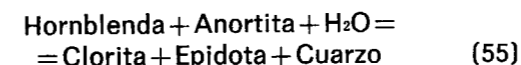
ción milonítica definida por los minerales de grado más elevado.

- La composición de los anfíboles evoluciona en el sentido de que disminuyen los contenidos de Al, Ti y Na.
- La esfena se hace común a costa de la desaparición de la ilmenita.

La aparición de clorita y epidota en algunas asociaciones de grado medio puede deberse a alguna de las reacciones siguientes:



las cuales se combinan en:



A pesar de que no es infrecuente la formación de clorita, anfíbol actinolítico y epidota e incluso el crecimiento de granate, los procesos de milonización a los que se asocian estas retrogradaciones dan lugar a una reducción significativa del tamaño de grano muchas veces sin cambios substanciales en la mineralogía.

2.2.3. Química mineral

— *Granates* (tablas IV y V)

La composición de los granates en asociación con onfacita es bastante similar a la composición de los granates que se asocian a los clinopiroxenos simplectíticos en las rocas que sólo conservan el clinopiroxeno secundario (tabla IV). En ambos casos (fig. 8) se trata de granates ricos en almandino, piropero y grosularia, y pobres en andradita y espesartina. Los contenidos en molécula de almandino son ligeramente más elevados en los granates del primer tipo (58-60 por 100) que en los del segundo (50-57 por 100), mientras que los contenidos en grosularia son ligeramente menores (22-25 por 100 frente a 23-30 por 100). Los contenidos de piropero son más uniformes en los granates asociados a onfacita (15-16 por 100) y más variables en los del segundo tipo (12-20 por 100), si bien estos últimos suelen ser más ricos en el citado miembro final.

Por la composición de los granates, las eclogitas que se estudian aquí se pueden clasificar como eclogitas de tipo C según las clasificaciones de COLEMAN et al. (1965) o de MOTTANA (1986).

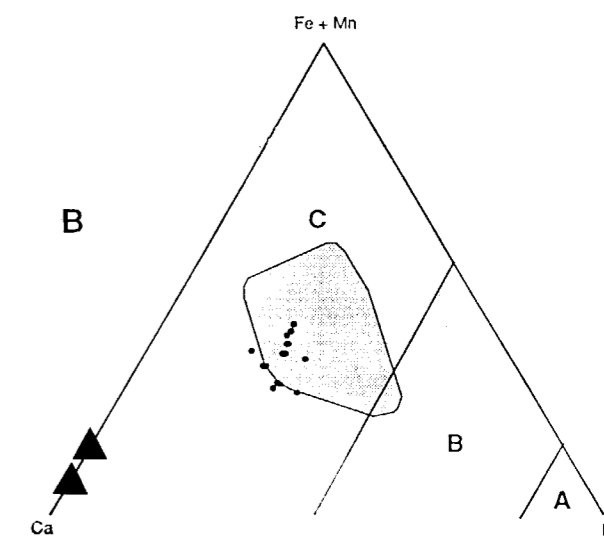


Figura 8.—Composiciones de los granates en equilibrio con onfacita y con clinopiroxeno simplectítico secundario y de los granates de las anfibolitas en las que no se reconoce clinopiroxeno. Los triángulos representan las proyecciones de los granates analizados por PASCUAL (1983). Se ha representado también el área en la que se proyectan las composiciones de los granates de las eclogitas de la Unidad de Malpica-Tuy, con metamorfismo de tipo L-IT/HP (análisis de GIL IBARGUCHI y ORTEGA, 1985, y datos posteriores). A, B y C indican que las áreas en que se proyectan las composiciones de los granates de las eclogitas de los tipos A, B y C de MOTTANA (1986), respectivamente.

El zonado de los granates (fig. 9) no es muy marcado. Consiste en un incremento progresivo y ligero hacia los bordes del contenido de piropero y un decrecimiento paralelo de los contenidos de almandino, grosularia y espesartina. Estas variaciones se pueden explicar como resultado de un aumento de la temperatura durante el crecimiento de los granates.

Los granates de estas eclogitas son muy similares en cuanto a sus composiciones a los granates de las eclogitas de la banda de Malpica-Tuy (fig. 8), los cuales recrystalizaron en el curso de un metamorfismo de presiones altas y temperaturas bajas a intermedias (GIL IBARGUCHI y OR-

TABLA V
Análisis (wt%) y fórmulas estructurales de granates de anfibolitas banales (muestra 133) y de variedades ultramiloníticas (muestra 141). B, BC y C indican la posición de los puntos analizados en el borde, hacia el centro, o en el centro de los granates, respectivamente.

Muestra	133-B	133-BC	133-C	141-B	141-BC	141-C
SiO ₂	38.46	38.05	37.67	38.14	38.06	37.43
TiO ₂	0.05	0.11	0.13	0.15	0.19	0.16
Al ₂ O ₃	21.50	21.86	21.68	21.44	21.51	21.22
Cr ₂ O ₃	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.02
Fe ₂ O ₃	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.43
FeO	25.28	25.06	26.36	28.23	28.14	28.23
MnO	0.90	1.28	3.79	1.04	0.95	1.19
NiO	0.00	0.02	0.08	0.01	0.00	0.00
MgO	3.25	3.14	1.95	2.24	2.13	2.16
CaO	10.41	10.45	8.36	8.71	8.99	9.15
Na ₂ O	0.03	0.00	0.00	0.04	0.04	0.04
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02
TOTAL	99.99	99.99	100.02	100.00	100.02	100.05
FeOt	25.38	25.06	26.36	28.23	28.14	28.62
<i>Fórmulas estructurales</i>						
Si	3.020	2.989	2.998	3.028	3.021	2.975
Al IV	0.000	0.011	0.002	0.000	0.000	0.025
Al VI	1.990	2.013	2.033	2.007	2.013	1.963
Ti	0.003	0.006	0.008	0.009	0.011	0.010
Cr	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001
Fe ⁺⁺⁺	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.026
Fe ⁺⁺	1.660	1.646	1.755	1.874	1.868	1.877
Mn	0.060	0.085	0.256	0.070	0.064	0.080
Mg	0.380	0.368	0.231	0.265	0.252	0.256
Ni	0.000	0.001	0.005	0.001	0.000	0.000
Ca	0.876	0.879	0.713	0.741	0.765	0.779
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002
Na	0.005	0.000	0.000	0.006	0.006	0.006
O	12	12	12	12	12	12

queño tamaño de los cristales analizados no ha sido posible establecer la existencia de zonaciones composicionales.

Las características composicionales que se acaban de señalar son bastante diferentes de las características que presentan los piroxenos analizados por PASCUAL (1983), los cuales son clinopiroxenos cálcicos (salitas, según la clasificación de DEER et al., 1966; ver fig. 10). Este hecho apoya nuevamente la idea de que las rocas analizadas por este autor son, probablemente, rocas calcosilicatadas.

— Anfíboles (tabla VII)

Los anfíboles cálcicos son constituyentes secundarios de las eclogitas y de sus productos de retromorfosis, siendo, asimismo, los constituyentes principales de las anfibolitas, en las que parecen presentar un carácter primario.

En las eclogitas y rocas relacionadas los anfíboles son magnesio-hornblendas ricas en Si, aunque se han encontrado también algunos cristales de actinolita y de hornblenda actinolítica (fig. 11). Las relaciones Mg/(Mg+Fe) de estos anfíboles son similares a las que presentan los piroxenos (de 0.6 a 0.7). Las diferencias químicas entre las hornblendas y los anfíboles actinolíticos se cifran en los mayores contenidos de las primeras en Al, Na, K y Ti. Los contenidos en Na total son siempre mayores en las hornblendas, si bien el Na(A) puede llegar a ser mayor en algunas acti-

TABLA VI
Análisis (wt%) y fórmulas estructurales de clinopiroxenos primarios (Msl-1, Msl-2, Msl-3, Msl-4, Msl-6, Msl-7 y Msl-9) y secundarios (PxG-D, PxG-E, PxG-F, Msl-5, Msl-8 y om8-29) de eclogitas intercaladas entre los gneises de Azuaga. El análisis Pas.H corresponde a un piroxeno analizado por PASCUAL (1983).

Muestra	Pas.H	PxG-D	PxG-E	PxG-F	Msl-5	om8-29	Msl-6	Msl-7	Msl-9	Msl-1	Msl-2	Msl-3	Msl-4
K ₂ O	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01	0.16	0.01	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00
CaO	21.95	22.96	22.07	23.87	21.66	24.37	17.71	17.37	16.94	17.67	17.95	17.43	17.80
TiO ₂	0.00	0.08	0.11	0.09	0.08	0.08	0.19	0.23	0.17	0.10	0.08	0.18	0.09
FeO	13.26	7.81	8.68	5.03	8.26	5.67	3.73	6.46	4.66	5.74	3.98	5.23	7.09
Fe ₂ O ₃	0.00	2.02	0.82	0.49	0.46	3.31	3.33	0.90	2.21	1.86	3.69	0.00	0.60
MnO	0.47	0.04	0.09	0.08	0.06	0.06	0.52	0.00	0.06	0.00	0.27	0.06	0.07
Cr ₂ O ₃	0.07	0.05	0.01	0.06	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.06	0.04	0.01	0.00
Na ₂ O	0.07	1.00	1.36	0.73	1.30	0.36	4.14	3.74	4.47	3.99	4.26	4.21	3.63
SiO ₂	56.66	52.70	53.05	53.76	53.78	54.19	53.88	53.85	54.16	53.96	54.32	55.24	54.27
Al ₂ O ₃	0.57	1.49	2.34	1.11	1.95	0.97	7.21	6.81	7.78	6.54	6.32	7.36	5.91
MgO	6.80	11.87	11.29	14.19	12.50	14.71	10.08	10.07	9.96	9.95	10.14	10.25	10.17
NiO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.59	0.01	0.00	0.00	0.04	0.05
TOTAL	99.85	100.03	99.84	99.41	100.06	100.79	100.95	100.03	100.42	99.87	100.94	100.01	99.68
FeOt	13.26	9.63	9.42	5.47	8.68	5.95	6.73	7.27	6.65	7.41	7.30	5.23	7.63
<i>Fórmulas estructurales</i>													
Si	2.208	1.972	1.983	1.992	1.995	1.985	1.945	1.967	1.956	1.971	1.963	1.997	1.991
Al IV	0.000	0.028	0.017	0.008	0.005	0.015	0.055	0.033	0.044	0.029	0.037	0.003	0.009
Al VI	0.026	0.038	0.086	0.040	0.081	0.027	0.252	0.261	0.288	0.253	0.232	0.311	0.246
Ti	0.000	0.002	0.003	0.003	0.002	0.002	0.005	0.006	0.005	0.003	0.002	0.005	0.002
Cr	0.000	0.001	0.000	0.002	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.002	0.001	0.000	0.000
Fe ⁺⁺⁺	0.000	0.057	0.023	0.014	0.013	0.009	0.091	0.025	0.060	0.051	0.100	0.000	0.016
Fe ⁺⁺	0.432	0.244	0.271	0.156	0.256	0.174	0.113	0.197	0.141	0.175	0.120	0.158	0.218
Mn	0.016	0.001	0.003	0.003	0.002	0.002	0.016	0.000	0.002	0.000	0.008	0.002	0.002
Mg	0.395	0.662	0.629	0.783	0.691	0.803	0.542	0.548	0.536	0.542	0.546	0.552	0.556
Ni	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.017	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001
Ca	0.916	0.921	0.884	0.948	0.861	0.956	0.685	0.680	0.656	0.692	0.689	0.675	0.700
Na	0.005	0.073	0.099	0.052	0.094	0.026	0.290	0.265	0.313	0.283	0.298	0.295	0.258
K	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.007	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000
O	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6

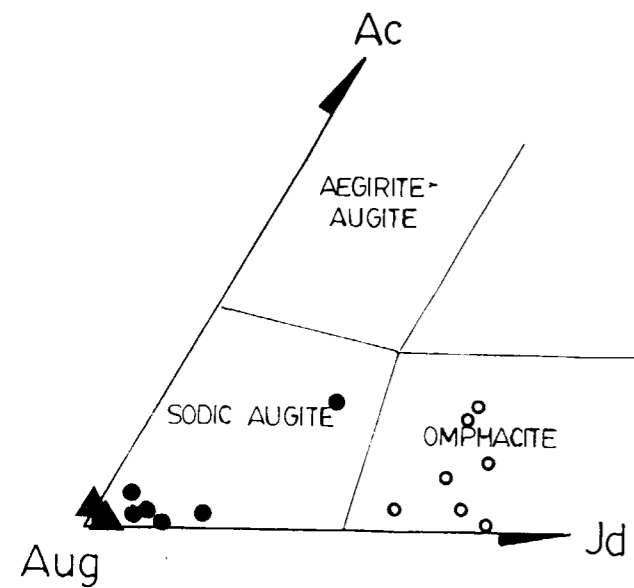


Figura 10.—Diagrama triangular en el que se representan las composiciones de los piroxenos onfacíticos primarios (círculos vacíos) y de los piroxenos simplectíticos secundarios (círculos negros) de las eclogitas; los triángulos corresponden a las composiciones de los piroxenos analizados por PASCUAL (1983).

nolitas. El Ti presenta cierta variabilidad, aunque la tendencia es hacia una mayor abundancia en las hornblendas. Estas diferencias son indicativas de una temperatura de formación más elevada para las hornblendas y una mayor fugacidad del oxígeno durante la formación de las actinolitas (SPEAR, 1981b). Todos los parámetros indicados están relacionados y condicionados por la composición global de la roca. Sin embargo, los mayores contenidos de Al^{VI} y menores de Si que muestran las hornblendas están en línea con una génesis a presiones relativamente más elevadas que las actinolitas (SPEAR, 1981a; HOSUTANI y BANNO, 1986). Dentro del conjunto de las hornblendas se puede diferenciar un grupo con mayores contenidos en Al^{VI} y Ti que se formaron a temperaturas y presiones relativamente más altas que el resto (RAASE, 1974). A escala de una sola muestra, las parejas de anfíboles hornblenda-actinolita observadas son más ricas en Al^{IV} cuando la relación Fe/Mg es más alta. Estos pares presentan composiciones cuyas proyecciones en el diagrama Mg-Fe-Al^{VI} de TAGIRI (1977) aparecen unidas por líneas de conjugación de tal forma que su origen más probable es debido a

la existencia de una laguna de miscibilidad entre ambos.

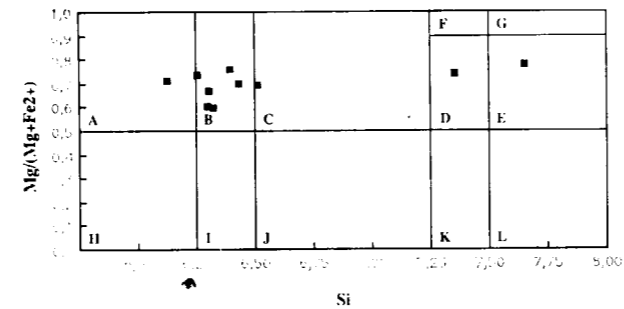


Figura 11.—Representación en el diagrama de LEAKE (1978) para anfíboles cálcicos ((Ca+Na)>1.34; Na<0.67; (Na+K)<0.50; Ti<0.50) de los anfíboles analizados en las retroeclogitas y anfibolitas de la lámina eclogítica. Los campos composicionales correspondientes a las etiquetas A a L son los siguientes: A, tschermakita; B, hornblenda tschermakítica; C, magnesio-hornblenda; D, hornblenda actinolítica; E, actinolita; F, hornblenda tremolítica; G, tremolita; H, ferro-tschermakita; I, hornblenda ferro-tschermakítica; J, ferro-hornblenda; K, hornblenda ferro-actinolítica; L, ferro-actinolita.

— Plagioclasas (tabla VIII)

Las plagioclasas de las eclogitas retromorfoseadas son de composición relativamente sódica (0.81 a 0.92 de fracción molar de albita), mientras que las plagioclasas de las anfibolitas granatíferas son más cálcicas (fracción molar de albita en torno a 0.7). Estos contenidos altos de albita en las plagioclasas del primer tipo son congruentes con su posible origen a partir de la destrucción de piroxenos primarios onfacíticos, ricos en Na, al propio tiempo que los mayores contenidos en Ca de las plagioclasas del segundo tipo enumerado se pueden explicar por la desestabilización y reacción progresivas del granate que acompaña al consumo del rutilo/ilmenita y del par granate/clinopiroxeno para dar hornblenda durante la anfibolitización [reacciones (46), (47) y (48)]. Los mayores contenidos en Ca de las plagioclasas de las anfibolitas comunes podrían ser también una característica primaria de estas rocas en el supuesto de que no se hubiesen formado a partir de la retromorfosis de las eclogitas.

TABLA VII

Análisis (wt%) y fórmulas estructurales de anfíboles de eclogitas con clinopiroxeno primario (muestra Ms) y con clinopiroxeno secundario (muestras Ag y om8). Los análisis de las muestras 326, 133 y 141 corresponden a anfibolitas en las que no quedan vestigios de un episodio metamórfico de grado alto anterior

Muestras	AG-A	AG-B	AG-C	MS	om8-I	om8-II	326-I	326-II	133	141
SiO ₂	44.61	43.75	41.92	44.72	53.70	42.79	43.58	51.91	43.97	42.81
TiO ₂	0.66	0.72	0.12	0.81	0.22	0.56	0.85	0.38	0.53	0.53
Al ₂ O ₃	12.59	13.70	13.73	12.01	3.28	14.76	14.34	5.30	16.98	13.52
Cr ₂ O ₃	0.04	0.00	0.00	0.25	0.08	0.08	0.08	0.00	0.00	0.06
Fe ₂ O ₃	1.77	0.58	9.83	10.13	0.62	4.02	6.33	6.17	5.73	5.62
FeO	10.15	9.84	7.95	6.77	8.71	11.66	7.73	8.90	8.70	11.80
MnO	0.13	0.09	0.18	0.06	0.09	0.12	0.12	0.18	0.11	0.16
NiO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.05	0.01	0.05	0.04
MgO	12.84	12.89	11.08	11.96	17.17	9.69	12.06	14.14	9.75	9.97
CaO	12.34	12.18	11.08	10.27	12.78	11.32	11.30	11.41	10.69	11.78
Na ₂ O	1.73	2.01	2.29	2.40	0.35	1.71	2.08	0.65	1.49	1.72
K ₂ O	0.60	0.64	0.74	0.32	0.13	0.70	0.64	0.11	0.43	0.49
TOTAL	97.46	96.40	98.91	99.71	97.16	97.43	99.15	99.16	98.43	98.49
FeOt	11.74	10.36	16.79	15.89	9.27	15.28	13.42	14.45	13.86	16.85
Fórmulas estructurales										
Si(T ₁)	2.513	2.434	2.130	2.399	3.651	2.320	2.258	3.354	2.306	2.302
Al(IV T ₁)	1.487	1.566	1.870	1.601	0.349	1.680	1.742	0.646	1.694	1.698
Si(T ₂)	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000
Al(VI M ₂)	0.675	0.810	0.497	0.425	0.202	0.890	0.686	0.239	1.772	0.648
Ti(M ₂)	0.072	0.080	0.013	0.087	0.024	0.062	0.092	0.040	0.057	0.059
Cr(M ₂)	0.005	0.000	0.000	0.028	0.009	0.009	0.009	0.000	0.000	0.007
Fe ₃ +(M ₂)	0.194	0.064	1.081	1.091	0.067	0.447	0.684	0.658	0.619	0.622
Mg(M ₂)	0.730	0.733	0.291	0.279	1.322	0.353	0.389	0.785	0.000	0.399
Fe ₂ +(M ₂)	0.324	0.314	0.117	0.089	0.376	0.238	0.140	0.277	0.000	0.265
Mg(M ₁ M ₃)	2.064	2.093	2.123	2.271	2.324	1.780	2.192	2.200	2.084	1.788
Fe ₂ +(M ₁ M ₃)	0.915	0.896	0.855	0.722	0.662	1.202	0.788	0.777	1.044	1.187
Mn(M ₄)	0.016	0.011	0.022	0.007	0.011	0.015	0.015	0.022	0.013	0.020
Ca(M ₄)	1.930	1.919	1.736	1.575	1.951	1.792	1.739	1.732	1.643	1.858
Na(M ₄)	0.054	0.069	0.242	0.418	0.038	0.193	0.247	0.179	0.344	0.122
Na(A)	0.436	0.504	0.408	0.248	0.490	0.296	0.332	0.000	0.070	0.369
K(A)	0.112	0.120	0.138	0.058	0.024	0.132	0.117	0.020	0.079	0.092
Vacanc.(A)	0.452	0.376	0.454	0.694	0.487	0.572	0.550	1.047	0.851	0.539
O	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24

— Óxidos de Fe-Ti (tabla VIII)

El rutilo es el óxido de Fe-Ti primario en las eclogitas. La distribución de los óxidos de este tipo en el curso de la retromorfosis sigue una tendencia clara en lo que se refiere a la formación progresiva de ilmenita. Las ilmenitas resultantes de la desestabilización del rutilo tienen contenidos en Si, Mg y Mn relativamente elevados que las hacen composicionalmente diferentes de las ilmenitas de rocas metamorfizadas en la facies de las granulitas (DUFOR, 1985). Co-

mo consecuencia, en las anfibolitas granatíferas asociadas a las eclogitas la presencia de ilmenita debe ser atribuida a la desestabilización de rutilo primario por reacción durante un proceso de descompresión en condiciones de la facies de las anfibolitas bajo presiones relativamente elevadas. En muchas eclogitas las ilmenitas aparecen rodeando a cristales de rutilo, por lo que su origen a partir de éste es evidente. Sin embargo, en las anfibolitas granatíferas asociadas o bien en otras anfibolitas con granate que no

TABLA VIII

Análisis (wt%) y fórmulas estructurales de plagioclasas (muestras om8, 326, 133, 141, AG-A, LE-B y LE-C) e ilmenitas (muestras om8, 326, 133 y 141) correspondientes a rocas de grado alto retromorfoseadas (muestras AG, LE y om8) y a anfibolitas banales (el resto).

Muestra	om8	326	133	141	AG-A	LE-B	LE-C	om8	326	133	141
K ₂ O	0.15	0.27	0.09	0.30	0.16	0.12	0.20	0.02	0.02	0.03	0.00
CaO	5.83	3.10	5.83	5.63	1.36	2.32	3.73	0.15	0.07	0.05	0.11
TiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.07	0.02	0.03	0.04	54.82	53.90	53.21	52.63
FeO _t	0.29	0.00	0.09	0.38	0.06	0.00	0.08	41.19	44.47	43.67	45.96
MnO	0.01	0.58	0.02	0.00	0.00	0.04	0.03	2.45	1.02	2.60	2.00
Cr ₂ O ₃	0.04	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.09	0.00	0.04	0.01
Na ₂ O	8.06	9.43	7.81	7.67	8.62	9.14	8.59	0.06	0.00	0.14	0.00
SiO ₂	61.59	64.67	62.18	61.11	67.46	66.62	64.42	0.07	0.00	0.04	0.00
Al ₂ O ₃	24.73	21.87	24.51	24.57	22.27	21.76	22.85	0.00	0.03	0.10	0.00
MgO	0.00	0.03	0.00	0.08	0.02	0.00	0.00	1.09	0.49	0.06	0.09
NiO	0.04	0.09	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.03	0.00
TOTAL	100.74	100.04	100.53	99.89	99.97	100.03	99.94	99.98	100.00	99.97	100.80

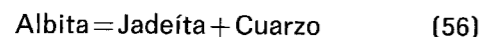
Fórmulas estructurales

Si	2.716	2.854	2.738	2.717	2.928	2.909	2.834	0.003	0.000	0.002	0.000
Al	1.286	1.138	1.272	1.288	1.139	1.120	1.185	0.000	0.002	0.006	0.000
Ti	0.000	0.000	0.000	0.002	0.001	0.001	0.001	2.042	2.027	2.011	1.986
Cr	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.004	0.000	0.002	0.000
Fe ⁺⁺	0.011	0.000	0.003	0.014	0.002	0.000	0.003	1.707	1.860	1.836	1.929
Mn	0.000	0.022	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001	0.103	0.043	0.111	0.085
Mg	0.000	0.002	0.000	0.005	0.001	0.000	0.000	0.080	0.037	0.004	0.007
Ni	0.001	0.003	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.001	0.000
Ca	0.275	0.147	0.275	0.268	0.063	0.109	0.176	0.008	0.004	0.003	0.006
Na	0.689	0.807	0.667	0.661	0.725	0.774	0.733	0.006	0.000	0.014	0.000
K	0.008	0.015	0.005	0.017	0.009	0.007	0.011	0.001	0.001	0.002	0.000
O	8	8	8	8	8	8	8	6	6	6	6

están asociadas físicamente a eclogitas (o al menos no se observan sus restos) la ilmenita es el único óxido de Fe-Ti presente o está relacionada con cristales de esfena que forman cubiertas generalmente incompletas a su alrededor (lo que indica un aumento de la fugacidad del agua en el sistema; SPEAR, 1981b).

2.2.4. Condiciones presión-temperatura del metamorfismo

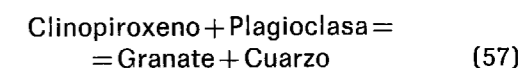
Las condiciones de estabilidad de las eclogitas se han calculado mediante el geotermómetro granate-clinopiroxeno de ELLIS y GREEN (1979) y de POWELL (1985) y la reacción (56) calibrada como geobarómetro (HOLLAND, 1980, 1983):



Teniendo en cuenta los patrones de zonación observados en los granates (probablemente debidos a un reequilibrio bajo condiciones de temperatura en aumento) para calcular las condiciones de T del clímax metamórfico se han utilizado las composiciones más ricas en Mg de los granates (que no son las de sus bordes) junto con los análisis de las onfacitas con los contenidos más elevados de Fe. Las condiciones de temperatura calculadas para el citado equilibrio entre granates y onfacitas son 660-680° C para el intervalo de presiones de 10 a 15 Kbar (fig. 12). Al utilizar los cálculos las composiciones de los clinopiroxenos más sódicos resultan temperaturas de 691-703° C (según las fórmulas de ELLIS y GREEN, 1979) y 671-685° C (según la calibración de POWELL, 1985) para el mismo intervalo de presiones. Los valores de presión que se obtienen al sustituir las temperaturas calculadas en el geo-

barómetro de HOLLAND (1980, 1983) son de 14.3-14.5 Kbar.

Las condiciones de equilibrio de la asociación granate-clinopiroxeno secundario-plagioclasa (figura 12) se cifran en temperaturas (según los geotermómetros anteriores) de 600-650° C en la mayoría de los casos (si bien se han obtenido ocasionalmente temperaturas tan altas como 750° C usando las composiciones de los bordes de algunos granates) y presiones de 9-10 Kbar según las fórmulas de PERKINS y NEWTON (1981), NEWTON (1986) y según la modificación de POWELL y HOLLAND (1988) de las fórmulas de NEWTON y PERKINS (1982) y de PERKINS y CHIPERA (1985) para la reacción:



y de 8 a 9 Kbar utilizando la calibración de la reacción (56) de HOLLAND (1980, 1983).

Las anfibolitas granatíferas que se asocian a las eclogitas recrystalizaron bajo condiciones de temperatura de 500-550° C según los resultados obtenidos de la aplicación del geotermómetro granate-hornblenda usando la composición de los bordes de los granates, con los cuales parecen estar en equilibrio los anfíboles (fig. 12). La utilización de las composiciones de los centros de los granates resulta en valores de temperatura anormalmente bajos (350-400° C).

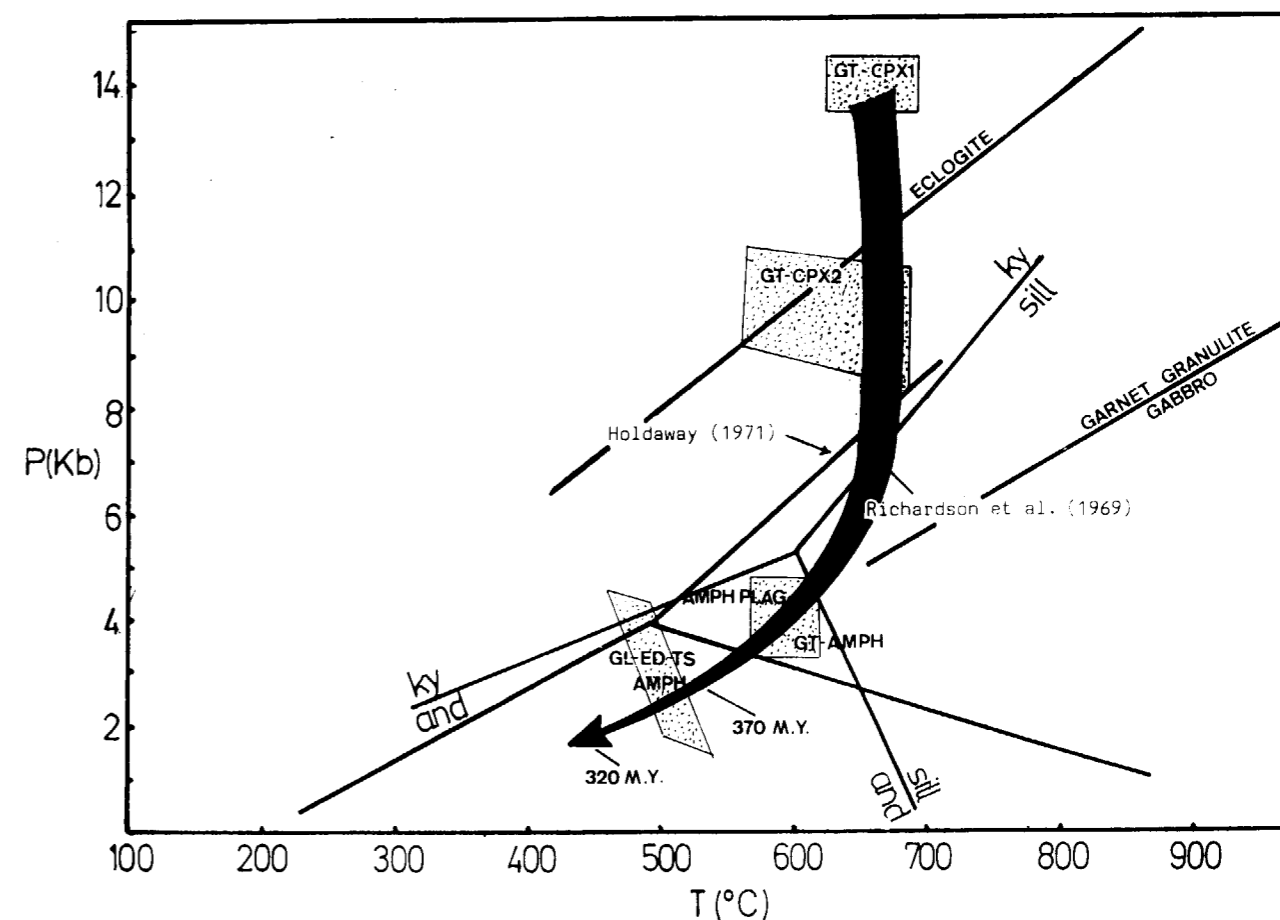


Figura 12.—Diagrama P-T en el que se representan los campos de estabilidad de las asociaciones con granate-clinopiroxeno primario (A), con granate-clinopiroxeno simplectítico secundario (B), con granate-plagioclasa-hornblenda (C: Amph-Plag y Gt-Amph) y para las características composicionales de los anfíboles (D), en las eclogitas de la lámina eclogítica, tal y como se discute en el texto.

Las condiciones de estabilidad calculadas para la asociación granate-hornblenda-plagioclasa utilizando los métodos gráficos de SPEAR (1980, 1981a), BROWN (1974) y RAASE (1974) varían entre 500-600° C de temperatura y 4-5 Kbar de presión (figs. 13 y 14, respectivamente).

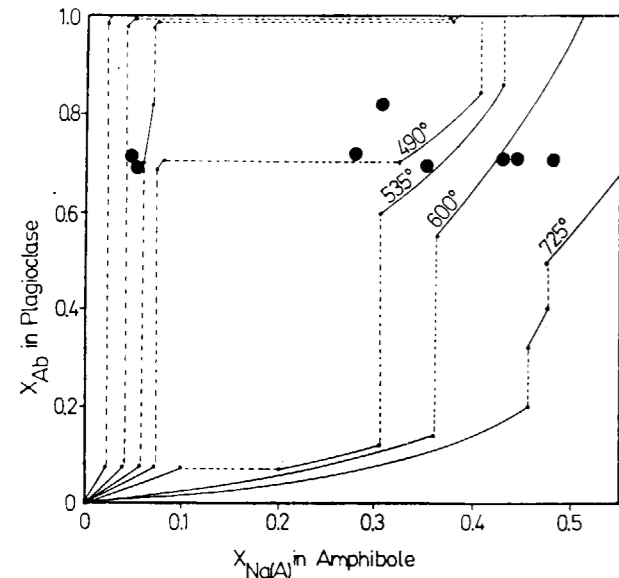


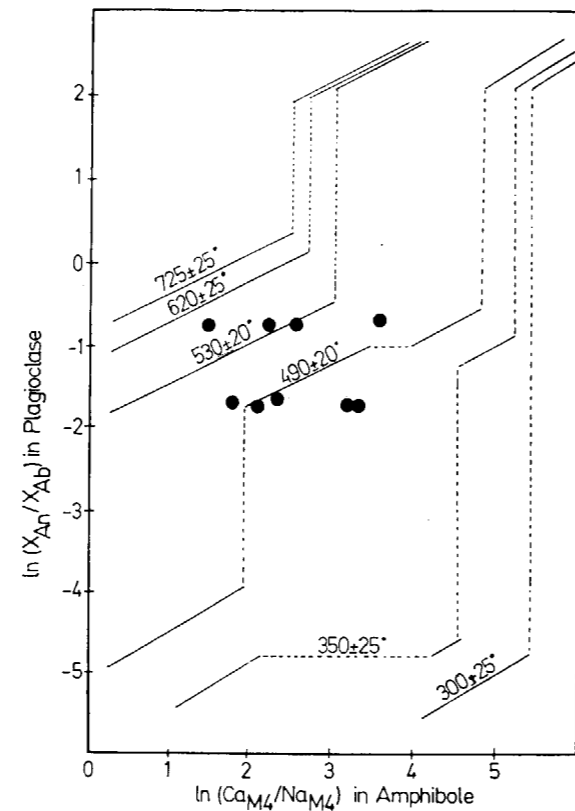
Figura 13.—Estimación de las temperaturas para la estabilidad de los equilibrios de intercambio anfibol-plagioclasa (círculos negros) en anfibolitas y eclogitas de la lámina eclogítica, según los métodos gráficos de SPEAR (1980, 1981a).

Las estimaciones de P-T de estabilidad de los anfíboles de estas rocas calculadas mediante la utilización de sus composiciones son 400° C y 2-3 Kbar. Estos últimos resultados deben ser utilizados con cautela, puesto que las calibraciones utilizadas (métodos de HOLLAND y RICHARDSON, 1979; TRIBOULET y AUDREN, 1988, y TRIBOULET y BASSIAS, 1988) arrojan muchas veces resultados irreales: temperaturas bajas (propias de un metamorfismo de grado bajo-muy bajo) y presiones muy elevadas (superiores a 10 Kbar) para esas mismas temperaturas.

2.3. METAMORFISMO DE LA SERIE NEGRA

2.3.1. Asociaciones minerales de las rocas pelíticas y grauwáquicas

Las principales asociaciones observadas en las metapelitas de la Serie Negra son (lámina 5):



- cuarzo - feldespato alcalino - plagioclasa - moscovita - biotita
- biotita - moscovita - cuarzo - plagioclasa - grafito
- biotita - moscovita - granate - feldespatos - grafito
- cuarzo - moscovita - turmalina - grafito
- mientras que en las metagrauvacas se encuentran las asociaciones:
- plagioclasa - feldespato alcalino - cuarzo - moscovita - biotita - grafito
- plagioclasa - feldespato alcalino - cuarzo - moscovita - biotita - clorita - grafito
- y en las cuarcitas negras intercaladas:
- cuarzo - grafito
- cuarzo - moscovita - grafito
- cuarzo - moscovita - biotita - granate - grafito
- En las metapelitas las asociaciones con granate

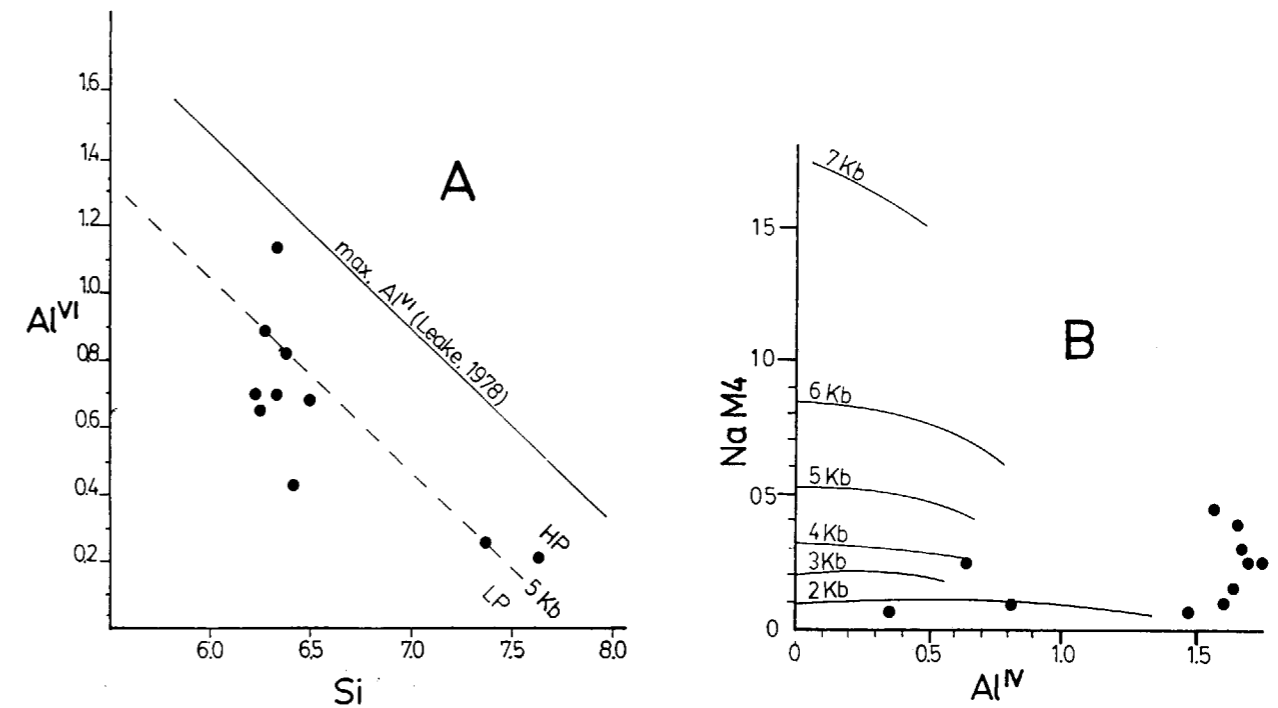


Figura 14.—Estimación de las presiones para la estabilidad de los equilibrios de intercambio y las características composicionales de los anfíboles (círculos negros) en anfibolitas y eclogitas de la lámina eclogítica según los métodos gráficos de (A) RAASE (1974) y (B) BROWN (1974).

y biotita se caracterizan porque estos minerales presentan caracteres sintectónicos respecto a la segunda fase de deformación regional, creciendo sobre (o englobando en su interior) minerales orientados que definen la esquistosidad de primera fase y que corresponden a la asociación:

- cuarzo - moscovita - biotita - feldespatos - grafito

Las cloritas son un producto común de la alteración de biotitas y granates, apareciendo también entre los minerales de la matriz de las metagrauvacas.

En los materiales que afloran en el domo gneísico de Mina Afortunada se encuentran migmatitas con la asociación:

- cuarzo - feldespato potásico - plagioclasa - biotita - moscovita - sillimanita - (cianita) - opacos (grafito)

que se puede separar en:

- cuarzo - feldespato potásico - plagioclasa ± biotita ± moscovita

en el leucosoma y:

- biotita - sillimanita ± moscovita ± feldespatos ± cuarzo - grafito

en el melanosoma.

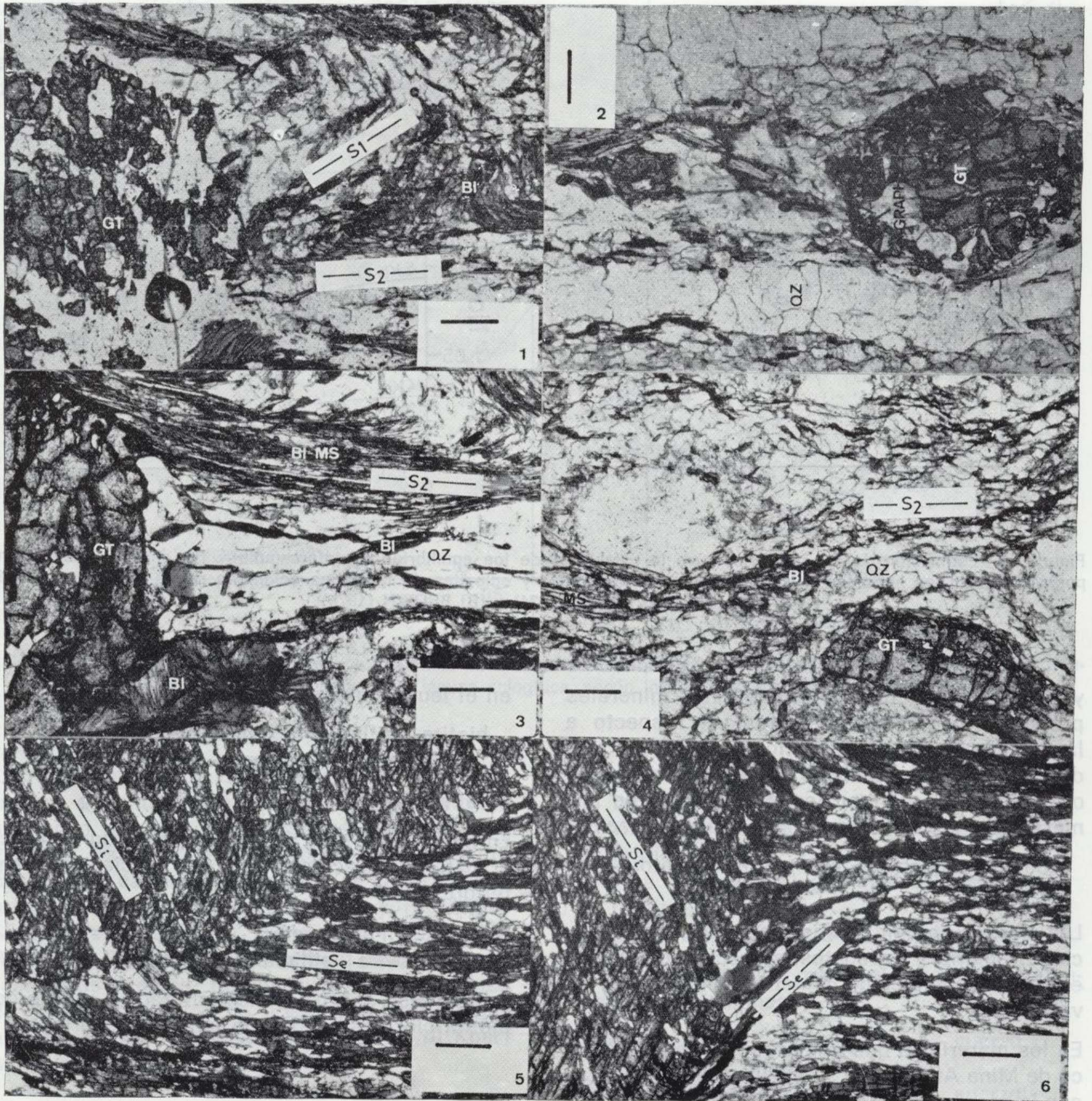
En migmatitas muy deformadas y ortogneises el granate suele acompañar a las asociaciones anteriores:

- cuarzo - Fd potásico - plagioclasa - biotita - moscovita - sillimanita - granate - grafito

apareciendo con frecuencia alterado a masas de biotita cloritizada con una intensidad variable.

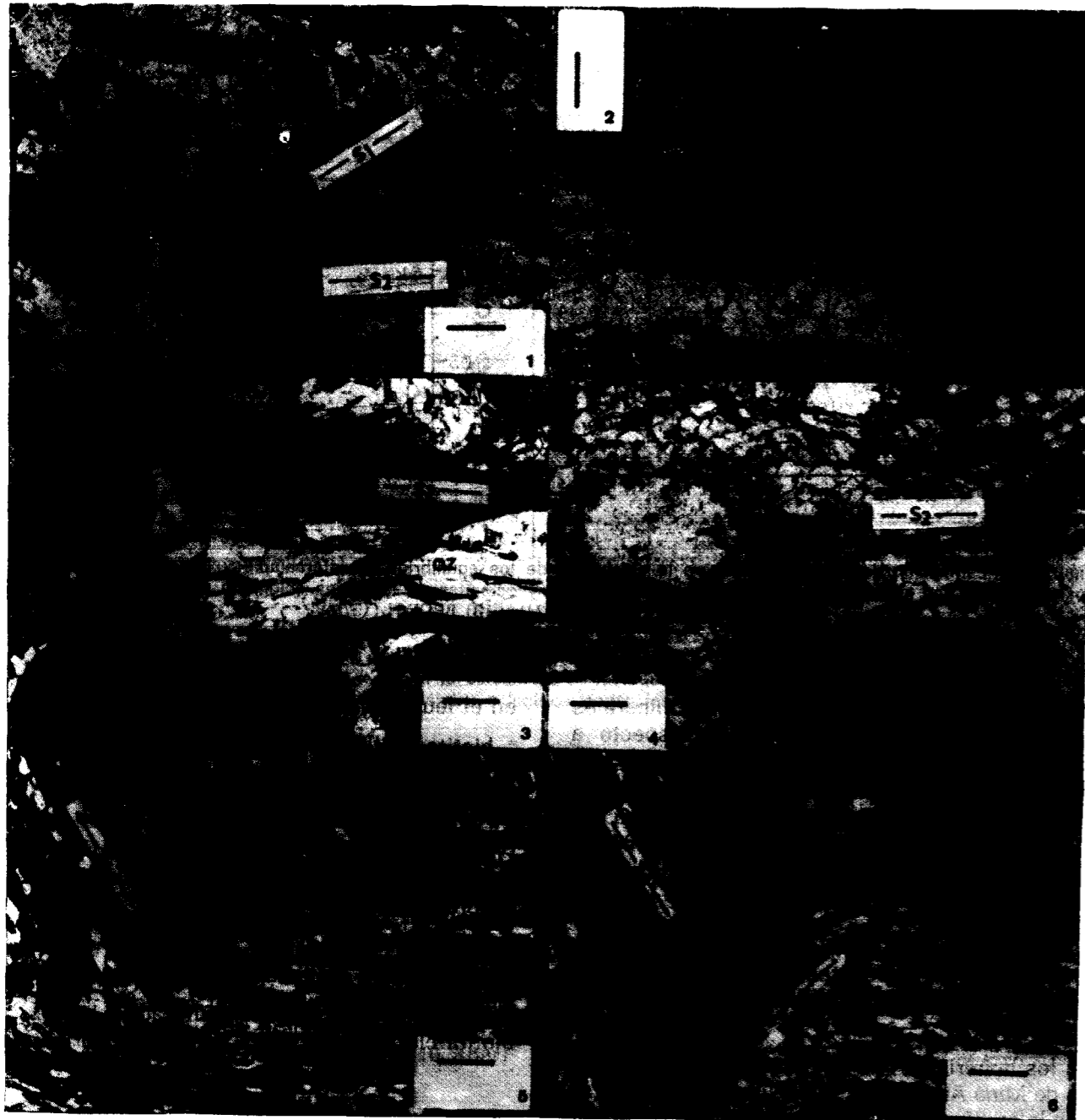
2.3.2. Asociaciones minerales de las metabasitas

Se pueden distinguir dos conjuntos de rocas metamórficas básicas intercaladas entre la Serie Negra: por un lado, la unidad de anfibolitas del Cuartel, un paquete de anfibolitas de 1 kilómetro de potencia máxima y varios kilómetros de



Ejemplos de asociaciones minerales observadas en los materiales metapelíticos (1 a 4) y metabásicos (5 y 6) de la Serie Negra. 1, 2, 3 y 4, asociaciones con granate-biotita-moscovita-cuarzo-feldspatos en esquistos y gneises, los granates aparecen deformados, corroídos o rotos como resultado de la deformación D_2 , conteniendo en algún caso inclusiones alineadas de grafito que definen la S_1 anterior a la S_2 que se observa en los cuatro casos; 5 y 6, asociaciones con granate-anfíbol-cuarzo-grafito en anfibolitas; en los granates se puede observar el paso gradual (5) o brusco (6) de la esquistosidad interna a la externa. Barras de escala: 0.2 mm. Nícoles paralelos.

LAMINA 5



Ejemplos de asociaciones minerales observadas en los materiales metapelíticos (1 a 4) y metabásicos (5 y 6) de la Serie Negra. 1, 2, 3 y 4, asociaciones con granate-biotita-moscovita-cuarzo-feldespatos en esquistos y gneises, los granates aparecen deformados, corroídos o rotos como resultado de la deformación D_2 , conteniendo en algún caso inclusiones alineadas de grafito que definen la S_1 anterior a la S_2 que se observa en los cuatro casos; 5 y 6, asociaciones con granate-anfibol-cuarzo-grafito en anfibolitas; en los granates se puede observar el paso gradual (5) o brusco (6) de la esquistosidad interna a la externa. Barras de escala: 0.2 mm. Nícoles paralelos.

extensión lateral; y por otro, una gran cantidad de niveles de anfibolitas - esquistos verdes de potencias y dimensiones mucho menores intercalados entre los materiales metapelíticos y grauvácicos de la Serie Negra.

— *Unidad de Anfibolitas del Cuartel*

En la unidad de anfibolitas del Cuartel las paragénesis observadas en anfibolitas (rocas de tamaño de grano medio a grueso con claro carácter ortoderivado) son, fundamentalmente:

hornblenda - plagioclasa - ilmenita
 hornblenda - plagioclasa - ilmenita - esfena \pm
 \pm rutilo
 hornblenda - plagioclasa - granate - ilmenita

y en hornblenditas (rocas ultramáficas):

hornblenda \pm plagioclasa \pm ilmenita

La epidota y los carbonatos que rellenan venas tardías son fases comunes que acompañan a las asociaciones anteriores en las rocas retromorfoseadas (dado que las anfibolitas de tamaño de grano medio a grueso están diversamente afectadas por deformaciones dúctiles, epidota, esfena y carbonatos intersticiales son más comunes en las anfibolitas deformadas).

Las rocas anfibólicas calcosilicatadas descritas en el capítulo dedicado a la petrografía son con gran probabilidad para anfibolitas afectadas por un metamorfismo de grado medio y, en consecuencia, con paragénesis similares a las descritas para las anfibolitas referidas más arriba:

hornblenda - plagioclasa - granate - esfena

Los esquistos verdes presentan asociaciones como:

hornblenda - actinolita - plagioclasa - epidota
 ilmenita/esfena

que son bastante parecidas a las de las anfibolitas comunes, de las que se diferencian por su reducido tamaño de grano resultado de procesos de deformación dúctil.

Las rocas ultramáficas retromorfoseadas en la facies de los esquistos verdes presentan asociaciones que incluyen exclusivamente:

clorita - serpentina - opacos (magnetita)

— *Intercalaciones de anfibolitas y esquistos verdes entre metapelitas*

Las metabasitas intercaladas entre los esquistos y grauvacas de la Serie Negra incluyen anfibolitas con granate-epidota y esquistos verdes. La asociación observada en anfibolitas con epidota y en los esquistos verdes:

actinolita - plagioclasa - epidota - clorita -
 cuarzo - opacos

presenta caracteres sintectónicos respecto a la esquistosidad general de segunda fase de estas rocas. Sin embargo, tal asociación ocupa espacios intercristalinos entre los porfiroclastos de otra asociación previa, de grado algo más elevado, a la que parece superponerse:

hornblenda - plagioclasa - zoisita - granate -
 opacos

2.3.3. **Química mineral de los materiales metapelíticos s.l.**

— *Granates* (tabla IX)

Los granates de las metapelitas de la Serie Negra, particularmente los de los esquistos biotíticos, son ricos en molécula de almandino (en torno a 72 por 100) y grosularia (alrededor de 10 por 100), siendo los contenidos de piropero y de espesartina del orden del 9 y 8 por 100, respectivamente. No presentan una zonación acusada (fig. 15); por el contrario, se trata de un ligero zonado progrado tal que los contenidos de piropero y espesartina aumentan suavemente hacia los bordes (desde 8.9 a 9.1 por 100 y de 7.8 a 8.5 por 100, respectivamente) y los de almandino y grosularia disminuyen (de 72.6 a 72.0 por 100 y de 10.6 a 10.4 por 100, respectivamente).

Los granates de los gneises que afloran en el domo de Mina Afortunada son más pobres en piropero (4.9-6.2 por 100), almandino (67-71 por 100) y grosularia (1.8-5.4 por 100) que los anteriores, y más ricos en espesartina (17.7-26.4 por 100). El zonado que presentan (fig. 15) es de tipo retrógrado, observándose una disminución en dirección hacia los bordes de los contenidos de piropero (de 6.2 a 4.9 por 100), almandino (de 70.6 a 66.8 por 100) y grosularia (de 5.4 a 1.8 por 100) y un aumento del contenido de espesartina (desde 17.7 hasta 26.5 por 100). Tanto las rela-

TABLA IX

Análisis (wt%) y fórmulas estructurales de granates de metapelitas de la Serie Negra (PSN-F y PSN-G) y del domo gneísico de Mina Afortunada (OMA-H, OMA-I y OMA-J).

Muestra	PSN-F	PSN-G	OMA-H	OMA-I	OMA-J
SiO ₂	37.39	37.12	37.04	37.39	37.31
TiO ₂	0.01	0.02	0.04	0.03	0.09
Al ₂ O ₃	21.53	21.32	21.32	21.65	21.28
FeOt	28.39	29.03	30.64	31.10	31.40
MnO	11.09	9.93	7.58	3.61	3.33
MgO	1.17	1.31	1.52	2.22	2.16
CaO	0.61	1.25	1.83	3.50	3.59
Cr ₂ O ₃	0.00	0.01	0.03	0.02	0.06
TOTAL	100.19	99.99	100.00	99.52	99.22
Fórmulas estructurales					
Si	2.879	3.010	3.000	3.022	3.029
Al	1.833	2.038	2.036	2.041	2.015
Ti	0.121	0.000	0.000	0.000	0.000
Cr	0.000	0.001	0.002	0.001	0.004
Fe ⁺⁺	1.920	1.969	2.076	2.080	2.109
Mn	0.723	0.682	0.520	0.245	0.227
Mg	0.134	0.158	0.183	0.265	0.259
Ca	0.050	0.109	0.159	0.300	0.309
Cr	0.000	0.001	0.002	0.001	0.004
O	12	12	12	12	12

ciones Fe/(Fe+Mg) como los contenidos absolutos de Fe y Mg de estos granates son más bajos que los de los granates de esquistos biotíticos. Se observa igualmente un zonado centro-borde de la relación anterior, relación que disminuye en dirección a los bordes en los granates de los ortogneises (de 0.92 a 0.84) y que aumenta en los granates de los esquistos biotíticos (de 0.925 a 0.934).

— *Biotitas* (tabla X)

Las composiciones de las biotitas de los esquistos biotíticos se proyectan en los campos de las biotitas s. str. de la clasificación de DEER et al. (1966), mostrando relaciones X_{Mg} bastante estables en torno a 0.47. Por sus contenidos en Al y en (Mg+Fe) estas micas se acercan más al miembro final siderofilita; en cambio, sus contenidos en Si las aproximan más al miembro final annita.

Las biotitas de los gneises, de manera paralela a lo que se observaba en los granates, presen-

tan relaciones X_{Mg} más altas que las anteriores y ligeramente más variables (de 0.48 a 0.53), proyectándose aproximadamente en la misma área que las biotitas de los esquistos biotíticos en el diagrama de clasificación de DEER et al. (1966).

Ambos tipos de biotitas muestran contenidos de Na y Ca despreciables ocupando las posiciones estructurales de índice de coordinación más elevado. Por su parte, los contenidos de Ti, relativamente importantes en ambos tipos de micas, son más elevados en las biotitas de los ortogneises.

— *Fengitas* (tabla XI)

Las micas blancas de los esquistos presentan menores contenidos en celadonita que las de los gneises (0.3 átomos de Fe+Mg por fórmula unidad en los esquistos frente a 0.5 en los ortogneises), son menos fengíticas, si bien sus contenidos en paragonita son mayores (0.21-0.34 átomos por fórmula unidad de Na en los primeros frente a 0.1 en los segundos). Los menores con-

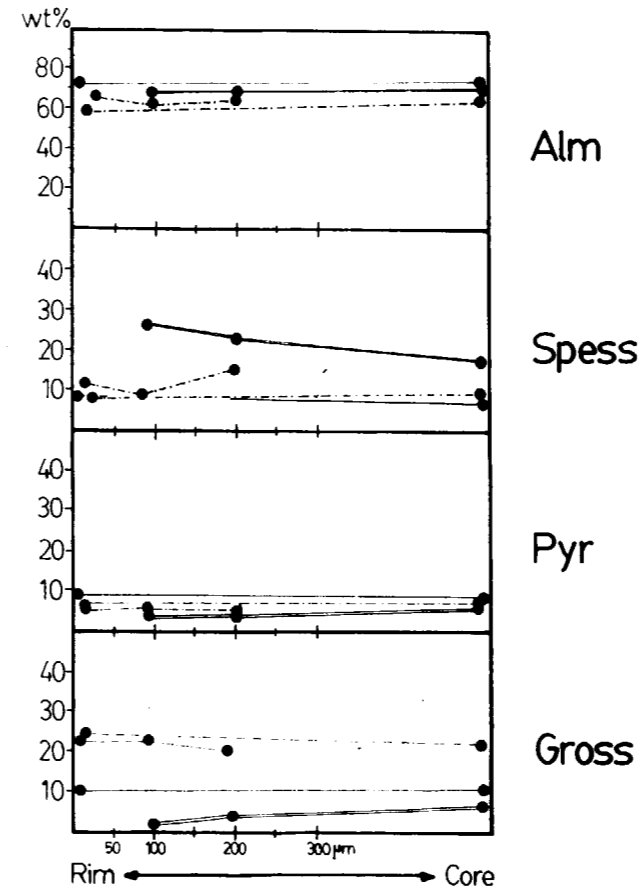


Figura 15.—Patrones de zonación centro (core)-borde (rim) en los granates de los diversos materiales de la Serie Negra. En trazo continuo granates de los esquistos biotíticos; con doble trazo continuo, granates del gneis de Mina Afortunada; con trazos a puntos y líneas discontinuas, zonaciones en las metabasitas intercaladas entre las meta-pelitas (perfil con tres análisis) y en las anfibolitas de la unidad del Cuartel (perfil de zonación con dos análisis).

tenidos de Al que presentan las fengitas de los ortogneises son explicables de manera paralela con sus mayores contenidos de celadonita como consecuencia de una mayor sustitución tschermakítica (Mg, Fe)^{VI}Si^{IV} - Al^{VI}Al^{IV}. Tradicionalmente, se han atribuido los mayores contenidos en celadonita de las micas fengíticas (refs. en MIYASHIRO y SHIDO, 1984) a condiciones de formación bajo presiones más elevadas y temperaturas más bajas. Esta correlación implica, además, un descenso progresivo del contenido de celadonita con el aumento de la temperatura que está de acuerdo, en nuestro caso, con la situa-

ción de las proyecciones de las micas de la Serie Negra en el diagrama Al₂O₃(wt%)-FeOt(wt%) en los campos correspondientes a las zonas de la estaurolita y de la sillimanita (fig. 16), mientras que en los gneises tienden a situarse hacia el campo de la zona del granate (indicativo de temperaturas más bajas). Estas observaciones parecen apoyar la idea de que las moscovitas de los gneises tienen un origen secundario a partir de una asociación de grado alto carente de tal mineral, como se observa en las migmatitas de las que derivan por procesos de deformación milonítica la mayor parte de los gneises con granate, biotita y fengita.

LOPEZ MUNGUIRA et al. (1988a) señalan que las micas blancas de la Serie Negra presentan dos valores distintos del espaciado b₀ en función de la litología: uno correspondiente a esquistos biotíticos (b₀=9.006 Å) y otro a pizarras y grauwacas (b₀=9.020 Å). De la misma manera, establecen que, en función del espaciado basal, el grado de paragonitización es bajo (d₍₀₀₁₀₎=1.9971 Å), siendo este parámetro función, principalmente, del grado de fengitización. Los valores anteriores significan, según los autores citados, que el gradiente metamórfico asociado a la Serie Negra sería de alta temperatura y/o baja presión.

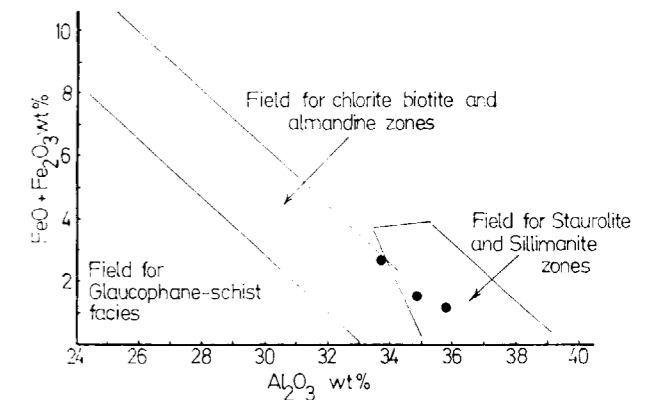


Figura 16.—Proyecciones en el diagrama de MIYASHIRO (1973) de las composiciones de las micas blancas de los esquistos de la Serie Negra y de los gneises del domo de Mina Afortunada.

— *Cloritas* (tabla XI)

Aparecen como minerales primarios en algunos esquistos de la Serie Negra y como producto de

TABLA X

Análisis (wt%) y fórmulas estructurales de biotitas en metapelitas (PSN-D, PSN-E, PSN-F y PSN-G) de la Serie Negra y del domo gneísico de Mina Afortunada (OMA-H, OMA-I, OMA-J y OMA-K).

Muestra	PSN-D	PSN-E	PSN-F	PSN-G	OMA-H	OMA-I	OMA-J	OMA-K
K ₂ O	8.39	8.55	5.28	8.10	7.63	7.17	6.80	6.67
CaO	0.10	0.00	0.28	0.26	0.72	0.32	0.39	0.37
TiO ₂	2.11	1.60	0.49	1.68	1.88	1.79	1.72	2.03
FeO _t	21.99	22.18	24.86	21.01	16.38	17.36	18.18	17.70
MnO	0.31	0.00	0.47	0.36	0.11	0.03	0.01	0.06
Na ₂ O	0.01	0.00	0.00	0.04	0.11	0.10	0.05	0.11
SiO ₂	35.79	34.76	31.40	36.77	37.66	36.65	36.10	35.76
Al ₂ O ₃	17.88	19.30	17.96	17.90	18.18	17.98	17.88	17.53
MgO	5.39	5.18	5.48	5.83	9.19	9.27	9.04	9.23
TOTAL	97.97	91.57	86.22	91.95	91.86	90.67	90.17	89.46
<i>Fórmulas estructurales</i>								
Si	5.816	5.746	5.598	5.895	5.769	5.745	5.736	5.705
Al	3.427	3.487	3.760	3.360	3.283	3.360	3.405	3.382
Ti	0.181	0.184	0.198	0.177	0.217	0.211	0.214	0.206
Fe ⁺⁺	2.238	2.278	2.456	2.195	2.098	2.147	2.307	2.316
Mn	0.042	0.000	0.000	0.000	0.014	0.004	0.001	0.008
Mg	2.017	2.053	2.213	1.978	2.098	2.166	2.195	2.149
Ca	0.066	0.067	0.073	0.064	0.118	0.053	0.054	0.055
Na	0.003	0.000	0.000	0.012	0.033	0.030	0.015	0.034
K	1.739	1.803	1.201	1.647	1.491	1.434	1.378	1.358
O	22	22	22	22	22	22	22	22

la retromorfosis de biotita y granate tanto en los esquistos biotíticos como en los gneises. El análisis que se presenta en la tabla XI se refiere a una clorita en asociación con biotita, fengita y granate en un esquisto biotítico. Composicionalmente, se trata de una variedad de turingita (corundofilita), una clorita oxidada más rica en Mg que en Fe en la que todo el Al aparece como Al^{IV}.

Sobre la base de sus contenidos totales de Al, Mg y Fe, LOPEZ MUNGUIRA et al. (1988b) señalan que el origen de estas cloritas es metamórfico, clasificándolas como términos intermedios entre chamosita y clinocloro (los análisis son realizados en este caso mediante espectrometría de dispersión de rayos X). Los valores correspondientes al espaciado b₀ de las cloritas de la Serie Negra, fuertemente dependientes de la temperatura de formación de las mismas, indican que ésta es relativamente elevada, al menos más elevada que la temperatura de formación de las cloritas de la Formación de Azuaga.

— Feldespatos (tabla XI)

Se han analizado únicamente en los gneises ortoderivados que afloran en el domo de Mina Afortunada. Las plagioclasas presentan composiciones de oligoclasas sódicas con muy poco feldespato potásico en solución sólida. Por su parte, los feldespatos potásicos presentan contenidos de plagioclasa en solución sólida en torno al 4 por 100, siendo esta componente más rica en Ca que en Na. Estas características indican probablemente una temperatura de formación o de reequilibrio composicional baja para estos minerales.

2.3.4. Química mineral de las metabasitas

— Anfíboles (tabla XII)

Los anfíboles analizados correspondientes a la unidad del Cuartel son anfíboles cálcicos con composición de hornblendas tschermakíticas y

TABLA XI

Análisis (wt%) y fórmulas estructurales de fengitas en el domo gneísico de Mina Afortunada (OMA-A) y en los esquistos de la Serie Negra (PSN-B y PSN-C); de una clorita en esquistos de la Serie Negra (PSN-D); y de plagioclasas y feldespato potásico del domo gneísico de Mina Afortunada (OMA-E, OMA-F y OMA-G, respectivamente).

Muestra	OMA-A	PSN-B	PSN-C	PSN-D	OMA-E	OMA-F	OMA-G
SiO ₂	47.60	47.14	46.18	23.92	63.87	64.67	64.33
Al ₂ O ₃	33.89	34.97	35.83	21.34	23.09	22.24	18.96
K ₂ O	10.58	8.05	8.21	0.00	0.16	0.18	15.82
Na ₂ O	0.04	0.85	1.34	0.00	8.97	9.21	0.86
CaO	0.00	0.02	0.00	0.03	3.83	3.58	0.00
FeO (t)	2.56	1.39	1.17	24.80	0.03	0.00	0.03
MgO	1.19	0.95	0.65	13.83	0.00	0.02	0.01
MnO	0.00	0.05	0.00	0.14	0.00	0.06	0.00
TiO ₂	0.21	0.36	0.32	0.05	0.05	0.05	0.00
TOTAL	96.07	93.78	93.70	84.11	100.00	100.01	100.01
<i>Fórmulas estructurales</i>							
Si	6.290	6.275	6.162	4.325	2.814	2.846	2.971
Ti	0.021	0.036	0.032	0.234	0.000	0.002	0.002
Al	5.279	5.488	5.637	3.833	1.175	1.117	1.175
Fe	0.283	0.155	0.131	2.625	0.005	0.005	0.005
Mg	0.234	0.188	0.129	2.436	0.001	0.000	0.000
Mn	0.000	0.006	0.000	0.008	0.000	0.002	0.000
Ca	0.000	0.003	0.000	0.062	0.087	0.087	0.091
Na	0.102	0.219	0.347	0.000	0.766	0.786	0.077
K	1.784	1.367	1.398	0.000	0.009	0.010	0.932
O	22	22	22	28	8	8	8

relaciones Mg/(Mg+Fe) en torno a 0.5. Las hornblendas marrones y los centros de algunas hornblendas verde-marrones son los anfíboles que presentan los mayores contenidos de Si, acercándose al campo en el que se proyectan las magnesio-hornblendas (fig. 17). Por el contrario, los anfíboles verdosos y los bordes de los anfíboles verde-marrones (hornblendas tschermakíticas o ferro-tschermakíticas) muestran menores contenidos en Si, observándose cierta tendencia en su quimismo hacia los campos composicionales de las tschermakitas o de las ferro-tschermakitas.

Las zonaciones de estos anfíboles no son marcadas. Vienen definidas por los mayores contenidos de Al^{IV}, Al^{VI}, Fe²⁺, Fe³⁺ y Ca hacia los bordes, mientras que Ti, Mg y Na son más abundantes hacia los centros. Los contenidos mayores de Ti en los centros podrían indicar temperaturas mayores de formación para ellos. Sin embargo, el decrecimiento de Si hacia los bordes y el au-

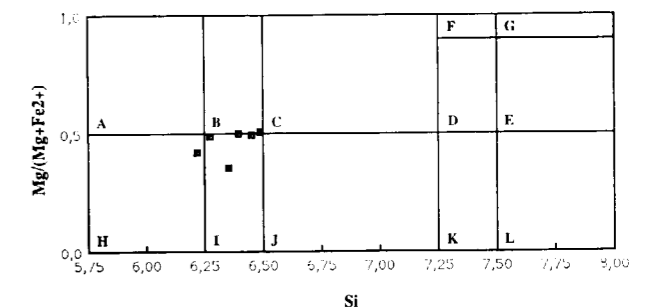


Figura 17.—Representación en el diagrama de LEAKE (1978) para anfíboles cálcicos [(Ca+Na)_A>1.34; Na_B<0.67; (Na+K)_A<0.50; Ti<0.50] de los anfíboles analizados en las anfíbolitas de la unidad del Cuartel y en las anfíbolitas intercaladas entre los materiales metapelíticos de la Serie Negra. Los campos composicionales correspondientes a las etiquetas A a L son los siguientes: A, tschermakita; B, hornblenda tschermakítica; C, magnesio-hornblenda; D, hornblenda actinolítica; E, actinolita; F, hornblenda tremolítica; G, tremolita; H, ferro-tschermakita; I, hornblenda ferro-tschermakítica; J, ferro-hornblenda; K, hornblenda ferro-actinolítica; L, ferro-actinolita.

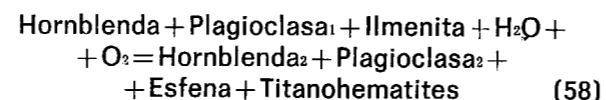
TABLA XII

Análisis (wt%) y fórmulas estructurales de anfíboles de la unidad de anfibolitas del Cuartel (AC-A, anfíbol marrón; AC-B y C, zonación centro-borde, respectivamente; AC-D, anfíbol verde) y de las anfibolitas de la Serie Negra (SN-E, anfíbol azulado; SN-F, anfíbol verde).

Muestra	AC-A	AC-B	AC-C	AC-D	SN-E	SN-F
SiO ₂	42.99	43.21	41.79	42.70	40.66	41.24
TiO ₂	1.91	1.80	0.72	0.49	0.00	0.49
Al ₂ O ₃	11.41	12.51	13.88	13.85	13.52	14.75
Cr ₂ O ₃	0.09	0.05	0.01	0.05	0.00	0.00
Fe ₂ O ₃	5.23	4.16	5.43	4.25	4.65	5.22
FeO	14.09	15.03	14.52	14.30	17.57	16.19
MnO	0.41	0.35	0.29	0.21	0.27	0.24
MgO	8.13	7.89	7.68	8.08	5.48	6.40
CaO	10.26	10.79	11.40	11.10	10.66	10.84
Na ₂ O	1.88	1.71	1.57	1.78	1.69	1.90
K ₂ O	0.45	0.41	0.53	0.49	0.86	0.92
FeO(t)	18.80	18.77	19.41	18.13	21.75	20.88
TOTAL	96.85	97.91	97.82	97.30	95.36	98.19
<i>Fórmulas estructurales</i>						
Si(T ₁)	2.488	2.449	2.272	2.395	2.355	2.220
Al(IV T ₁)	1.512	1.551	1.728	1.606	1.645	1.780
Si(T ₂)	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000
Al(VI M ₂)	0.518	0.650	0.727	0.838	0.845	0.842
Ti(M ₂)	0.217	0.202	0.081	0.055	0.000	0.056
Fe ₃ (M ₂)	0.549	0.467	0.614	0.479	0.547	0.592
Mg(M ₂)	0.363	0.299	0.280	0.315	0.217	0.211
Fe ₂ (M ₂)	0.353	0.382	0.298	0.313	0.391	0.299
Mg(M ₁ M ₃)	1.466	1.456	1.438	1.488	1.060	1.280
Fe ₂ (M ₁ M ₃)	1.426	1.493	1.524	1.478	1.905	1.743
Mn(M ₄)	0.052	0.044	0.037	0.027	0.036	0.031
Ca(M ₄)	1.659	1.725	1.833	1.781	1.855	1.752
Na(M ₄)	0.341	0.275	0.167	0.219	0.215	0.248
Na(A)	0.209	0.220	0.290	0.298	0.297	0.307
K(A)	0.087	0.078	0.101	0.094	0.171	0.177
Vacanc.(A)	0.704	0.702	0.609	0.608	0.532	0.516
O	24	24	24	24	24	24

mento de Al^{IV} en la misma dirección parecen indicar que son los bordes los que recrystalizaron bajo temperaturas relativamente mayores. Es muy probable que los cambios de las condiciones P-T evidenciados por los zonados composicionales estén acompañados por un incremento de la presión de fluidos (indicado por el aumento de Al^{VI}, Fe(t) y decrecimiento de Si) y de la fugacidad del O₂ durante su cristalización (SPEAR, 1981b).

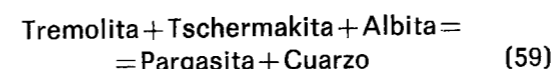
Es probable que estos cambios estén relacionados con la verificación de la reacción:



que se da cuando aumentan las fugacidades o presiones parciales de H₂O y O₂ y en la que la hornblenda producto de reacción es más pobre en Ti que la hornblenda reactante y presenta menores contenidos en el miembro final pargasita.

Los anfíboles verdes de las anfibolitas intercaladas entre metapelitas presentan composiciones de ferro-tschermakitas, mientras que los anfíboles verde-azulados son hornblendas ferro-

tschermakíticas (fig. 17). Sus contenidos en Al^{IV}, Al^{VI}, Fe³⁺, Mg y Ti son menores que en los anfíboles de la unidad del Cuartel, mientras que Fe²⁺ y Ca son mayores y K, Na(A) y Na(M4) son similares. A pesar de que se trata de anfíboles cálcicos, éstos presentan composiciones cercanas a las de las hornblendas ferro-pargasíticas o ferro-pargasitas, lo que probablemente evidencia cierto control de la composición de la roca total (más pobre en sílice que las anfibolitas de la unidad del Cuartel) sobre la composición de los anfíboles, verificándose de izquierda a derecha la reacción (SPEAR, 1981a):



Cambios composicionales de este tipo se han citado en la literatura como resultado de procesos de deformación dúctil en zonas de cizalla (BRODIE, 1981).

Según puede deducirse de sus características composicionales, los anfíboles verde-azulados (más ricos en Si y más pobres en Ti y Al^{IV}) se han formado a temperaturas ligeramente más bajas que los anfíboles verdes bajo condiciones de presión parcial de fluidos similares o ligeramente más elevadas.

En comparación con las anfibolitas de la unidad del Cuartel, las anfibolitas de intercalaciones entre las metapelitas s.l. de la Serie Negra debieron recrystalizar bajo condiciones similares de T, si bien sus orígenes pueden ser distintos. Siguiendo a RAASE (1974), en función de sus contenidos de Ti las anfibolitas de la unidad del Cuartel corresponderían más bien a la facies de las anfibolitas de temperaturas intermedias, mientras que las intercaladas entre la Serie Negra serían de la parte de T medias-bajas de la facies de las anfibolitas o de la parte de alta T de la facies de los esquistos verdes.

— Granates (tabla XIII)

Los granates de las anfibolitas de la unidad del Cuartel son granates almandínicos (58-62 por 100 de molécula de almandino), ricos en grosularia (22-25 por 100) y espesartina (9-11 por 100) y pobres en piropo (6-7 por 100). Se trata de granates zonados (fig. 15) con núcleos más ricos en

almandino y piropo (62.5 y 7.0 por 100, respectivamente) y más pobres en espesartina (8.7 por 100) y grosularia (21.3 por 100) que los bordes (58.1, 6.2, 10.9 y 24.7 por 100, en cada uno de los cuatro miembros finales, respectivamente). Por estas características resulta evidente que se trata de granates cálcicos y que su zonación es debida a reajustes composicionales durante una etapa de enfriamiento (menores contenidos en Mg hacia los bordes).

Los granates de las anfibolitas de la Serie Negra presentan una zonación más acusada que los anteriores. Sus núcleos son algo más pobres en almandino (60.5 por 100), piropo (5.6 por 100) y grosularia (19.9 por 100), y la evolución de los contenidos de Mg desde el centro hacia sus bordes, aunque tenue (variación del contenido de piropo de 5.6 a 6.1 por 100), evidencia una reequilibración en el curso de una evolución metamórfica progradada. Esta zonación está acompañada de un incremento de los contenidos de almandino y grosularia y una disminución de la espesartina hacia los bordes (alcanzando valores de 64.5, 22.2 y 7.2 por 100, respectivamente). En cuanto a sus contenidos en Ca, los granates de las anfibolitas de la Serie Negra son totalmente comparables a los de las anfibolitas de la unidad del Cuartel. No obstante, sus menores contenidos en piropo permiten inferir que su formación tuvo lugar bajo condiciones de temperatura ligeramente más bajas que la T de formación de los granates del segundo tipo.

— Biotitas (tabla XIV)

Aunque en los dos tipos de anfibolitas que se estudian aquí existen asociaciones con biotita, solamente se dispone de análisis de las biotitas de anfibolitas intercaladas entre metapelitas. Estas biotitas presentan relaciones X_{Mg} variables entre 0.62 y 0.87. Sus contenidos en Al relativamente elevados hacen que se proyecten próximas al miembro final siderofilita en el diagrama de DEER et al. (1966). Sus contenidos en Ti son relativamente elevados (0.2 átomos por fórmula unidad), y probablemente están relacionados con la cantidad de óxidos de Fe-Ti presentes en la asociación, mientras que los de Mn, Ca y Na son muy bajos.

TABLA XIII

Análisis (wt%) y fórmulas estructurales de granates en anfíbolitas de la unidad de anfíbolitas del Cuartel (UAC-A y UAC-B) y de la Serie Negra (ASN-C, ASN-D y ASN-E).

Muestra	UAC-A	UAC-B	ASN-C	ASN-D	ASN-E
SiO ₂	37.99	37.90	37.46	37.40	35.91
TiO ₂	0.00	0.17	0.15	0.16	0.11
Al ₂ O ₃	21.02	21.26	21.18	20.92	20.86
Fe ₂ O ₃	0.44	0.02	0.00	0.26	1.43
FeOt	25.59	27.95	28.76	27.73	26.60
MnO	4.83	3.84	3.17	3.96	6.40
MgO	1.56	1.77	1.54	1.55	1.45
CaO	8.60	7.57	7.74	7.99	7.18
Cr ₂ O ₃	0.00	0.09	0.00	0.05	0.04
TOTAL	100.03	100.57	100.00	100.02	100.00
<i>Fórmulas estructurales</i>					
Si	3.029	3.012	2.998	2.998	2.921
Al	1.976	1.983	1.977	1.975	1.922
Ti	0.000	0.000	0.020	0.020	0.079
Cr	0.000	0.060	0.000	0.003	0.002
Fe ⁺⁺⁺	0.027	0.010	0.000	0.016	0.087
Fe ⁺⁺	1.705	1.854	1.925	1.858	1.803
Mn	0.326	0.259	0.215	0.269	0.441
Mg	0.185	0.210	0.184	0.185	0.176
Ca	0.735	0.645	0.664	0.686	0.626
Cr	0.000	0.006	0.000	0.003	0.002
O	12	12	12	12	12

— Plagioclasas (tabla XIV)

En la unidad de anfíbolitas del Cuartel las plagioclasas presentan composiciones de oligoclasas (An₁₈), mientras que en el segundo tipo de anfíbolitas éstas son más ricas en albita (Ab₉₁An₉), tratándose de albitas cálcicas. A pesar de estas características generales, en las variedades hornblendíticas de la unidad del Cuartel las plagioclasas presentan composiciones determinadas por métodos ópticos de composición an-desina.

Dado que parece deducirse de las características composicionales de los anfíboles cierta escasez de sílice en las anfíbolitas intercaladas entre metapelitas s.l. de la Serie Negra, cabría esperar una mayor basicidad de las plagioclasas en ellas. Sin embargo, se observa lo contrario, de manera que este hecho podría sugerir (según establece BRODIE, 1981) que las plagioclasas se han re-equilibrado composicionalmente con los anfíboles durante un proceso de deformación dúctil,

operándose una variación composicional de las plagioclasas hacia términos más ricos en anortita.

2.3.5. Reacciones y evolución metamórfica de los materiales pelíticos s.l.

Las reacciones responsables de la aparición de las asociaciones con fengita, biotita y granate, ampliamente representadas entre los esquistos biotíticos de la Serie Negra, y de las asociaciones encontradas en los materiales grauváquicos, se pueden considerar prácticamente iguales a las reacciones discutidas en un apartado anterior para explicar la aparición sucesiva de la biotita [reacciones (1), (2), (3), (4), (5) y (6)] y del granate [reacciones (7), (8), (9), (10), (11), (12), (13), (14) y (15)] en los esquistos de la Fm. Atalaya. Cabe señalar, no obstante, la ausencia entre estos materiales de minerales índice de metamorfismo como cloritoide, estauroлита o silicatos de

TABLA XIV

Análisis (wt%) y fórmulas estructurales de biotitas en metabasitas (ASN-A, ASN-B y ASN-C) de la Serie Negra y de plagioclasas de anfíbolitas de la unidad de anfíbolitas del Cuartel e intercaladas en la Serie Negra (UAC-H y ASN-I, respectivamente).

Muestra	ASN-A	ASN-B	ASN-C	Muestra	UAC-H	ASN-I
K ₂ O	7.09	6.56	7.86	SiO ₂	65.25	65.94
CaO	0.37	0.38	0.27	Al ₂ O ₃	22.62	21.53
TiO ₂	1.59	1.66	1.48	K ₂ O	0.15	0.04
FeOt	18.24	16.47	18.98	CaO	8.40	10.18
MnO	0.10	0.04	0.10	CaO	3.47	1.84
Na ₂ O	0.00	0.00	0.06	FeO (t)	0.06	0.13
SiO ₂	35.93	39.33	37.46	MgO	0.00	0.02
Al ₂ O ₃	17.09	17.89	16.48	MnO	0.00	0.00
MgO	8.89	6.53	8.33	TiO ₂	0.05	0.00
TOTAL	89.30	88.86	91.02	TOTAL	100.00	99.68
<i>Fórmulas estructurales</i>				<i>Fórmulas estructurales</i>		
Si	5.729	6.076	5.912	Si	2.859	2.900
Al	3.212	3.113	3.180	Ti	0.002	0.000
Ti	0.191	0.193	0.197	Al	1.168	1.173
Fe ⁺⁺	2.432	2.357	2.174	Fe	0.002	0.002
Mn	0.014	0.005	0.013	Mg	0.000	0.001
Mg	2.112	1.503	1.536	Mn	0.000	0.000
Ca	0.063	0.063	0.064	Ca	0.163	0.087
Na	0.000	0.000	0.018	Na	0.714	0.868
K	1.442	1.293	1.583	K	0.008	0.002
O	22	22	22	O	8	8

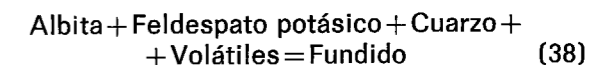
aluminio, minerales que están también ausentes como norma general en otros afloramientos de la Serie Negra en otras áreas de la Zona de Ossa-Morena (cf. EGUILUZ, 1988).

En los materiales gneísicos que ocupan el núcleo del domo de Mina Afortunada se alcanzan condiciones de metamorfismo de grado alto que dan lugar a la aparición de interesantes procesos de anatexia. El tránsito a este núcleo metamórfico desde la sucesión de esquistos biotíticos es brusco, tratándose de un límite neto entre materiales pelíticos con metamorfismo de grado medio y gneises migmatíticos y ortogneises intensamente retromorfosados y deformados.

Las asociaciones observadas en los ortogneises y las migmatitas deformadas no presentan cordierita y sí, por el contrario, granate (muy escaso) en asociación con sillimanita, cuyas características texturales parecen sugerir su origen pseudomórfico a partir de cristales o masas de cianita. La anatexia muestra un claro carácter

pre- a sin-tectónico respecto a una primera fase D₁ de deformación dúctil a altas temperaturas y claramente pre-tectónico respecto a la deformación D₂ responsable de la ortogneisificación.

La anatexia ocurrió probablemente a presiones superiores a 6 Kbar al ser superado por el sistema metamórfico en el espacio P-T el lugar geométrico correspondiente a la banda de fusión de los sistemas graníticos en condiciones de presión parcial de agua próxima o igual a la presión total, de forma que tendríamos:

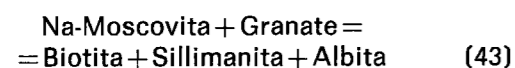


Dado que bajo tales condiciones la curva de fusión de sistemas graníticos se sitúa a temperaturas más bajas que las correspondientes a la deshidratación de moscovita y biotita, es posible que la fusión parcial fuese escasa en virtud de la reacción anterior (POWELL, 1983; THOMPSON, 1983). Las únicas posibilidades que caben son las

indicadas en la discusión sobre la anatexia de los gneises de la lámina blastomilonítica de gneises migmáticos y de los gneises milonita de Higuera de Llerena. La fusión parcial se realimenta mediante la liberación de agua de deshidratación, y se genera además silicato aluminico (sillimanita), dentro de la zona de moscovita-sillimanita (THOMPSON y ALGOR, 1977; THOMPSON y TRACY, 1979; GRANT, 1985).

Es muy probable que el aumento de temperatura que se requiere para la verificación de las reacciones (39), (40), (41) y (42) haya ido acompañado de un descenso de la presión que permitiría la transformación polimórfica de cianita en sillimanita y que el silicato aluminico generado en las reacciones indicadas sea igualmente sillimanita. Este último mineral es más bien escaso entre las migmatitas. Sin embargo, su ausencia se puede explicar por procesos de retromorfosis que la transforman en las masas o porfirocristales de moscovita secundaria que se observan con gran frecuencia.

El posible granate existente durante el clímax metamórfico se desestabiliza en el curso de la evolución retrógrada subsiguiente originando las texturas observadas de granates corroídos. La desestabilización empieza en la zona de la moscovita-sillimanita debido a la reacción:

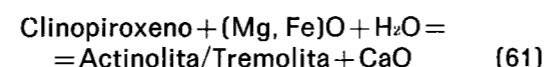
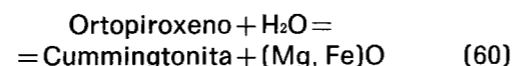


La retromorfosis a la que se está aludiendo, en su máxima intensidad, va acompañando el desarrollo de una fase de deformación a temperaturas intermedias-bajas que es responsable de la aparición de una foliación gneísica posterior a la foliación o bandeado composicional migmático («kinematic retrogression» de CORBET y PHILLIPS, 1981). Este proceso facilita la entrada en el sistema de una fase fluida rica en agua a presión similar a la presión total, pero a temperaturas inferiores. Este influjo se puede considerar responsable de la sustitución total de los silicatos aluminicos por placas de moscovita, de la cloritización de biotitas y granates y de la sericitización de los feldespatos en virtud de reacciones inversas a las que determinan su aparición en el curso del metamorfismo progresivo.

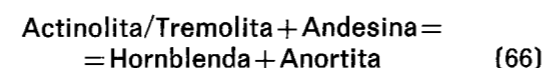
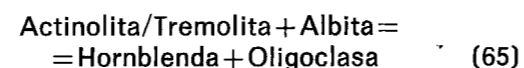
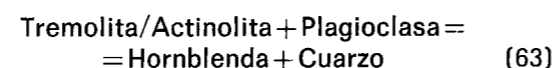
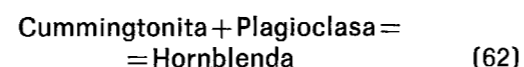
2.3.6. Reacciones y evolución metamórfica de las metabasitas

Las reacciones metamórficas que han podido dar lugar a las asociaciones observadas entre las anfíbolitas, hornblenditas y serpentinitas de la unidad de anfíbolitas del Cuartel se inscriben en procesos de anfíbolitización de gabros o de rocas ígneas básicas semejantes. Tales procesos de anfíbolitización están probablemente inducidos por el influjo de una fase fluida rica en agua desde las rocas de caja metapelíticas.

Siguiendo las propuestas de MONGKOLTIP y ASHWORTH (1986), el proceso de anfíbolitización habría consumido totalmente el clinopiroxeno y el posible ortopiroxeno existentes en la roca gabroica original. Las reacciones capaces de explicar tales procesos son:



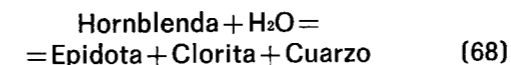
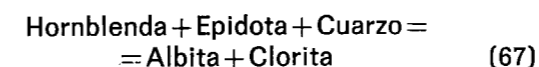
Los términos finales composicionales de los anfíboles así formados, cummingtonita, actinolita y tremolita, son productos intermedios y reaccionan inmediatamente, para dar hornblenda, de acuerdo con (SPEAR, 1981a):



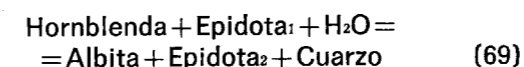
Dada la escasa cantidad de cuarzo que se puede encontrar en estas rocas, es muy probable que reacciones como (65) y (66) hayan tenido gran amplitud, de modo que el producto final más frecuente resulta ser una asociación con hornblenda y algo de plagioclasa. El componente edenítico que se forma en la reacción (64) pasaría en este esquema a formar parte de la composición de las hornblendas en solución sólida.

La formación de granate en las metabasitas de apariencia ortoderivada se da en un estadio avanzado de la anfíbolitización, puesto que, tal y como parece deducirse de las relaciones texturales, crece una vez que estas rocas están formadas por hornblenda y plagioclasa. La reacción de fases con Mg y Ca con el componente albítico de las plagioclasas da lugar a la aparición de un granate cálcico en asociación con anfíbol tschermakítico, plagioclasa más cálcica y cuarzo (THOMPSON et al., 1982). Los granates de las para-anfíbolitas podrían haberse generado por procesos comparables.

La retromorfosis comúnmente observada de la paragénesis anfíbolítica se puede considerar que tiene lugar en dos estadios. En primer lugar, la asociación hornblenda-plagioclasa se retrograda a albita-zoisita-hornblenda, creando una asociación típica de la facies de las anfíbolitas de baja T. A continuación, esta asociación es modificada como consecuencia de la verificación de las reacciones:



El efecto neto de estas dos reacciones se puede establecer en:

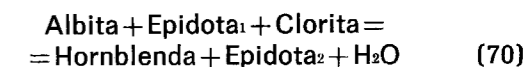


que concuerda perfectamente con las observaciones petrográficas de la existencia de epidota secundaria (pistacita) y clorita en las asociaciones que retromorfosean a las paragénesis con hornblenda y zoisita. La reacción neta (69) precisa una adición de H₂O desde el exterior del sistema. La circulación y adición al sistema de este componente fundamental es difícil cuando se trata de rocas metamórficas o ígneas masivas y relativamente anhidras. Sin embargo, el amplio desarrollo de zonas de cizalla de todas las escalas en la unidad de anfíbolitas del Cuartel favorece tal circulación y se puede considerar como el principal factor desencadenante de la retromorfosis.

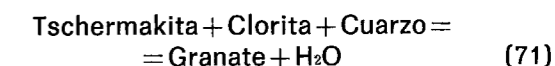
La alteración retrógrada de las rocas ultramáficas (hornblendas) asociadas a esta unidad se explica también como resultado de la llegada de cantidades significativas de H₂O y quizá también

de CO₂ capaces de reaccionar con los diversos componentes existentes en solución sólida en los anfíboles para dar lugar a la formación de agregados clorítico-serpentiníticos más o menos complejos.

En las anfíbolitas intercaladas entre los esquistos y grauvacas de la Serie Negra las asociaciones anfíbolíticas con granate y epidota son las que representan un metamorfismo más elevado. En estas rocas, en las que no se han conservado evidencias claras de su posible origen ortoderivado, las relaciones metamorfismo-deformación que se deducen de la blastesis de algunos minerales como el granate, indican que se trata de un metamorfismo progrado. Por ello la asociación de granate y epidota podría ser debida a reacciones de deshidratación progresiva como:



que es la reacción inversa de (69), acompañada de (65) y (66) y de la formación de granate según la reacción inversa de (45):



La retromorfosis de la asociación de grado medio debe ser nuevamente atribuida a un aporte de agua desde el exterior del sistema, desde el encajante metapelítico. Las menores dimensiones (potencia y extensión lateral) de estas bandas de anfíbolitas en comparación con las dimensiones de la unidad de anfíbolitas del Cuartel permiten explicar con facilidad que la transición de las mismas hacia esquistos verdes haya sido más importante y extendida. Las reacciones de hidratación asociadas a este proceso son análogas a las ya discutidas (52), (53) y (55), acompañadas de reacciones características de la facies con granate y clorita como (45). Esta última es mucho más efectiva que las tres citadas en primer lugar a la hora de absorber cantidades importantes de H₂O y permite la entrada del miembro final tschermakítico en la composición de los anfíboles actinolíticos propios de estas condiciones de metamorfismo.

2.3.7. Condiciones presión-temperatura del metamorfismo

Del análisis petrográfico se puede deducir la

existencia de un metamorfismo que alcanza la anatexia en rocas pelíticas en la serie de facies de cianita/sillimanita. Tal clímax metamórfico, previo a una fase de deformación dúctil a alta temperatura, habría ocurrido en base a las asociaciones observadas a 650° C y 6-8 Kbar. Las migmatitas y rocas graníticas que se generan son retromorfoseadas y cizalladas durante una etapa posterior que da lugar a una esquistosidad generalizada.

El primer hecho a destacar en relación con este episodio es la existencia de una evolución retrógrada recogida en los equilibrios composicionales granate-fengita y granate-biotita (fig. 18). Los valores de T calculados con las composiciones de los centros de los granates (380-450° C) son

unos 40-50° C más elevados que los obtenidos utilizando las composiciones de los bordes en el par granate-fengita.

El geotermómetro granate-biotita aplicado a las asociaciones de los gneises aflorantes en el núcleo del domo de Mina Afortunada presenta resultados similares (460-520° C con los centros de los granates y 390-450° C con los bordes). Si se representan los campos delimitados por los límites máximo y mínimo de Kd obtenidos mediante las diversas calibraciones geotermométricas a diferentes presiones (fig. 18), se observa que, en su conjunto, los centros de los granates se estabilizaron a temperaturas ligeramente más altas (490±30° C) que los bordes (450±50° C) para el intervalo de presiones de 1 a 10 Kbar.

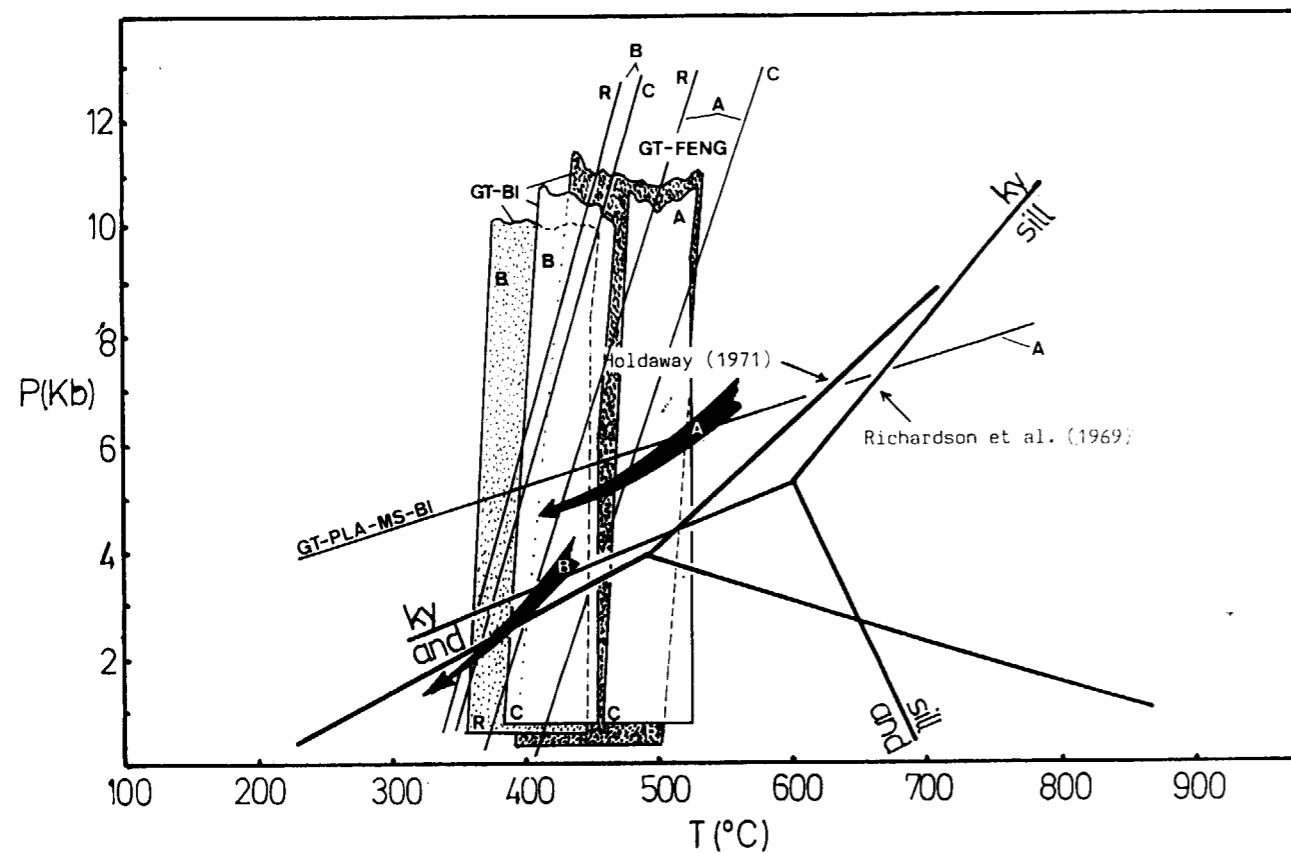


Figura 18.—Diagrama P-T en el que se representan las condiciones y campos de estabilidad de las diferentes asociaciones con granate (C, centros de granates; R, bordes de granates) observadas en los esquistos biotíticos (B) que constituyen el término general de la Serie Negra y en los gneises que afloran en el domo de Mina Afortunada (A). Los campos delimitados lo han sido con los geotermómetros granate-biotita (Gt-Bi) y granate-fengita (Gt-Feng) y con el geobarómetro que implica a la asociación granate-plagioclasa-moscovita-biotita. Las flechas representan los recorridos probables de estas rocas en el espacio P-T.

A presiones de 5-6 Kbar las temperaturas calculadas con el par granate-fengita para los gneises son de 420-470° C. Los resultados obtenidos de la geotermometría de dos feldespatos siguiendo las formulaciones de STORMER (1975) y de STORMER y WITHNEY (1977) arrojan valores de T de 355° C en el primer caso y de 400° C en el segundo, independientemente de los valores de la presión. Estos valores son, con toda probabilidad, irreales, y no se han considerado. La asociación retrometamórfica granate-moscovita-biotita-plagioclasa se ha utilizado para calcular la presión, que resulta ser del orden de 6.1 Kbar a 500° C para la estabilidad de los núcleos de los granates del gneis de Mina Afortunada y de 5.3 a 5.7 Kbar a temperaturas de 400-450° C (fig. 18).

En los esquistos biotíticos las temperaturas que resultan al utilizar las composiciones de los centros de los granates con biotita son 30-40° C más elevadas que las de los bordes. Las temperaturas obtenidas con el geotermómetro granate-fengita son de 380-400° C. Estos valores de temperatura son más bajos que los obtenidos con el geotermómetro granate-biotita para el mismo intervalo de presiones. En los esquistos biotíticos no se ha utilizado geobarómetro alguno, por lo que no se dispone de resultados. No obstante, las intersecciones entre las rectas correspondientes a los equilibrios granate-biotita y granate-fengita indican que las presiones correspondientes a los núcleos de los granates son del orden de 4±0.5 Kbar y de 2-3 Kbar para los bordes. Estos resultados están en la línea de los resultados cualitativos deducidos anteriormente de las características composicionales de las fengitas, más celadónicas en el gneis de Mina Afortunada que en los esquistos biotíticos y, por tanto, formadas a presiones algo más elevadas.

En las anfibolitas de la unidad del Cuartel el zonado observado en los granates indica condiciones de estabilidad de los bordes a mayores temperaturas que los centros. El par granate-hornblenda arroja valores de temperatura de 480-490° C para los centros y ligeramente superiores para los bordes (fig. 19). Las condiciones de equilibrio calculadas para el par hornblenda-plagioclasa calculadas mediante los métodos gráficos de SPEAR (1980, 1981a) y de BROWN (1974) y RAASE (1974) son de 490±20° C a 530±20° C de temperatura (fig. 20), y en torno a 5 Kbar de presión (fig. 21), al tratarse de anfíboles que han

cristalizado bajo presiones más bien bajas. Las temperaturas correspondientes a estas presiones según se deduce de la calibración del equilibrio Tremolita + Albita = Edenita + Cuarzo de HOLLAND y RICHARDSON (1979) son de 400-450° C, mientras que las presiones resultantes al utilizar la reacción Tremolita + Albita + Clorita = Glaucófana + Zoisita + Cuarzo son de 5-7 Kbar para el intervalo de temperaturas calculado gráficamente. Todos estos cálculos se han realizado suponiendo que la presión parcial de H₂O es igual a la presión total, efecto éste que tiende a rebajar los resultados para las presiones a las que se estabilizan las asociaciones citadas (fig. 22). La intersección de las dos reacciones que se acaban de indicar resulta en unas condiciones P-T de estabilidad irreales de 350-400° C a 7-8 Kbar (presiones demasiado altas para temperaturas bajas). No obstante lo anterior, y a pesar del carácter irreal de estos resultados, los trenes de evolución que resultan de considerar las composiciones de los centros y los bordes de los anfíboles zonados parecen indicar un descenso de las temperaturas y de las presiones en la dirección centro-borde.

En las anfibolitas de la Serie Negra el clímax metamórfico se ha conservado en el par granate-hornblenda, con el que se han podido calcular temperaturas máximas en torno a 620° C. No obstante, el zonado de los granates permite seguir una evolución aparente de las temperaturas desde las propias de la asociación en equilibrio con los centros de los granates (520° C) hasta las correspondientes a los bordes (525° C), pasando por máximos intermedios que superan los 600° C (fig. 23).

Las condiciones de equilibrio calculadas para el par hornblenda-plagioclasa mediante las técnicas indicadas más arriba (figs. 20 y 21) son de 450-490° C y alrededor de 4-5 Kbar, respectivamente. Para el rango de temperaturas indicado las presiones que resultan al utilizar las reacciones calibradas por HOLLAND y RICHARDSON (1979) son de 4.5-5 Kbar, mientras que las temperaturas correspondientes, según se deduce de la calibración del equilibrio Tremolita + Albita = Edenita + Cuarzo, son de 450-500° C. Las condiciones P-T resultantes de considerar únicamente la composición de los anfíboles son, no obstante, algo diferentes, 440-460° C y 5.0-5.5 Kbar. El geotermómetro granate-biotita aplicado a estas mismas

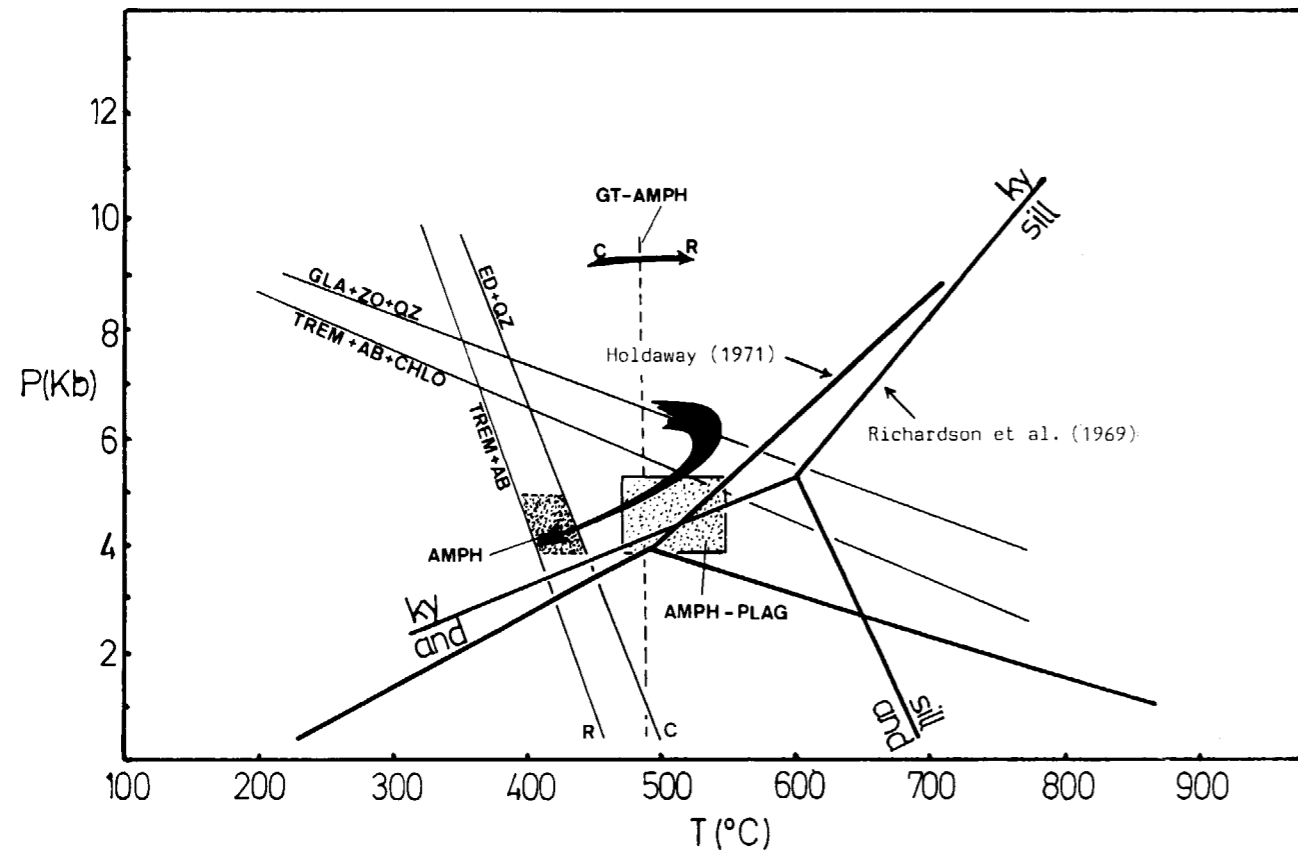


Figura 19.—Diagrama P-T en el que se representan las condiciones y campos de estabilidad de las diferentes asociaciones observadas en las anfibolitas de la unidad del Cuartel. Los campos delimitados lo han sido con el geotermómetro granate-hornblenda (Gt-Amph; C, centros de los granates; R, bordes de los granates), los geotermómetros y geobarómetros gráficos (campo etiquetado Amph-Plag) de SPEAR (1980, 1981a), BROWN (1974) y RAASE (1974) y con los equilibrios (reacciones Trem+Ab=Ed+Qz y Trem+Ab+Chlo=Gla+Zo+Qz; C, composiciones de los centros de anfíboles zonados, y B, bordes de los mismos) calibrados por HOLLAND y RICHARDSON 1979). La flecha representa el recorrido probable de estas rocas en el espacio P-T.

rocas arroja temperaturas de 500-550° C para las composiciones de los centros de los granates y de 510-560° C para los bordes, evidenciando una pauta de evolución progradada.

3. METAMORFISMO DE LOS MATERIALES PALEOZOICOS AL N DE LA FALLA DE HORNACHOS

En el área situada al N de la falla de Hornachos los materiales del Paleozoico Inferior aflorantes aparecen afectados por un metamorfismo regional de grado bajo y muy bajo. Las secuencias

cuarcíticas de la base del Ordovícico (cuarcitas de la Sierra de Hornachos) presentan una recristalización de los granos detríticos de cuarzo acompañando al desarrollo de la esquistosidad. Las series terrígenas del Ordovícico Inferior presentan asociaciones con mica fengítica y/o clorita-biotita verdosa, o simplemente cierta recristalización metamórfica de la mica blanca. Las alternancias areniscoso-pelíticas del Ordovícico Medio presentan asociaciones como fengita-clorita-biotita características del grado muy bajo.

Las series infrayacentes a los materiales paleozoicos, correlacionables con la Serie Negra, presentan paragénesis como las descritas en el párrafo anterior. No obstante, localmente aparecen

facies esquistosas con granate e incluso gneises, indicando un grado de metamorfismo que alcanza la parte de alta temperatura del grado bajo como mínimo.

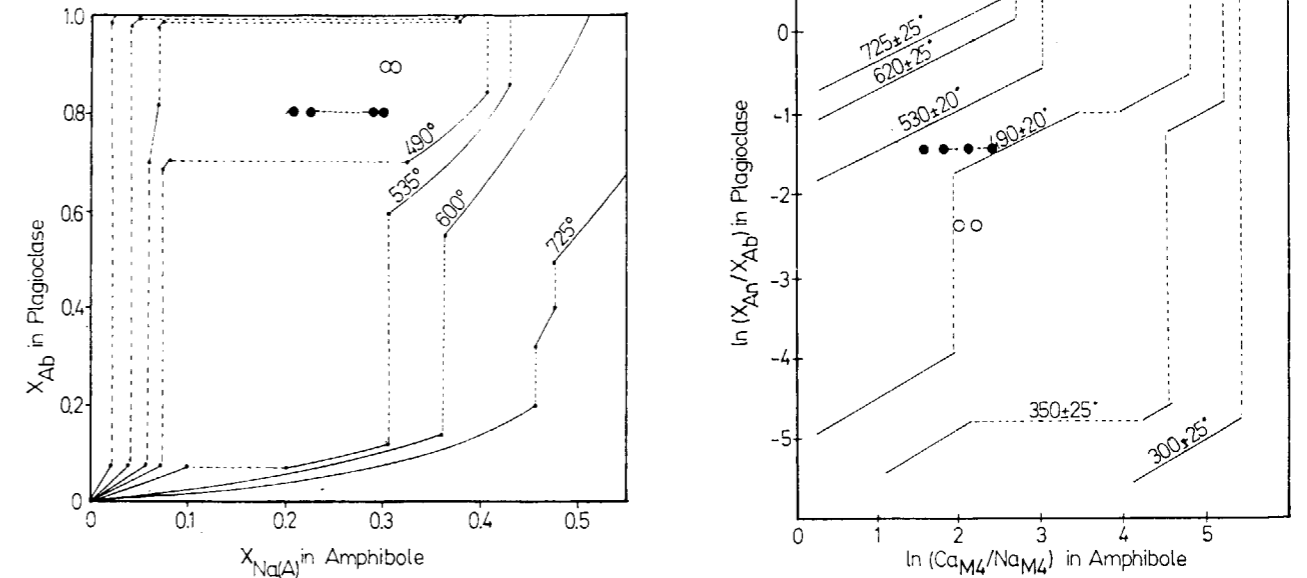


Figura 20.—Estimación de las temperaturas para la estabilidad de los equilibrios de intercambio anfíbol-plagioclasa según los métodos gráficos de SPEAR (1980, 1981a). Círculos huecos: anfibolitas intercaladas entre esquistos de la Serie Negra; círculos llenos: anfibolitas de la unidad del Cuartel.

4. METAMORFISMO DE LOS MATERIALES CARBONIFEROS

Los materiales terrígenos y volcánico-sedimentarios del Carbonífero presentan un metamorfismo de grado muy bajo que apenas conlleva neoforración de minerales. En las pizarras el desarrollo de la esquistosidad lleva aparejada cierta reorientación y recristalización de mica blanca y de clorita, pero no se llegan a alcanzar las isogradas de la biotita ni de ningún otro mineral índice de metamorfismo.

DELOCHE y SIMON (1979) utilizan la técnica de análisis de los índices de cristalinidad de la illita para estudiar el metamorfismo de las rocas sedimentarias carboníferas del área de Cerro Muriano, en la continuación sur-oriental de la región aquí estudiada. La illita, mineral frecuente entre las rocas metamórficas de grado muy bajo, presenta un índice de cristalinidad que varía en función de la intensidad del metamorfismo. FE-

RRERO y KÜBLER (1964) definen este índice a partir de la anchura del pico (001) de 10 Å de la illita a la mitad de su altura, anchura tanto menor cuanto mayor es la intensidad del metamorfismo. Estos índices, representados en el diagrama de ESQUEVIN (1969; fig. 24), indican que las pizarras del Carbonífero han sido metamorfizadas en condiciones del límite entre anquizona y epizona. Estas condiciones vienen igualmente definidas por las paragénesis existentes en las rocas volcánicas de la misma edad (DELOCHE y SIMON, 1979).

5. EVOLUCION TECTONO-METAMORFICA PRESION-TEMPERATURA-TIEMPO. DISCUSION Y CONCLUSIONES

Los recorridos en el campo P-T (fig. 25) obtenidos en las unidades tectónicas principales de

la Unidad Alóctona para el episodio M_1 presentan algunas características similares. Primeramente, son trayectorias incompletas puesto que

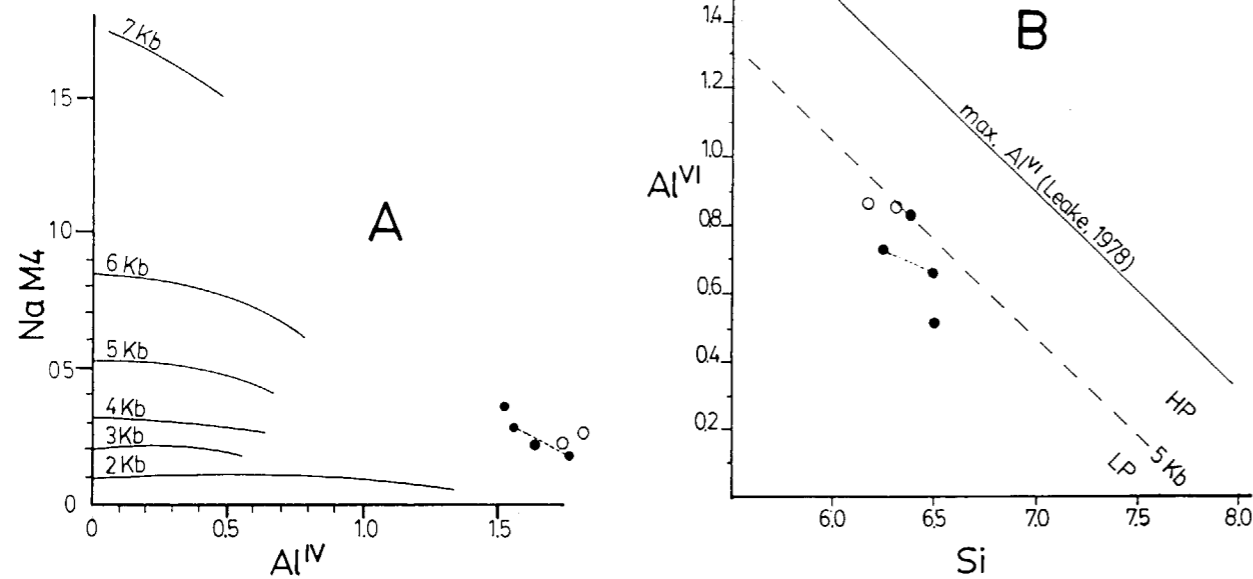


Figura 21.—Estimación de las presiones para la estabilidad de los equilibrios de intercambio y las características composicionales de los anfíboles según los métodos gráficos de (A) BROWN (1974) y (B) RAASE (1974). Círculos huecos: anfibolitas intercaladas entre esquistos de la Serie Negra; círculos llenos: anfibolitas de la unidad del Cuartel.

faltan las partes correspondientes al metamorfismo progrado. En segundo lugar, son trayectorias retrógradas resultado de procesos de levantamiento y acercamiento hacia la superficie de rocas metamórficas. Finalmente, en todos ellos se superponen las condiciones P-T del episodio M_2 a las condiciones correspondientes a los estadios metamórficos finales M_1 .

Los climas metamórficos M_1 son diferentes en las distintas unidades. Así, mientras el clima migmatítico se produce a presiones de 6-8 Kbar en la unidad tectónica inferior (gneises milonita de Higuera de Llerena), en la lámina blastomilonítica de gneises migmatíticos suprayacente ocurre a presiones ligeramente mayores (7-9 Kbar), y en la lámina eclogítica que se le superpone se conserva un clima metamórfico generado bajo presiones máximas de 13-14 Kbar. La distribución invertida del metamorfismo que se observa en las tres unidades anteriores en cuanto a las presiones alcanzadas se pierde en las unidades que se superponen a la lámina eclogítica (fig. 25).

En las rocas del complejo leptino-anfibolítico las asociaciones conservadas son asociaciones banales de la facies de las anfibolitas. En la Serie Negra, si bien se alcanza migmatización en su base, ésta ocurre bajo presiones intermedias, inferiores a las citadas más arriba, predominando un metamorfismo en el que las temperaturas alcanzadas son también más bajas que en los casos anteriores. La distribución invertida del metamorfismo M_1 se manifiesta, finalmente, a nivel de las temperaturas máximas alcanzadas en relación con la Unidad Para-autóctona, la cual recoge la evolución P-T en dos niveles estructurales diferentes. En el nivel estructural más alto el metamorfismo M_1 es de presiones intermedias-bajas, alcanzando un clima tanto a presiones como a temperaturas inferiores a las registradas en las unidades tectónicas de la Unidad Alóctona, con las que está en relación espacial. En niveles estructurales más bajos las temperaturas alcanzadas son igualmente más bajas que las registradas en la Unidad Alóctona; sin embargo, las presiones son del mismo rango.

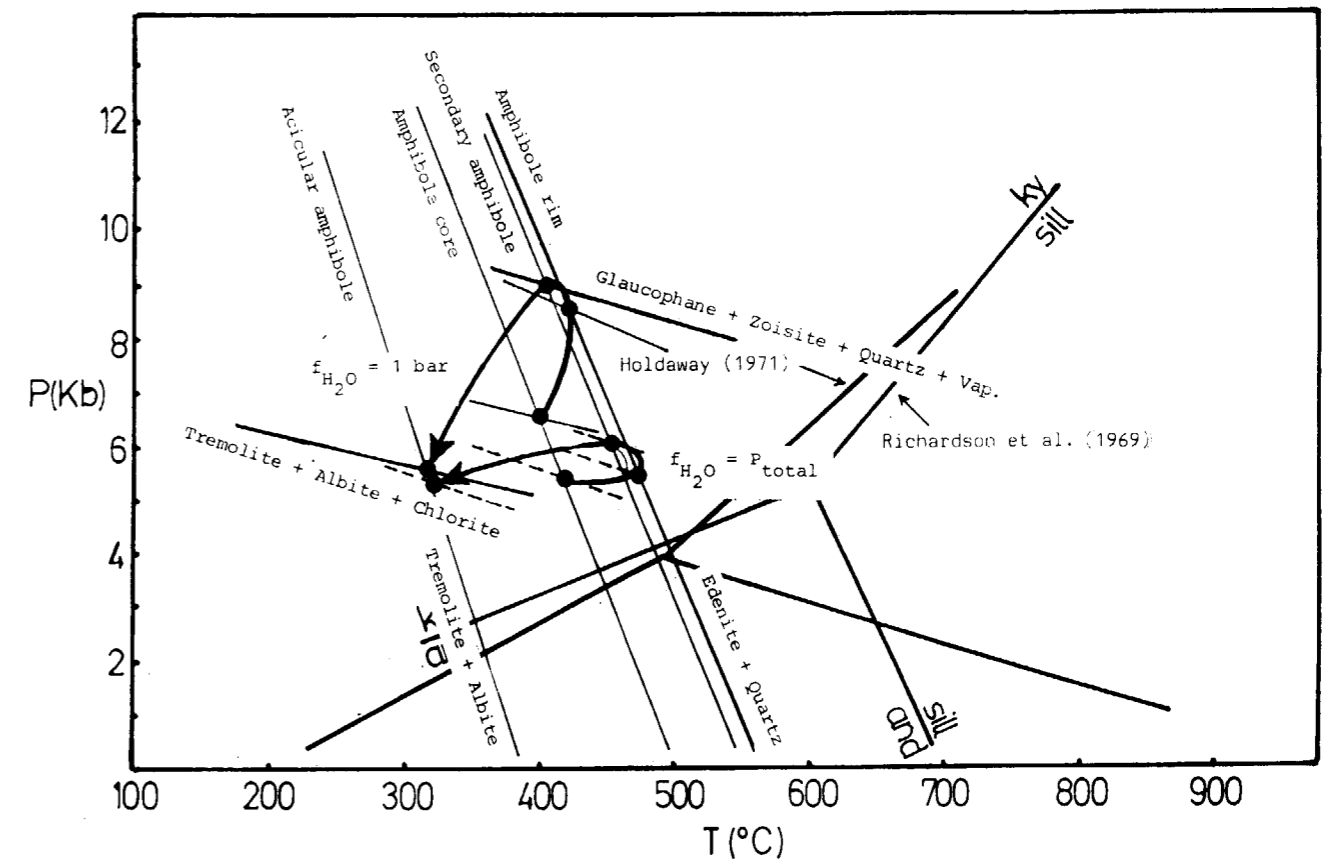


Figura 22.—Efecto de la presión parcial de fluidos sobre las estimaciones de las condiciones P-T de equilibrio calculadas según las formulaciones de HOLLAND y RICHARDSON (1979) en un ejemplo de anfíboles zonados de las anfibolitas de la unidad del Cuartel. Con una presión parcial de H_2O de 1 bar las presiones calculadas llegan a ser 3-4 Kbar más elevadas y las temperaturas $50^\circ C$ más bajas que si se considera la presión del H_2O igual a la presión total. Este factor afecta exclusivamente a la reacción Tremolita + Albita + Clorita = Glaucófana + Zoisita + Cuarzo + Vapor; sin embargo, el resultado en la trayectoria calculada en el espacio P-T puede ser muy acusado.

La trayectoria P-T experimentada por las eclogitas es la que abarca una mayor diversidad de condiciones de presión y temperatura. La trayectoria (asociada al evento D₁) evidencia una descompresión isotérmica de unos 10 Kbar (desde 14.5 a 4-5 Kbar), seguida por un enfriamiento al que se asocian ligeras disminuciones de presión. Las condiciones P-T calculadas para el clima eclogítico corresponden al estadio final de un metamorfismo progrado al que cabe asociar un gradiente geotérmico del orden de $15-20^\circ C/Km.$, al menos para el intervalo de temperaturas de 200 a $700^\circ C$ (RAHEIM y GREEN, 1975). Estas características permiten suponer que las eclogitas experimentaron una subducción en la litos-

fera hasta profundidades del orden de 50-60 kilómetros. De acuerdo con ENGLAND y THOMPSON (1984), THOMPSON y ENGLAND (1984), PLATT (1986), HEILBRONER et al. (1987), DAVIES y WARREN (1988) y ALLEN (1989), el incremento progresivo de presión hasta los valores registrados por las eclogitas se puede explicar mediante procesos de subcabalgamiento en un prisma de acreción tectónica situado en una zona de subducción/colisión. Las máximas presiones se alcanzan con anterioridad al establecimiento del clima térmico, mientras que las temperaturas máximas son alcanzadas durante los estadios iniciales de su ascenso o acercamiento hacia la superficie (THOMPSON y RIDLEY, 1987).

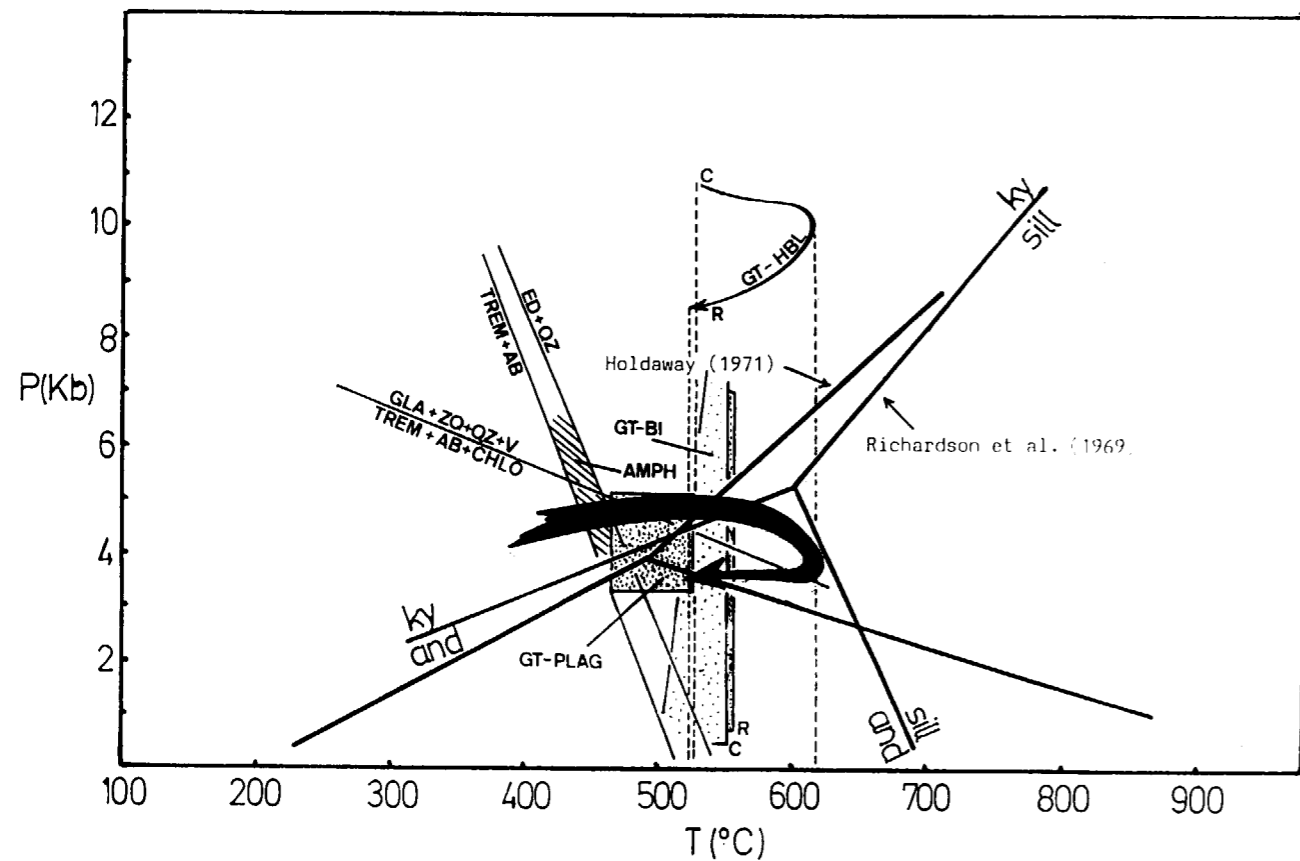


Figura 23.—Diagrama P-T en el que se representan las condiciones y campos de estabilidad de las diferentes asociaciones observadas en las anfibolitas intercaladas entre esquistos de la Serie Negra. Gt-Bi, granate-biotita; Gt-Hbl, granate-hornblenda; Hbl-Plag, geotermómetros y geobarómetros gráficos de SPEAR (1980, 1981a), BROWN (1974) y RAASE (1974); C, composiciones de los centros de granates y anfíboles zonados; R, bordes. Las reacciones indicadas son las calibradas por HOLLAND y RICHARDSON (1979). La flecha representa la trayectoria probable de estas rocas en el campo P-T.

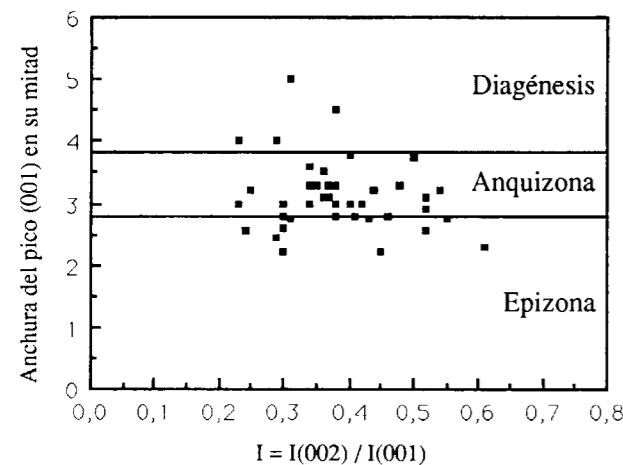


Figura 24.—Índices de cristalinidad de la Illita en el diagrama de ESQUEVIN (1969) en las rocas carboníferas del área de Cerro Muriano. Según DELOCHE y SIMON (1979).

Por debajo de presiones de 6-8 Kbar y de temperaturas de 600-700° C, las trayectorias P-T recogidas por las diversas unidades que componen la Unidad Alóctona son bastante similares. A una descompresión más o menos isotérmica hasta 4-5 Kbar le sigue un enfriamiento progresivo bajo presiones progresivamente decrecientes.

Los recorridos PTt registrados siguen un sentido horario en el campo P-T, incluyendo una importante descompresión en condiciones de T casi constantes coetánea con el levantamiento. Este tipo de evolución general se ha explicado anteriormente (BOHLEN, 1987) como resultado de la descarga de la columna de corteza suprayacente por procesos de erosión, los cuales podrían tener períodos de duración de 20-50 Ma (ENG-

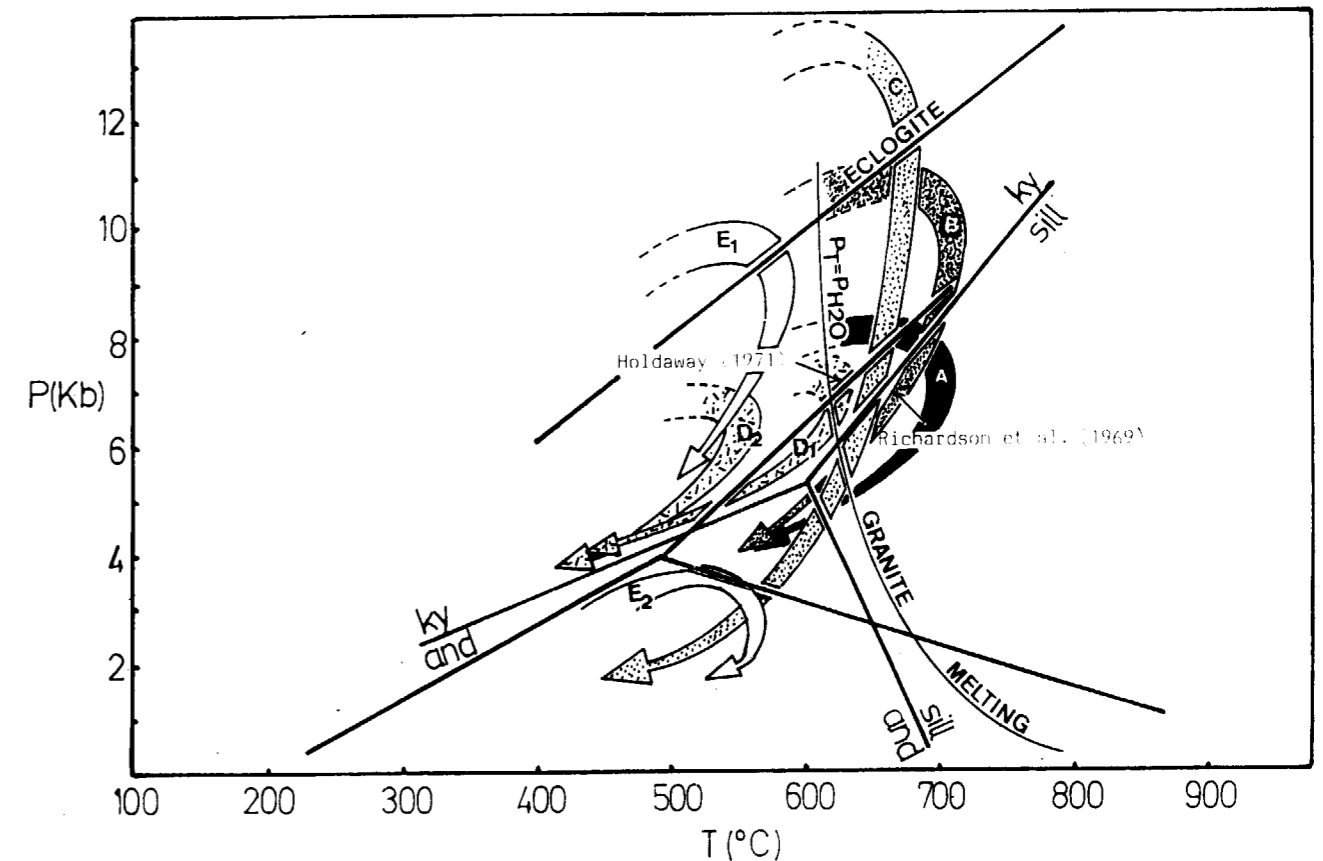


Figura 25.—Paths PTt para las diferentes unidades tectónicas que afloran en el Corredor. A, Gneises Milonita de Higuera de Llerena; B, Lámina Blastomilonítica de Gneises Migmáticos; C, Lámina Eclogítica; D₁ y D₂, metapelitas y metabasitas de la Serie Negra, resp.; E₁ y E₂, niveles estructurales inferiores y superiores de la Unidad Para-Autóctona, respectivamente.

LAND y RICHARDSON, 1977; THOMPSON y ENGLAND, 1984; ELLIS, 1987). La longitud del tramo de la trayectoria P-T correspondiente a la descompresión isotérmica está directamente determinada por las tasas o velocidades de ascenso. En el caso que nos ocupa, velocidades de levantamiento elevadas relacionadas con grandes cabalgamientos y el subsiguiente adelgazamiento cortical por procesos de extensión hacen que las rocas de la Unidad Alóctona sufran una descompresión casi isotérmica (SPEAR et al., 1984; THOMPSON y RIDLEY, 1987) en una zona de colisión.

El emplazamiento de la Unidad Alóctona por cabalgamiento supone, además, su colocación sobre un bloque más frío, el cual sufre como re-

sultado un metamorfismo progrado caracterizado por una trayectoria P-T de sentido antihorario (SPEAR et al., 1984; BOHLEN, 1987). El adelgazamiento cortical por procesos extensionales explica la parte final, del segmento de descompresión isotérmica, ya que provoca un acercamiento hacia la superficie de las rocas con metamorfismo más elevado por una descarga o remoción tectónica de las rocas suprayacentes.

El ciclo tectonometamórfico hercínico produce un «overprinting» de las asociaciones previas. Rocas de grado medio y alto exhumadas hasta los niveles estructurales más altos durante el episodio D₁ son retomadas durante una fase de cizallamiento dúctil transcurrente que provoca la reequilibración química e isotópica de parte

de ellas a condiciones de grado más bajo. Las nuevas condiciones de presión y temperatura que se registran durante el clímax metamórfico en las asociaciones minerales M_2 suponen en el campo P-T una continuación aparente (en los campos de los grados medio-bajo) de las trayectorias correspondientes al metamorfismo M_1 . En las metabasitas de la lámina eclogítica, por ejemplo, la trayectoria P-T evoluciona desde 14 Kbar y 660° C a 650-700° C y 9 Kbar y de aquí a 550-600° C y 4-5 Kbar. Prácticamente todos los equilibrios minerales conservados en las anfibolitas de esta unidad (tanto si se trata de anfibolitas banales como si se trata de anfibolitas con granate) arrojan estos resultados de presión y temperatura: 550-600° C y 4-5 Kbar. En algunas de las anfibolitas se reconocen mineralogías y texturas relictas que indican su origen por retro-morfosis de eclogitas, por lo que existe una trayectoria única que evoluciona desde 14 a 4-5 Kbar. Sin embargo, en otras anfibolitas no existen tales evidencias a pesar de formar parte de la misma unidad o de estar espacialmente relacionadas. Si bien tales anfibolitas muestran asociaciones estables a 500-550° C y 4-5 Kbar, unas

están recristalizadas y otras no. Esto podría significar que existe un episodio metamórfico independiente y posterior (M_2) que alcanza condiciones de P y T coincidentes con las registradas durante la retromorfosis de las eclogitas durante el episodio M_1 y que no han podido individualizarse con certeza. Consecuentemente, resulta un efecto aparente en la evolución metamórfica de estas rocas como continuación de la retromorfosis de las eclogitas con las que guardan una relación espacial.

La historia del levantamiento de las rocas implicadas en esta zona de cizalla dúctil D_2 está relacionada con componentes transpresivas (ABALOS y EGUILUZ, 1989). Las tasas de levantamiento son bajas en las zonas de cizalla transcurrentes, ya que suponen solamente una pequeña parte (del orden del 10 por 100; RAMSAY, 1980) de los desplazamientos tectónicos laterales. No obstante, la presencia de componentes de acortamiento transversal permite reforzar en alguna medida y de manera local las tasas de ascenso. El resultado final es una larga historia de enfriamiento y de acercamiento hacia la superficie (JONES, 1981; BROWN, 1984).

ANEXO 1

Listado de las reacciones de metamórficas utilizadas en
Evolución tectono-metamórfica del Corredor Blastomilonítico de Badajoz-Córdoba I y II

Estilpnomelana + Fengita = Biotita + Clorita + Cuarzo + H ₂ O	(1)
Clorita + Fd potásico = Biotita + Fengita + Cuarzo + H ₂ O	(2)
3 Fengita + Clorita = 3 Biotita + 7 Cuarzo + 4 H ₂ O	(3)
3 Fengita = Biotita + 2 Fd. potásico + 3 Cuarzo + 2 H ₂ O	(4)
Clorita + Fd potásico + Fengita = Biotita + Cuarzo + H ₂ O	(5)
Clorita + Fd potásico = Biotita + Cuarzo + H ₂ O	(6)
Clorita + Biotita + Cuarzo = Granate + Biotita ₂ + H ₂ O	(7)
Clorita + Fengita + Epidota = Granate + Biotita + H ₂ O	(8)
Clorita + Fengita + Cuarzo = Granate + Biotita + H ₂ O	(9)
Fe-Clorita + Fengita + Cuarzo = Granate + Biotita + Cianita + H ₂ O	(10)
2 Biotita + 6 Cuarzo = 2 Fengita + Granate	(11)
Fengita + Clorita = Biotita + Granate + Cuarzo + H ₂ O	(12)
Fengita + Clorita = Biotita + Granate + H ₂ O	(13)
Clorita + Cuarzo = Granate + H ₂ O	(14)
Biotita + Clorita + Cuarzo = Granate + Fengita + H ₂ O	(15)
Pirofilita = Cianita + Cuarzo + H ₂ O	(16)
Clorita + Fengita + Cuarzo = Cianita + Biotita + H ₂ O	(17)
Plagioclasa = Granate + Cianita + Cuarzo	(18)
Al ₂ SiO ₅ + H ₂ O = Al ₂ SiO ₄ (OH) ₂ (hidroxi-topacio)	(19)
Cloritoide + O ₂ = Estaurolita + Magnetita + Cuarzo + H ₂ O	(20)
Clorita + Moscovita = Estaurolita + Biotita + Cuarzo + H ₂ O	(21)
Clorita + Moscovita + Granate = Estaurolita + Biotita + Cuarzo + H ₂ O	(22)
Estaurolita + Moscovita + Cuarzo = Biotita + Andalucita + H ₂ O	(23)
Estaurolita + Moscovita + Cuarzo = Biotita + Andalucita + Granate + H ₂ O	(24)
Estaurolita + Na-Moscovita + Cuarzo = Biotita + Andalucita + K-Moscovita + Albita + Granate + H ₂ O	(25)

Moscovita + Cuarzo = Feldespato potásico + Andalucita/Sillimanita + H ₂ O	(26)
Forsterita + Cuarzo + H ₂ O = Serpentina	(27)
Forsterita + H ₂ O + CO ₂ = Serpentina + Magnetita	(28)
Forsterita + H ₂ O + CO ₂ = Talco + Magnetita	(29)
8 Serpentina + Cuarzo = Talco + H ₂ O	(30)
Talco + Magnesita + H ₂ O = Serpentina + CO ₂	(31)
Talco + Forsterita + H ₂ O = Serpentina	(32)
Talco + H ₂ O = Serpentina + Cuarzo	(33)
Diópsido + Enstatita + H ₂ O = Tremolita + Forsterita	(34)
Diópsido + H ₂ O + CO ₂ = Tremolita + Calcita + Dolomita	(35)
Diópsido + Forsterita + H ₂ O + CO ₂ = Tremolita + Dolomita	(36)
Tremolita + Forsterita + H ₂ O = Serpentina + Diópsido	(37)
Albita + Feldespato potásico + Cuarzo + Volátiles = Fundido	(38)
Moscovita + Cuarzo + Líquido = Feldespato alcalino + Sillimanita + H ₂ O	(39)
Moscovita + Cuarzo + Líquido = Fd potásico + Plagioclasa + Sillimanita + H ₂ O	(40)
Moscovita + Plagioclasa + Cuarzo = Sillimanita + Feldespato alcalino + H ₂ O	(41)
Biotita + Sillimanita + Cuarzo = Granate + Feldespato potásico + H ₂ O	(42)
Na-Moscovita + Granate = Biotita + Sillimanita + Albita	(43)
Granate + Onfacita + H ₂ O = Hornblenda + Plagioclasa	(44)
Granate + H ₂ O = Anfíbol Tschermakítico + Clorita + Cuarzo	(45)
Granate + Rutilo = Ilmenita + Anortita + Cuarzo	(46)
Granate + Rutilo + Cuarzo = Anortita + Esfena	(47)
Granate ₁ + Ilmenita + Cuarzo = Esfena + Granate ₂	(48)
Clinopiroxeno + Plagioclasa + Fe-Ti óxidos + H ₂ O = Hornblenda	(49)
Clinopiroxeno + H ₂ O + Cuarzo = Anfíbol	(50)
Clinopiroxeno + H ₂ O + Fe-Ti óxido I = Anfíbol + Fe-Ti óxido II	(51)
Hornblenda + H ₂ O = Tremolita + Clorita + Epidota + Cuarzo	(52)
Hornblenda + H ₂ O = Actinolita + Clorita + Epidota	(53)
Anortita + Tremolita = Epidota + Clorita	(54)
Hornblenda + Anortita + H ₂ O = Clorita + Epidota + Cuarzo	(55)
Albita = Jadeíta + Cuarzo	(56)
Clinopiroxeno + Plagioclasa = Granate + Cuarzo	(57)
Hornblenda ₁ + Plagioclasa ₁ + Ilmenita + H ₂ O + O ₂ = Hornblenda ₂ + Plagioclasa ₂ + Esfena + Titanohematites	(58)
Tremolita + Tschermakita + Albita = Pargasita + Cuarzo	(59)
Ortopiroxeno + H ₂ O = Cummingtonita + (Mg, Fe)O	(60)
Clinopiroxeno + (Mg, Fe)O + H ₂ O = Actinolita/Tremolita + CaO	(61)
Cummingtonita + Plagioclasa = Hornblenda	(62)
Tremolita/Actinolita + Plagioclasa = Hornblenda + Cuarzo	(63)
Albita + Tremolita = Edenita + Cuarzo	(64)
Actinolita/Tremolita + Albita = Hornblenda + Oligoclasa	(65)
Actinolita/Tremolita + Andesina = Hornblenda + Anortita	(66)
Hornblenda + Epidota + Cuarzo = Albita + Clorita	(67)
Hornblenda + H ₂ O = Epidota + Clorita + Cuarzo	(68)
Hornblenda + Epidota ₁ + H ₂ O = Albita + Epidota ₂ + Cuarzo	(69)
Albita + Epidota ₁ + Clorita = Hornblenda + Epidota ₂ + H ₂ O	(70)
Tschermakita + Clorita + Cuarzo = Granate + H ₂ O	(71)

REFERENCIAS

- ABALOS, B. (1989): *Structural Geology of the Ribera del Fresno Window (Badajoz-Córdoba Shear Zone)*. Rev. Soc. Geol. España, 2: 103-112.
- ABALOS, B. (1990): *Cinemática y Mecanismos de la deformación en régimen de transpresión. Evolución estructural y metamórfica de la Zona de Cizalla Dúctil de Badajoz-Córdoba*. Tesis Doctoral. Univ. País Vasco, 430 pp.
- ABALOS, B., and EGUILUZ, L. (en prensa): *Structural Geology of the Mina Afortunada Gneiss Dome (Badajoz-Córdoba Shear Zone, SO Spain)*. Annales Tectonicae.
- ABALOS, B., y EGUILUZ, L. (1990): *El Corredor Blastomi-*

lítico de Badajoz-Córdoba: un complejo orogénico de subducción/colisión durante la orogenia Pan-Africana. Cinemática, dinámica e historia de levantamiento del apilamiento de unidades tectónicas. Geogaceta, 7: 73-76.

ABALOS, B.; EGUILUZ, L., y APALATEGUI, O. (1990): *Constitución tectono-estratigráfica del Corredor Blastomilonítico de Badajoz-Córdoba: nueva propuesta de subdivisión*. Geogaceta, 7: 71-73.

ABALOS, B.; EGUILUZ, L., y GIL IBARGUCHI, I. (1991): *Evolución tectonometamórfica del Corredor Blastomilonítico de Badajoz-Córdoba. I. La Unidad Para-Autóctona*. Bol. Geol. Min., 102.

ABALOS, B.; EGUILUZ, L.; GIL IBARGUCHI, I., y VIA CHICOTE, J. (1989): *Características mineralógicas de los topacios del afloramiento de grésenes milonitizados asociados al Ortogneis de Ribera del Fresno y sus posibles implicaciones metalogenéticas (Badajoz, Zona de Ossa-Morena)*. Rev. Soc. Esp. Mineralogía, 12: 385-392.

ALLEN, A. R. (1989): *Thrust-dominated uplift of deeply buried metamorphic terranes: evidence from P-T-t paths*. Terra Abstracts, 1: 259-260.

ALTHAUS, E.; KAROTKE, E.; NITSCH, K. H., and WINKLER, H. G. F. (1970): *An experimental reexamination of the upper stability limit of muscovite plus quartz*. N. Jb. B. Miner., 7: 325-336.

ANDERSON, P. A. M.; NEWTON, R. C., and KLEPPA, O. J. (1977): *The enthalpy change of the Andalusite-Sillimanite reaction and the Al_2SiO_5 diagram*. Am. J. Sci., 237: 585-593.

BARINK, H. K. (1984): *Replacement of pyroxene by hornblende, isochemically balanced with replacement of plagioclase by garnet, in a metagabbro of upper-amphibolite grade*. Lithos, 17: 247-258.

BOHLEN, S. R. (1987): *Pressure-Temperature-time paths and tectonic model for the evolution of granulites*. J. Geol., 95: 617-632.

BOHLEN, S. R., and LIOTTA, J. J. (1986): *A barometer for garnet amphibolites and garnet granulites*. J. Petrol., 27: 1025-1034.

BRODIE, K. H. (1981): *Variation in amphibole and plagioclase composition with deformation*. Tectonophysics, 79: 385-402.

BROWN, E. H. (1974): *Comparison of the mineralogy and phase relations of blueschists from the Northern Cascades, Washington, and the blueschists from Otago, New Zealand*. Geol. Soc. Am. Bull., 85: 333-344.

BROWN, M. (1984): *Shear zone metamorphism: introduction*. J. Met. Geol., 2: 75.

COLEMAN, R. G.; LEE, D. E.; BEATTY, L. B., and BRANNOCK, W. W. (1965): *Eclogites and eclogites: their differences and similarities*. Geol. Soc. Am. Bull., 76: 483-508.

CONNOLLY, J. A. D., and THOMPSON, A. B. (1989): *Fluid and enthalpy production during regional metamorphism*. Contrib. Mineral. Petrol., 102: 347-366.

CORBETT, G. J., and PHILLIPS, G. N. (1981): *Regional retrograde metamorphism of a high grade terrain: the Willyama Complex, Broken Hill, Australia*. Lithos, 14: 59-73.

DAVI, PH., and GILLET, P. (1986): *The stacking of thrust slices in collision zones and its thermal consequences*. Tectonics, 5: 913-929.

DAVIES, H. L., and WARREN, R. G. (1988): *Origin of eclogite-bearing, domed, layered metamorphic complexes («core complexes») in the D'Entrecasteaux Islands, Papua New Guinea*. Tectonics, 7: 1-21.

DEER, W. A.; HOWIE, R. A., and ZUSSMAN, J. (1966): *An introduction to the Rock Forming Minerals*. Longman Group Ltd., London: 1-528.

DELOCHE, C., et SIMON, D. (1979): *Géologie et Géologie du Cerro Muriano (Cordoue, Espagne). Le charriage majeur cadomien sud-Hespérique: interprétation des blastomylonites de l'Axe de Badajoz-Cordoue*. Thèse, Univ. Paris Sud: 242 pp.

DUEBENDORFER, E. H., and FROST, B. R. (1988): *Retrogressive dissolution of garnet: effect on garnet-biotite geothermometry*. Geology, 16: 875-877.

DUFOUR, E. (1985): *Granulite facies metamorphism and retrogressive evolution of the Monts du Lyonnais (Massif Central, France)*. Lithos, 18:97-113.

EGUILUZ, L. (1988): *Petrogénesis de rocas ígneas y metamórficas en el Anticlinorio Burguillos-Monesterio, Macizo Ibérico Meridional*. Tesis Doctoral, Univ. del País Vasco, 1-694.

EGUILUZ, L.; ABALOS, B., y GIL IBARGUCHI, J. I. (1990): *Eclogitas de la Banda de Cizalla Badajoz-Córdoba (Suroeste de España). Datos petrográficos y significado geodinámico*. Geogaceta, 7:28-31.

ELLIS, D. J. (1987): *Origin and evolution of granulites in normal and thickened crust*. Geology, 15: 167-170.

ELLIS, D. J., and GREEN, D. H. (1979): *An experimental study of the effect of Ca upon garnet-clinopyroxene Fe-Mg exchange equilibria*. Contrib. Mineral. Petrol., 71: 13-22.

ENGLAND, PH. C., and RICHARDSON, S. W. (1977): *The influence of erosion upon the mineral facies of rocks from different metamorphic environments*. J. Geol. Soc. London, 134: 201-213.

ENGLAND, PH. C., and THOMPSON, A. B. (1984): *Pressure-Temperature-Time Paths of Regional Metamorphism. I. Heat Transfer During the Evolution of Regions of Thickened Crust*. J. Petrol., 25: 894-928.

ESQUEVIN, J. (1969): *Influence de la composition chimique des illites sur leur cristallinité*. Bull. Centre Rech, Pau. S. N. P. A., 3: 147-154.

FERRERO, J., et KÜBLER, B. (1964): *Présence de dickite et de kaolinite dans les grés cambriens d'Hassi Meÿsaand*. Bull. Serv. Carte Géol. Lorr.: 247-261.

FERRY, J. M., and SPEAR, F. S. (1978): *Experimental calibration of Fe and Mg between biotite and garnet*. Contrib. Mineral. Petrol., 66: 113-117.

GHENT, E. D. (1976): *Plagioclase-Garnet- Al_2SiO_5 -Quartz: a potential geobarometer-geothermometer*. Am. Mineral., 61: 710-714.

GHENT, E. D., and STOUT, M. Z. (1981): *Geobarometry and geothermometry of plagioclase-biotite-garnet-muscovite assemblages*. Contrib. Mineral. Petrol., 76: 92-97.

GIL IBARGUCHI, J. I., and ORTEGA GIRONES, E. (1985): *Petrology, structure and geotectonic implications of glaucophane-bearing eclogites and related rocks from Malpica*

Tuy (MT) Unit, Galicia, Northwest Spain. Chemical Geology, 50: 145-162.

GIL IBARGUCHI, I.; ABALOS, B.; CAMPILLO, A.; HIGUERO, A.; LOPEZ, B.; PINILLA, V.; RODRIGUEZ, C.; RODRIGUEZ, R., y URTIAGA, K. (1987): *Asociaciones con Granate-Clinopiroxeno en la Unidad Catazonal Superior del Complejo de Cabo Ortegal*. Cuadernos del Laboratorio Geológico de Laxe, 12: 165-181.

GRANT, J. A. (1985): *Phase equilibria in low-pressure partial melting of pelitic rocks*. Am. J. Sci., 285: 409-435.

GREEN, T. H., and HELLMAN, P. L. (1982): *Fe-Mg partitioning between coexisting garnet and phengite at high pressure, and comments on a garnet-phengite geothermometer*. Lithos, 15: 253-266.

HEILBRONNER, R.; THOMPSON, A. B., and CONNOLLY, J. (1987): *Influence of metamorphic reactions on the temperature development of thrust crustal stacks*. Abstract, Conference on Plate Tectonics and Deformation, Gijón-Oviedo: 45.

HODGES, K. V., and ROYDEN, L. (1984): *Geologic thermobarometry of retrograded metamorphic rocks: an indication of the uplift trajectory of a portion of the northern Scandinavian Caledonides*. J. Geophys. Res., 89: 7077-7090.

HODGES, K. V., and SPEAR, F. S. (1982): *Geothermometry, geobarometry and the Al_2SiO_5 triple point at Mt. Moosilouke, New Hampshire*. Am. Mineral., 67: 1118-1134.

HOLDAWAY, M. J. (1971): *Stability of Andalusite and the aluminium silicate phase diagram*. Am. J. Sci., 271: 97-131.

HOLDAWAY, M. J., and LEE, S. H. (1977): *Fe-Mg cordierite in high-grade pelitic rocks based on experimental, theoretical and natural observations*. Contrib. Mineral. Petrol., 63: 175-198.

HOLLAND, T. J. B. (1980): *The reaction $Ab + Jd + Qz$ determined experimentally in the range 600-1200° C*. Am. Mineral., 65: 129-134.

HOLLAND, T. J. B. (1983): *The experimental determination of activities in disordered and short-range ordered jadeitic pyroxenes*. Contrib. Mineral. Petrol., 82: 214-220.

HOLLAND, T. J. B., and RICHARDSON, S. W. (1979): *Amphibole zonation in metabasites as a guide to the evolution of metamorphic conditions*. Contrib. Mineral. Petrol., 70: 143-148.

HOSUTANI, H., and BANNO, S. (1986): *Amphibole composition as an indicator of subtle grade variation in epidote-glaucophane schists*. J. Met. Geol., 4: 23-35.

INDARES, A., and MARTIGNOLE, J. (1985): *Biotite-Garnet geothermometry in the granulite facies: the influence of Ti and Al in biotite*. Am. Mineral., 70: 272-278.

JONES, M. E. (1981): *The relationship between metamorphism and deformation: report of the Tectonic Studies Group discussion meeting held at the Geological Society, Burlington House, London, 12 Nov. 1980*. J. Struct. Geol., 3: 333-338.

KROGH, E. J. (1988): *The garnet-clinopyroxene Fe-Mg geothermometer - a reinterpretation of existing experimental data*. Contrib. Mineral. Petrol., 99: 44-48.

KROGH, E. J., and RAHEIM, A. (1978): *Temperature and Pressure dependence of Fe-Mg partitioning between garnet and fengite, with particular reference to eclogites*. Contrib. Mineral. Petrol., 66: 75-80.

LARDEAUX, J. M.; CARON, J. M.; NISIO, P.; PEQUIGNOT, G., and BOUDEULLE, M. (1986): *Microstructural criteria for reliable thermometry in low-temperature eclogites*. Lithos, 19: 187-203.

LEAKE, B. E. (1978): *Nomenclature of amphiboles*. Mineral. Petrogr. Acta, 22: 195-224.

LIEGEOIS, P., and DUCHESNE, J. C. (1981): *The Lac Cornu retrograded eclogites (Aiguilles Rouges Massif, Western Alps, France). Evidence of crustal origin and metasomatic alteration*. Lithos, 14: 35-48.

LOPEZ MUNGUIRA, A.; SEBASTIAN PARDO, E., y NIETO, F. (1988): *Las micas de las rocas metamórficas precámbricas en las zonas Centro-Ibérica meridional y Ossa-Morena*. Bol. Soc. Esp. Min., 2: 39-40.

LOPEZ MUNGUIRA, A.; SEBASTIAN PARDO, E., y NIETO, F. (1988): *Caracterización de las cloritas de las rocas metamórficas precámbricas de las zonas de Ossa-Morena y Centro-Ibérica meridional*. Bol. Soc. Esp. Min., 2: 41-42.

MATA, J., and MUNHA, J. (1986): *Geodynamic significance of high grade metamorphic rocks from Degolados - Campo Maior (Tomar-Badajoz-Córdoba Shear Zone)*. Abstract. Ma-leo, 2: 28.

MIYASHIRO, A. (1973): *Metamorphism and Metamorphic Belts*. George Allen and Unwin Ltd.: 1-492.

MONGKOLTIP, P., and ASHWORTH, J. R. (1986): *Amphibolitization of metagabbros in the Scottish Highlands*. J. Met. Geol., 4: 261-283.

MOODY, J. B.; MEYER, O., and JENKINS, J. E. (1983): *Experimental characterization of the greenschist-amphibolite boundary in mafic systems*. Am. J. Sci., 283: 48-92.

MORIMOTO, N. (1988): *Nomenclature of pyroxenes*. Am. Mineral., 73: 1123-1133.

MOTTANA, A. (1986): *Crystal-chemical evolution of garnet and omphacite microprobe analyses: its bearing on the classification of eclogites*. Lithos, 19: 171-186.

MYSEN, B. O., and HEIER, K. S. (1972): *Petrogenesis of eclogites in high grade metamorphic gneisses exemplified by the Mareidland eclogite, western Norway*. Contrib. Mineral. Petrol., 36: 73-94.

NEWTON, R. C. (1986): *Metamorphic temperatures and pressures of Group B and C eclogites*. In: EVANS & BROWN (Eds.): *Blueschists and eclogites*. Geol. Soc. Am. Memoir, 164: 17-30.

NEWTON, R. C., and HASELTON, H. T. (1981): *Thermodynamics of the Garnet-Plagioclase- $AlSi_2O_5$ Quartz Geobarometer*. In: R. C. Newton, A. Navrotsky and B. J. Wood (Eds.): *Thermodynamics of Minerals and Melts*. Springer-Verlag, New York: 131-147.

NEWTON, R. C., and PERKINS, D. (1982): *Thermodynamic calibration of geobarometers based on the assemblages garnet-plagioclase-clinopyroxene-orthopyroxene-quartz*. Am. Mineral., 67: 203-222.

PASCUAL, E. (1983): *Las rocas polimetamórficas del área de Cerro Muriano (Córdoba, España). Edad y consideraciones petrológicas*. Temas Geológico-Mineros. Quinta Reunión del Grupo de Ossa-Morena. Publ. IGME. Madrid: 81-89.

PERCHUCK, L. L. (1977): *Thermodynamic control of metamorphic processes*. In: Saxena and Bhattacharji (Eds.): *Energetics of geological processes*. Springer-Verlag: 285-351.

PERCHUCK, L. L.; ARANOVICH, L. Y.; PODLESKI, K. K.; LAVRENT'eva, I. V.; GERASIMOV, V.; YU FED'KIN, V. V.; KITRUL, V. I.; KARSAKOV, L. P., and BERDSNIKOV, N. I. (1985): *Precambrian granulites of the Aldan Shield, Eastern Siberia, URSS*. J. Met. Geol., 3: 265-310.

PERKINS, D., and CHIPERA, S. J. (1985): *Garnet-orthopyroxene-plagioclase-quartz barometry: refinement and application to the English River subprovince and the Minnesota River Valley*. Contrib. Mineral. Petrol., 89: 69-80.

PERKINS, D., and NEWTON, R. C. (1986): *The compositions of coexisting pyroxene and garnet in the system CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ at 900-1100° and high pressures*. Contrib. Mineral. Petrol., 75: 291-300.

PLATT, J. P. (1986): *Dynamics of orogenic wedges and the uplift of high-pressure metamorphic rocks*. Geol. Soc. Am. Bull., 97: 1037-1053.

POWELL, R. (1983): *Fluid and melting under upper amphibolite facies conditions*. J. Geol. Soc. London, 140: 629-633.

POWELL, R. (1985b): *Regression diagnostic and robust regression in geothermometer/geobarometer calibration: the garnet-clinopyroxene geothermometer revisited*. J. Met. Geol., 3: 231-243.

POWELL, R., and HOLLAND, T. J. B. (1988): *An internally consistent dataset with uncertainties and correlations, III. Applications to geobarometry, worked examples and a computer program*. J. Met. Geol., 6: 173-204.

RAASE, P. (1974): *Al and Ti contents of hornblende, indicators of pressure and temperature of regional metamorphism*. Contrib. Mineral. Petrol., 45: 231-236.

RAMSAY, J. G. (1980): *Shear Zone geometry: a review*. J. Struct. Geol., 2: 83-89.

RAHEIM, A., and GREEN, D. H. (1974): *Experimental determination of the temperature and pressure dependence of the Fe-Mg partition coefficient for coexisting garnet and clinopyroxene*. Contrib. Mineral. Petrol., 45: 179-203.

RAHEIM, A., and GREEN, D. H. (1975): *P-T paths of natural eclogites during metamorphism; a record of subduction*. Lithos, 8: 317-328.

RICHARDSON, S. W.; GILBERT, M. C., and BELL, P. M. (1969): *Experimental determination of kyanite-andalusite and andalusite-sillimanite equilibria: the aluminium silicate triple point*. Am. J. Sci., 267: 259-272.

SAXENA, S. K. (1979): *Garnet-clinopyroxene geothermometer*. Contrib. Mineral. Petrol., 70: 229-235.

SILLS, J. D. (1983): *Mineralogical changes occurring during the retrogression of archaean gneisses from the Lewisian Complex of NW Scotland*. Lithos, 16: 113-124.

SPEAR, F. S. (1980): *NaSi-CaAl exchange equilibria between plagioclase and amphibole: an empirical model*. Contrib. Mineral. Petrol., 72: 33-41.

SPEAR, F. S. (1981a): *Amphibole-Plagioclase equilibria, an empirical model for the relation Albite+Tremolite=Edenite+4Quartz*. Contrib. Mineral. Petrol., 77: 355-364.

SPEAR, F. S. (1981b): *An experimental study of hornblende stability and compositional variability in amphibolite*. Am. J. Sci., 281: 697-734.

SPEAR, F. S.; SELVERSTONE, J.; HICKKOTT, D.; COWLEY, P., y HODGES, K. V. (1984): *P-T paths from garnet zoning, a new technique for deciphering tectonic processes in crystalline terranes*. Geology, 12: 87-90.

STORMER, A. (1975): *A practical two-feldspar geothermometer*. Am. Mineral., 60: 667-674.

STORMER, A., and WHITNEY, J. A. (1977): *Two-feldspar geothermometry in granulite facies metamorphic rocks*. Contrib. Mineral. Petrol., 65: 123-133.

TAGIRI, S. (1977): *Fe-Mg partition and miscibility gap between coexisting calcic amphiboles from the southern Abukuma Plateau, Japan*. Contrib. Mineral. Petrol., 62: 271-281.

THOMPSON, A. B. (1983): *Fluid-absent metamorphism*. J. Geol. Soc. London, 140: 533-547.

THOMPSON, A. B., and ALGOR, J. R. (1977): *Model systems for anatexis in pelitic rocks. I. Theory of melting reactions in the system KAIO₂-NaAlO₂-Al₂O₃-SiO₂-H₂O*. Contrib. Mineral. Petrol., 63: 247-269.

THOMPSON, A. B., and ENGLAND, PH. C. (1984): *Pressure-Temperature-Time Paths of Regional Metamorphism. II. Their inference and interpretation using Mineral Assemblages in Metamorphic Rocks*. J. Petrol., 25: 929-955.

THOMPSON, A. B., and RIDLEY, J. R. (1987): *Pressure-Temperature-time (P-T-t) histories of orogenic belts*. Phil. Trans. R. Soc. London, A., 321: 27-45.

THOMPSON, A. B., and TRACY, R. J. (1979): *Model systems for anatexis in pelitic rocks. II. Facies series melting and reactions in the system CaO-KAIO₂-NaAlO₂-Al₂O₃-SiO₂-H₂O*. Contrib. Mineral. Petrol., 70: 429-438.

THOMPSON, J. B., and THOMPSON, A. B. (1976): *A model system for mineral facies in pelitic schists*. Contrib. Mineral. Petrol., 58: 243-277.

THOMPSON, J. B.; LAIRD, J., and THOMPSON, A. B. (1982): *Reactions in amphibolite, greenschist and blueschist*. J. Petrol., 23: 1-27.

TRIBOULET, C., and AUDREN, C. (1988): *Controls on P-T-t deformation path from amphibole zonation during progressive metamorphism of basic rocks (estuary of the River Vilcine, south Brittany, France)*. J. Met. Geol., 6: 117-133.

TRIBOULET, C., and BASSIAS, Y. (1988): *Géothermo-barométrie à partir des amphiboles zonées et métamorphisme progressif dans les metabasites à glaucophane du massif du Parnon (Hellénides externes, Péloponnèse, Grèce)*. C. R. Acad. Sci. Paris, 306: 991-996.

WINKLER, H. G. F. (1977): *Petrogénesis de rocas metamórficas*. Ed. Blume, Barcelona: 1-346.

Original recibido: Junio de 1990.
Original aceptado: Abril de 1991.

Estudio metalográfico del yacimiento polimetálico de Sant Martí Sacalm (macizo de Les Guilleries, prov. de Girona).

Por A.-E. FERRER MODOLELL (*)

RESUMEN

El depósito polimetálico de sulfuros masivos de Sant Martí Sacalm ocupa el tramo basal de la secuencia vulcano-sedimentaria del Ordovícico Superior en el macizo de Les Guilleries (prov. de Girona).

Constituye una mineralización típicamente mesotermal que está compuesta por Esfalerita, Pirrotina, Galena, Calcopirita, Piritita, Marcasita, Magnetita, Hematites. Esta paragénesis experimenta notorios cambios laterales a lo largo del horizonte mineralizado que se traducen, sobre todo, en el contenido en Galena y la relación textural entre la Calcopirita y el resto de minerales primarios.

Se identifican tres fases mineralizadoras:

- 1) Precipitación primaria: Esfalerita-Pirrotina-Galena-(Calcopirita).
- 2) Sulfurización del depósito primario: Piritita-(Melkinovita)-Calcopirita-Pirrotina.
- 3) Fase tardía ligada a procesos de removilización tectónica: Magnetita-Hematites.

Palabras clave: Sulfuros masivos, Pb-Zn, Vulcano-sedimentario, Ordovícico Sup., Catalánides.

ABSTRACT

The volcanogenic massive sulfide deposit at Sant Martí Sacalm, lies within the bottom of a volcano-sedimentary sequence in the Upper Ordovician of Les Guilleries massif (Girona province).

It's a typical mesothermal ore with Sphalerite-Pirrotite-Galena-Chalcopirite-Pyrite-Magnetite and Hematite.

The paragenetic suite has important lateral changes in the Galena contains and Chalcopirite textural relationships.

There are three mineralization events:

- 1) Primary mineralization: Sphalerite-Pirrotite-Galena and Chalcopirite.
- 2) Local acidification: Pyrite-Chalcopirite-Pirrotite.
- 3) Tectonic events: Magnetite-Hematite.

Key words: Massive sulfide, Pb-Zn, Volcano-sedimentary, Upper Ordovician, Catalánides.

INTRODUCCION

En el sector septentrional de los Catalánides (macizos de Les Guilleries y Les Gavarres) aflora una secuencia metavolcánica que forma parte de una serie vulcano-sedimentaria (fig. 1).

Los tramos sedimentarios de esta serie han permitido establecer una edad Caradociense-Asghill para este nivel (DURAN, 1985).

(*) ITGE. Pza. Marqués Aracena, 14. Aracena (Huelva).

Los materiales volcánicos están representados por depósitos piroclásticos (ignimbritas y depósitos de oleadas piroclásticas) y materiales volcánico-epiclásticos (FERRER, 1989a). Corresponden a los términos intermedio-ácidos (Dacita-Riodacita) de una serie calco-alcalina normal (FERRER y MARTI, 1989).

Estas manifestaciones volcánicas se desarrollan en un ambiente de tipo «Back arc basin» (FERRER, 1989b). En condiciones subacuáticas so-

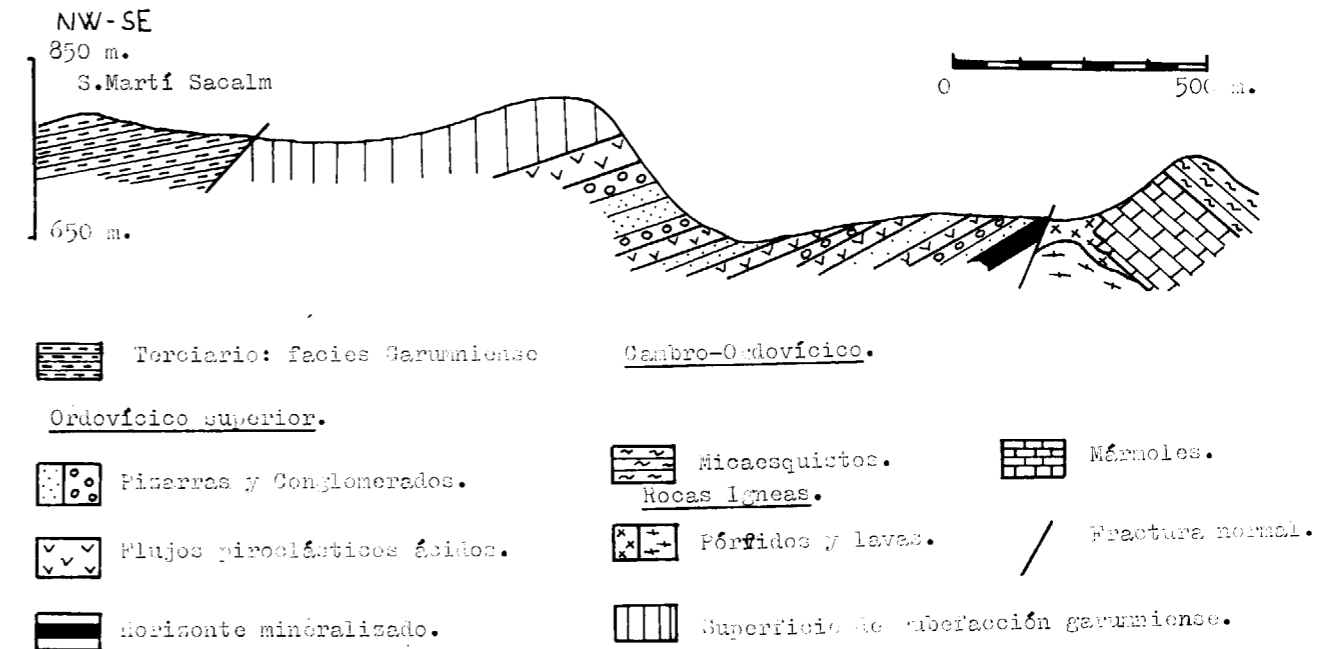


Figura 1.—Corte sintético de la mineralización de Sant Martí Sacalm.

meras, a través de fracturas normales activas que controlaban la dinámica de la cuenca sedimentaria ordovícica bajo un sistema de horst y grabens, en un régimen esencialmente distensivo.

Dentro de este contexto geodinámico se depositan los yacimientos de sulfuros masivos estratiformes tipo Sant Martí Sacalm.

SITUACION

El macizo de Les Guilleries constituye, juntamente con el de Les Gavarres, el cierre nor-oriental de las Cordilleras Costeras Catalanas. El conjunto está formado por materiales sedimentarios y volcánicos de edad paleozoica, que a veces pueden llegar a estar intensamente metamorfizados. Este conjunto está intruído por granitoides de edad post-hercínica (fig. 2).

El indicio polimetálico de Sant Martí Sacalm se encuentra a unos 9 kilómetros al oeste del municipio de Amer, en la vertiente norte del macizo. Se trata de un antiguo indicio minero de reduci-

das dimensiones (150 metros de afloramiento). Su existencia fue recogida por primera vez por MATA (1981) y FONT & VILADEVALL (1982).

En el lugar del indicio aparecen pequeñas galerías de exploración que se ubican por debajo de un gossan de unos 10-20 m. de espesor. La explotación de esta metalización se realizó, principalmente, en los años que precedieron a la guerra civil española y durante la misma.

La mineralización afecta a los materiales de la serie vulcano-sedimentaria del Ordovícico Superior (serie de Sant Martí Sacalm). También encontramos mineralizados los mármoles de la serie detrítico-caliza del Cámbrico-Ordovícico (serie de Susqueda).

CONTEXTO GEOLOGICO

El horizonte mineralizado se enclava en la base de la serie vulcano-sedimentaria del Ordovícico Superior y está controlado por una fractura regional de dirección ENE-OSO que pone en con-

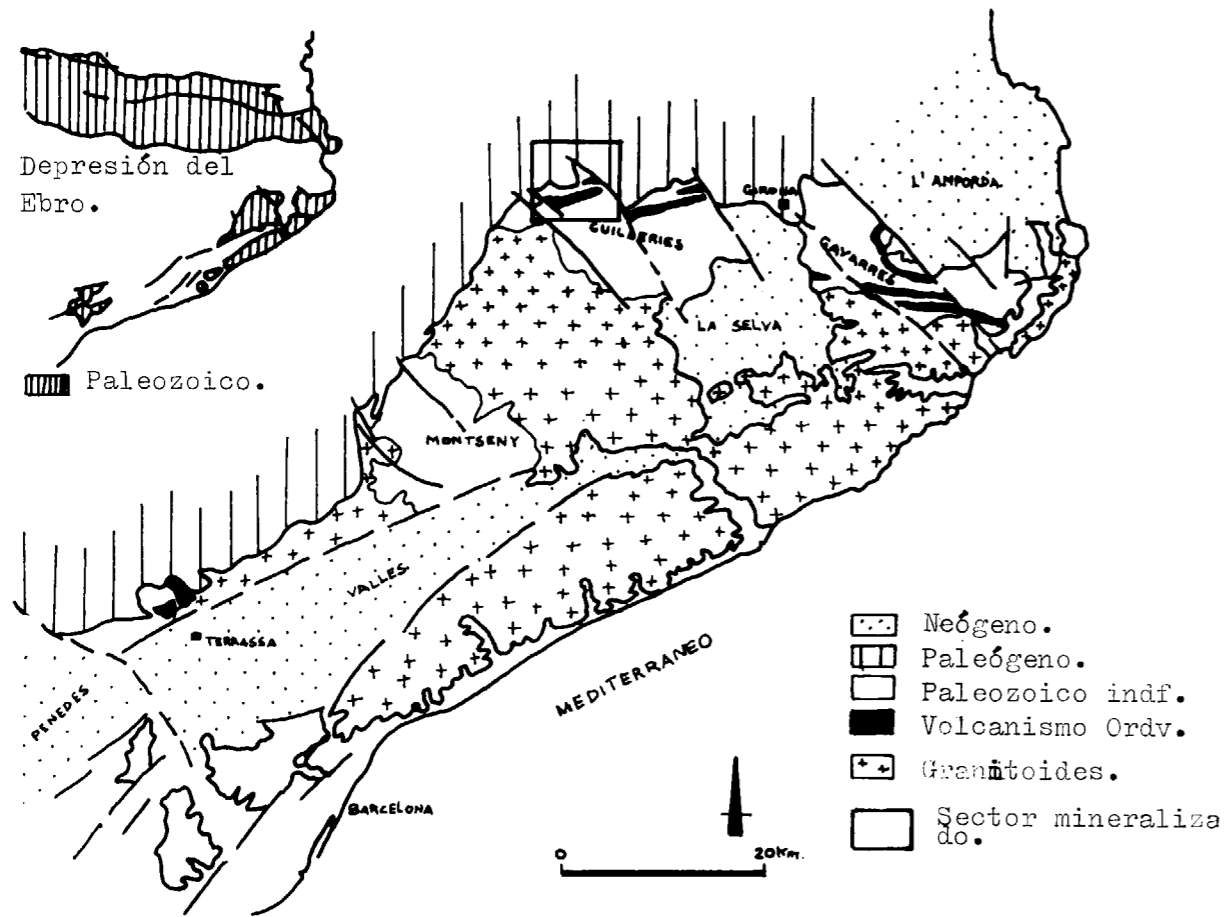


Figura 2.—Mapa de situación.

tacto a los materiales cambro-ordovícicos con esta secuencia ordovícica superior.

En el sector cartografiado la secuencia vulcano-sedimentaria constituye una serie isoclinal de dirección NE-SO que buza suavemente hacia el NO.

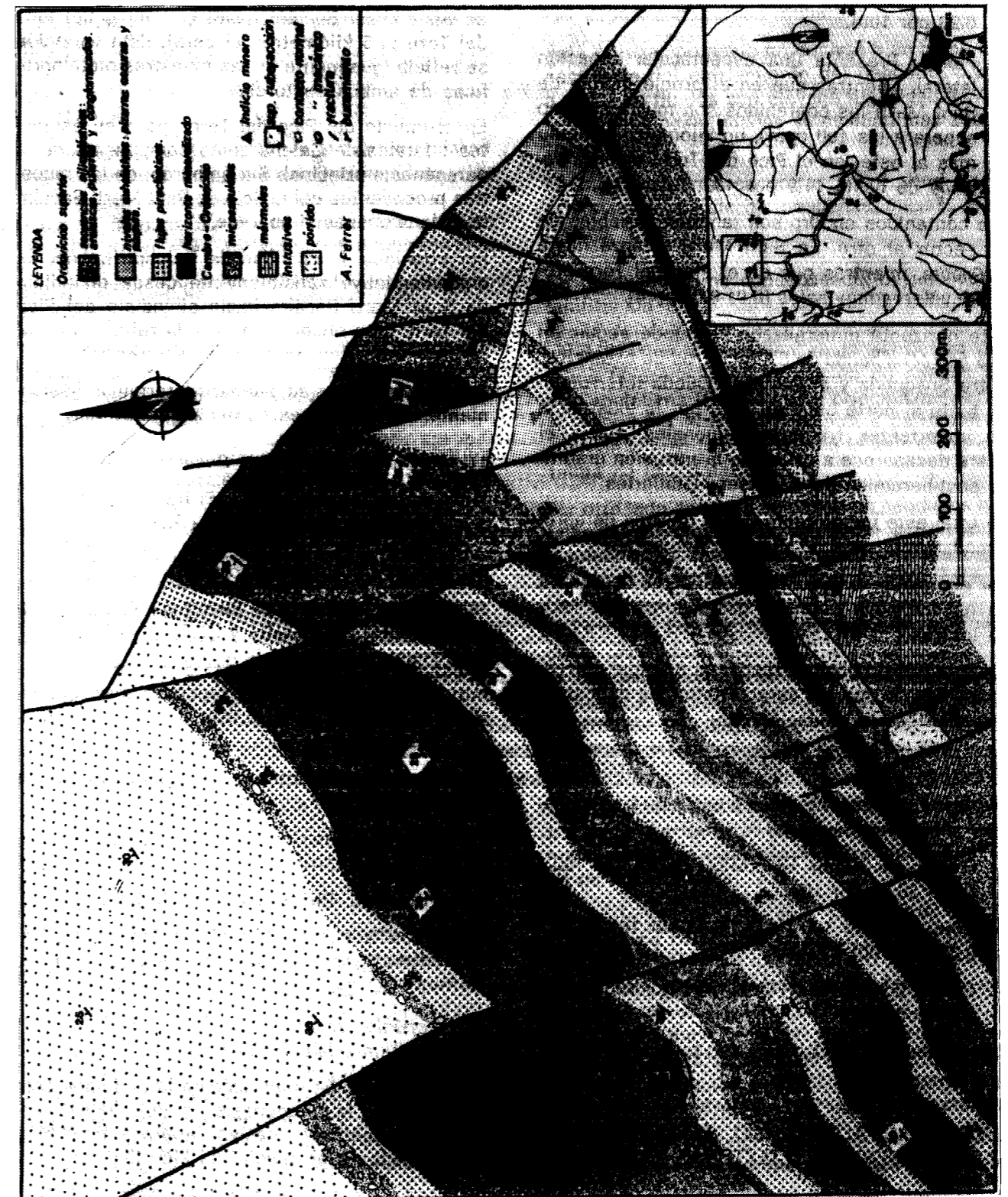
La precipitación de la masa sulfurosa se verificó en los estadios iniciales de la evolución de la cuenca del Ordovícico Superior. Se relaciona localmente con las primeras manifestaciones volcánicas del sector (coladas piroclásticas iniciales) y rápidamente cesa su deposición y es retrabajada y parcialmente desmantelada. Se pueden encontrar algunos cantos aislados de sulfuros en los primeros niveles conglomeráticos de esta secuencia.

El espesor visible de la masa mineralizada es bastante reducido y no excede de dos metros.

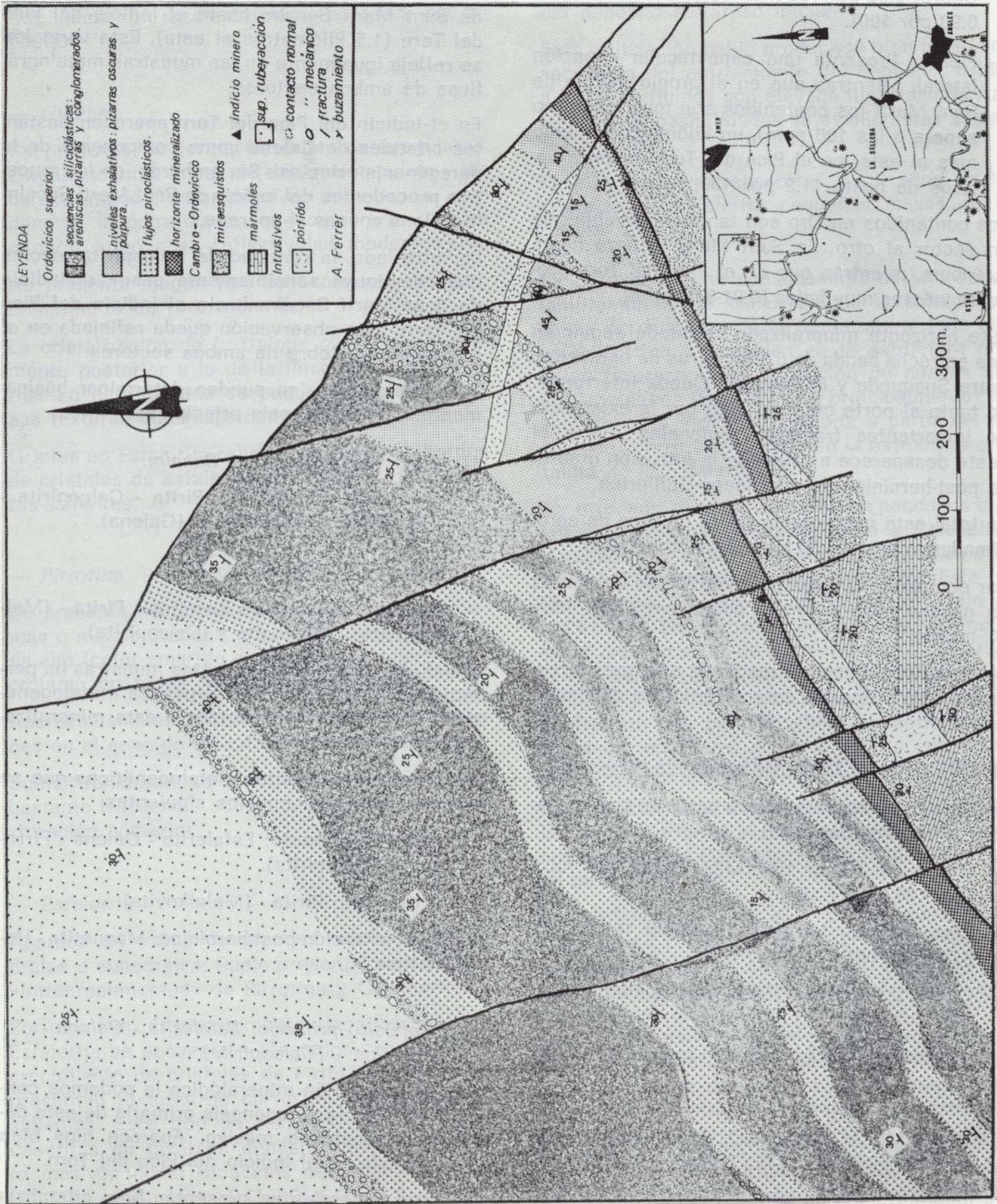
Su carácter bandeado le confiere un aspecto estratiforme. Por otro lado, está afectado por la deformación hercínica regional. Por ello es frecuente reconocer abundantes micropliegues, así como una marcada esquistosidad de tipo S_{1+2} (GIMENO & VILADEVALL, 1983).

La paragénesis principal se compone de Esfalerita-Pirrotina-Galena-Calcopirita-Pirita. La ley media obtenida en cinco muestras de mineral ha sido:

- Hierro: 30.25 por 100 (Máx.: 42.26 por 100 - Mín.: 23.14 por 100).
- Cinc: 8.28 por 100 (Máx.: 9.95 por 100 - Mín.: 7.5 por 100).



Esquema geológico de las mineralizaciones de Zn-Pb de Sant Martí Sacalm (prov. Girona).



Esquema geológico de las mineralizaciones de Zn-Pb de Sant Martí Sacalm (prov. Girona).

— Cobre: 0.35 por 100 (Máx. 0.62 por 100 - Mín.: 0.23 por 100).

— Plomo: Presenta una espectacular zonación lateral. Mientras que en el propio indicio de Sant Martí los contenidos son muy bajos (no supera a las 100 ppm), un kilómetro y medio más al este, en el Pico del Torn, alcanza valores de hasta 11.9 por 100.

Los contenidos en Oro son también variables de un sector al otro. En Sant Martí alcanza hasta 0.19 ppm, mientras que en el Pico del Torn presenta valores muy bajos (0.01-0.04 ppm).

Este horizonte mineralizado se puede seguir en una estrecha banda de 6 kilómetros de extensión, entre Susqueda y El Pasteral. Queda interrumpido tanto al norte como al este por la existencia de importantes fracturas regionales. Hacia el oeste desaparece a causa de la intrusión granítica post-hercínica del Montseny-Guillerics.

En total este metalotecto cubre un área de aproximadamente unos 50 kilómetros cuadrados.

Por encima de la masa polimetálica se desarrolla un gossan cuya potencia oscila entre los 10 y 20 metros.

La paragénesis general responde a la que corresponde a este tipo tan característico de depósitos secundarios de oxidación:

Goetita-Limonita-Jarosita-Maghemita-(Ilmenita)

Las leyes medias obtenidas a partir de tres muestras analizadas han sido:

— Hierro: 48.01 por 100 (Máx.: 60.01 por 100 - Mín.: 36.64 por 100).

— Cinc: 0.24 por 100 (Máx.: 0.48 por 100 - Mín.: 0.07 por 100).

— Cobre: 0.16 por 100 (Máx.: 0.23 por 100 - Mín.: 0.11 por 100).

Los contenidos en Oro están en torno a 0.19 ppm.

ESTUDIO METALOGRAFICO. DESCRIPCION DE LAS PARAGENESIS Y TEXTURAS PRINCIPALES

La mineralización de sulfuros polimetálicos bandeados presenta un aumento muy considerable

del contenido en Plomo desde el propio indicio de Sant Martí Sacalm hasta el indicio del Pico del Torn (1.5 kilómetros al este). Esta variación se refleja igualmente en las muestras metalográficas de ambos sectores.

En el indicio del Pico del Torn aparecen bastantes cristales de Galena como componente de la paragénesis principal. Sin embargo, en las muestras procedentes del indicio de Sant Martí Sacalm la Galena apenas si aparece.

Por otro lado, la cantidad de Calcopirita reconocida disminuye sensiblemente desde el indicio de Sant Martí Sacalm hacia el indicio del Pico del Torn. Esta observación queda reflejada en el contenido en Cobre de ambos sectores.

Por consiguiente, se pueden determinar básicamente dos paragénesis principales:

1) *Indicio de Sant Martí Sacalm:*

Esfalerita - Pirrotina - Pirita - Calcopirita - Hematites - Magnetita y (Galena).

2) *Indicio del Pico del Torn:*

Galena - Esfalerita - Pirrotina - Pirita - (Melnikovita) - Marcasita y (Calcopirita).

El estudio petrográfico de estas muestras ha permitido distinguir diversos procesos metalogénicos, los cuales caracterizan a esta mineralización polimetálica.

Los principales eventos metalogénicos que se pueden identificar son los siguientes:

— Depósito primario: Esfalerita - Galena - Pirrotina - (Calcopirita).

— Piritización: Pirita - (Melnikovita).

— Remobilización post-hercínica: Magnetita - Hematites.

A) *Depósito primario: Esfalerita - Galena - Pirrotina - (Calcopirita)*

A esta asociación mineralógica la podemos considerar como la paragénesis primaria de este depósito polimetálico masivo. Aparece muy bien desarrollada en el indicio del Pico del Torn.

Los tres minerales se presentan bien cristalizados, con cristales de tamaños similares más o

menos grandes y con abundantes puntos triples que indican un recalentamiento posterior del depósito.

— *Galena*

Se presenta en forma de cristales irregulares, con abundantes líneas de exfoliación-pulido y los característicos «triángulos de exfoliación» que denotan la poca dureza que caracteriza a este mineral junto a su reflectividad moderada-alta.

No presenta ningún tipo de exolución ni sobrecrecimiento de otro mineral.

La cristalización de la Galena puede ser ligeramente posterior a la de la Pirrotina y la Esfalerita. En este sentido se pueden observar diversas texturas que respaldan esta apreciación:

Grietas en Esfalerita rellenas de Galena o bordes de cristales de Esfalerita con texturas de entrantes-salientes.

— *Pirrotina*

Se presenta en forma de cristales subhedrales, más o menos grandes, con reflectividad moderada alta (color amarillo cremoso) y un ligero pleocroísmo en tonos suavemente rosáceos.

Aparece también formando minúsculas inclusiones en el seno de los cristales de Esfalerita.

Suele transformarse a Pirita (Melnikovita) con bastante frecuencia como consecuencia de la piritización posterior.

— *Esfalerita*

Aparece en forma de grandes cristales subhedrales a euhedrales. Suele presentar abundantes «intracrecimientos» de Pirrotina y Calcopirita.

Por otro lado, frecuentemente estos cristales de Esfalerita se encuentran afectados por el sobrecrecimiento de cristales de Pirita. En este caso presentan texturas de corrosión tipo entrantes-salientes. Este tipo de texturas, que han sido descritas en diversos depósitos metálicos tanto masivos como filonianos de todo el mundo (BASTIN et al., 1931; RAMBDHOR, 1979; CRAIG & VAUGHAN, 1981; ELDRIDGE et al., 1983) evi-

dencian en nuestro caso la piritización posterior del depósito sulfuroso inicial.

Esta piritización debió producirse bien como consecuencia del enfriamiento del depósito, o bien a partir de fluidos con elevada fugacidad de Azufre. Ambas posibilidades se evalúan más adelante en el texto.

Es muy frecuente encontrar en el seno de los cristales de Esfalerita pequeñas masas de Pirrotina.

Se producen como consecuencia de una desestabilización en la estructura de la Esfalerita a causa del aumento de la temperatura. Esta desestabilización y desorden en la estructura cristalina favorece la incorporación de nuevos átomos metálicos (Sn, Fe y Cu, principalmente). En este caso, la Pirrotina precipita a partir del exceso de Hierro incorporado en la estructura cristalina de la Esfalerita.

Por otro lado, también se observan pequeños cristales de Pirrotina alineados junto a Calcopirita siguiendo las líneas de exfoliación y planos de debilidad de los cristales de Esfalerita. Este hecho sugiere, en este caso, un origen tardío de la Pirrotina. En efecto, es posible que se produzca la precipitación de este mineral a partir de la interacción entre el cristal de Esfalerita ya formado y un fluido con elevada fugacidad de Azufre, sin que para ello sea necesario que el contenido en Hierro de la Esfalerita sea demasiado elevado (BARTON & TOULMIN, 1966).

Una característica más que muestran los cristales de Esfalerita es el hecho de presentar, a menudo, masas de Calcopirita distribuidas en el seno de sus cristales.

Es un fenómeno que sólo se observa en los cristales de Esfalerita. Se desarrolla en los planos de debilidad del mineral, pero también (indicio de Sant Martí Sacalm) aparece formando concentraciones de cristales distribuidos al azar. Es un proceso muy irregular y su distribución no sigue una pauta determinada. Es muy frecuente encontrar zonas del mineral intensamente afectadas, junto a otras aparentemente intactas.

Este fenómeno ha sido observado por numerosos autores. Sin embargo, fue BARTON (1978) quien, dándole el nombre de «enfermedad de la Esfalerita», lo describió e interpretó.

Existen diversos procesos capaces de generar texturas similares a las observadas en los fenómenos de «enfermedad de la Esfalerita»:

i) Fenómenos de exolución

Experimentalmente, WIGGINS & CRAIG (1980) demostraron que a la temperatura bajo la cual se deposita una masa de sulfuros (entre 300 y 350° C), la solubilidad del Cobre en la Esfalerita no es la suficiente como para producir cantidades significativas de Calcopirita.

ii) Precipitación simultánea de ambas fases minerales

El crecimiento desigual que muestran los cristales de ambos minerales nos induce a pensar que, de haberse formado al mismo tiempo, el mayor crecimiento de los cristales de Esfalerita hubiera inhibido y, en cierta manera, ingerido los pequeños cristales de Calcopirita. Como consecuencia de ello, actualmente observaríamos grandes cristales de Esfalerita con una pequeña zona en el centro repleta de diminutos cristales de Calcopirita. En este caso, la Calcopirita no se encontraría alineada según los planos de debilidad cristalina.

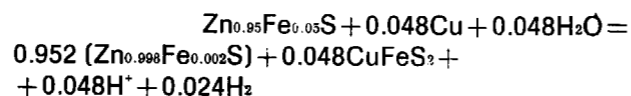
En nuestro caso, si bien es cierto que se observan texturas de este tipo, e incluso grandes masas de Calcopirita, sobre todo en el indicio de Sant Martí Sacalm. También se observan cristalizaciones de Calcopirita según las líneas de debilidad del cristal. Por ello, sin descartar este segundo proceso, nos vemos obligados a considerar un tercero.

iii) Precipitación tardía de la Calcopirita

Este proceso se enmarca dentro de un fenómeno mineralizante posterior a la deposición sulfurosa principal.

El fenómeno implica la aparición de un fluido enriquecido en Cobre. Este enriquecimiento posterior en Cobre puede haberse producido a partir de la removilización del Cobre original de los sulfuros ya depositados mediante la interacción con fluidos hidrotermales de elevada fugacidad de Azufre. Bajo estas condiciones se produce la formación y precipitación de la Calcopirita por reemplazamiento del SFe presente en la estruc-

tura de la Esfalerita. Se verifica la siguiente reacción:



Este proceso ha sido adoptado para explicar este tipo de texturas en los depósitos de sulfuros masivos tipo Kuroko (ELDRIDGE et al., 1983).

En nuestro caso, la existencia de un segundo episodio mineralizante caracterizado por un fluido con elevada fugacidad de Azufre es una posibilidad bastante factible de acuerdo con las observaciones metalográficas que hemos realizado.

B) Piritización: Pirita - (Melnikovita)

Asociado a los grandes cristales de Pirrotina observamos el desarrollo de masas de Pirita - Melnikovita (Pirita amorfa).

Se encuentran rellenando grietas y cavidades tipo «Vug», así como en los bordes y zonas de debilidad de los cristales.

Este proceso de transformación de la Pirrotina en Pirita se puede producir a partir de fluidos con una elevada fugacidad de Azufre o como consecuencia del enfriamiento del depósito. Se verifica según la reacción siguiente:



Procesos de este tipo ocurridos a temperaturas comprendidas entre 250° C y 320° C y ligados a la fugacidad de Azufre de los fluidos hidrotermales se han descrito en procesos exhalativos actuales del Mar Rojo (POTTORF & BARNES, 1983).

En nuestro caso, esta transformación es posterior a la deposición de la paragénesis primaria (Esfalerita - Galena - Pirrotina - Calcopirita). Podría sugerir la existencia de un segundo episodio mineralizante compuesto por un fluido hidrotermal con elevada fugacidad de Azufre que causaría, además de esta piritización, la «enfermedad de la Esfalerita».

Incluso se observa la presencia de venas de Pirita - Calcopirita rompiendo las texturas primarias y ocupando las porosidades tipo «Vug» (in-

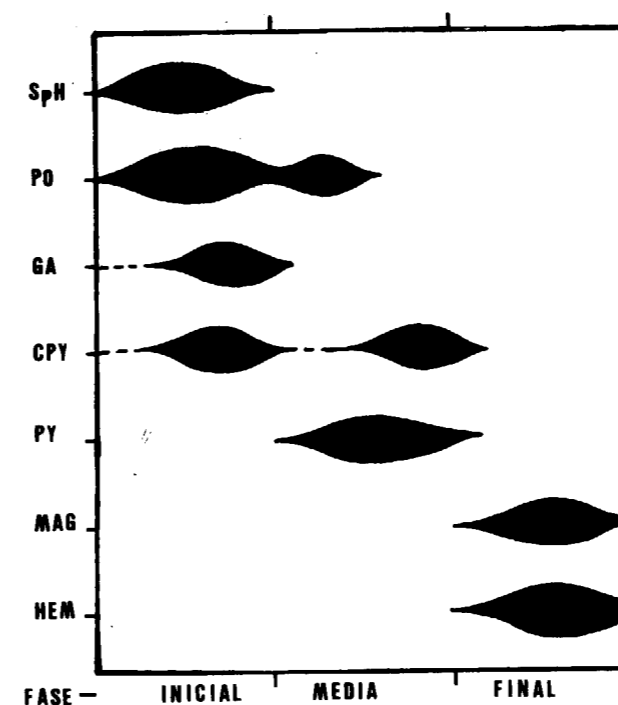
dicio del Pico del Torn). Probablemente la deposición de estos minerales esté relacionada con este tipo de fluidos mineralizantes tardíos.

C) Removilización post-hercínica: Magnetita - Hematites

Esta asociación aparece en forma de oxidación (Hematites) de los cristales de Magnetita. Este es un proceso que afecta con bastante frecuencia a este par mineralógico (GREIG et al., 1935; STANTON, 1972).

Estos minerales representan un par mineralógico típico de alta temperatura. Su formación puede deberse, en nuestro caso, a los procesos de removilización tardía generados a partir de la intrusión del cortejo de filones porfídicos post-hercínicos.

Durante el emplazamiento de estos filones cerca de las masas de sulfuros se verifican condicio-



Esquema que sintetiza la cronología relativa entre las diferentes fases minerales que aparecen en las mineralizaciones polimetálicas de sulfuros bandeados tipo Sant Martí Sacalm (indicios de Sant Martí Sacalm y Pico del Torn). Sph: Esfalerita. Po: Pirrotina. GA: Galena. Cpy: Calcopirita. Py: Pirita. Mg: Magnetita. Hem: Hematites.

nes de Presión - Temperatura lo suficientemente elevadas para producir el recalentamiento, la desestabilización y removilización de la mineralización.

CONCLUSIONES DEL ESTUDIO DE LAS PARAGENESIS Y TEXTURAS

El estudio petrográfico de las muestras pulidas permite establecer, en una primera aproximación al problema, una posible sucesión de los diferentes eventos mineralizantes que han actuado en este sector.

1) La paragénesis inicial está compuesta por Esfalerita y Pirrotina. Ambos minerales aparecen en forma de cristales bien desarrollados y están afectados por diversos procesos de desestabilización posterior.

La Pirrotina se presenta, además, como pequeñas concentraciones dentro de los cristales de Esfalerita. Se dispone según líneas de debilidad cristalina y representa un crecimiento posterior a la formación de la Esfalerita. También aparece distribuida al azar, representa en este caso una cristalización contemporánea a la formación de estos grandes cristales.

2) La Galena presenta con los minerales primarios unas relaciones texturales características: relleno de grietas, morfologías con bordes irregulares (entrantes y salientes).

Estas texturas afectan preferentemente a los cristales de Esfalerita, aunque también hemos observado texturas de entrantes y salientes sobre los cristales de Pirrotina. Estas texturas indican una deposición ligeramente posterior a la de estos dos minerales.

Se observa también, de forma bastante esporádica, una relación textural Galena - Calcopirita que indica cierta contemporaneidad.

3) Como resultado de las dos primeras conclusiones se puede proponer una paragénesis primaria compuesta por Esfalerita - Pirrotina - Galena - (Calcopirita).

Esta paragénesis experimenta notorios cambios laterales de un indicio a otro. Estos cambios se reflejan sobre todo en el conte-

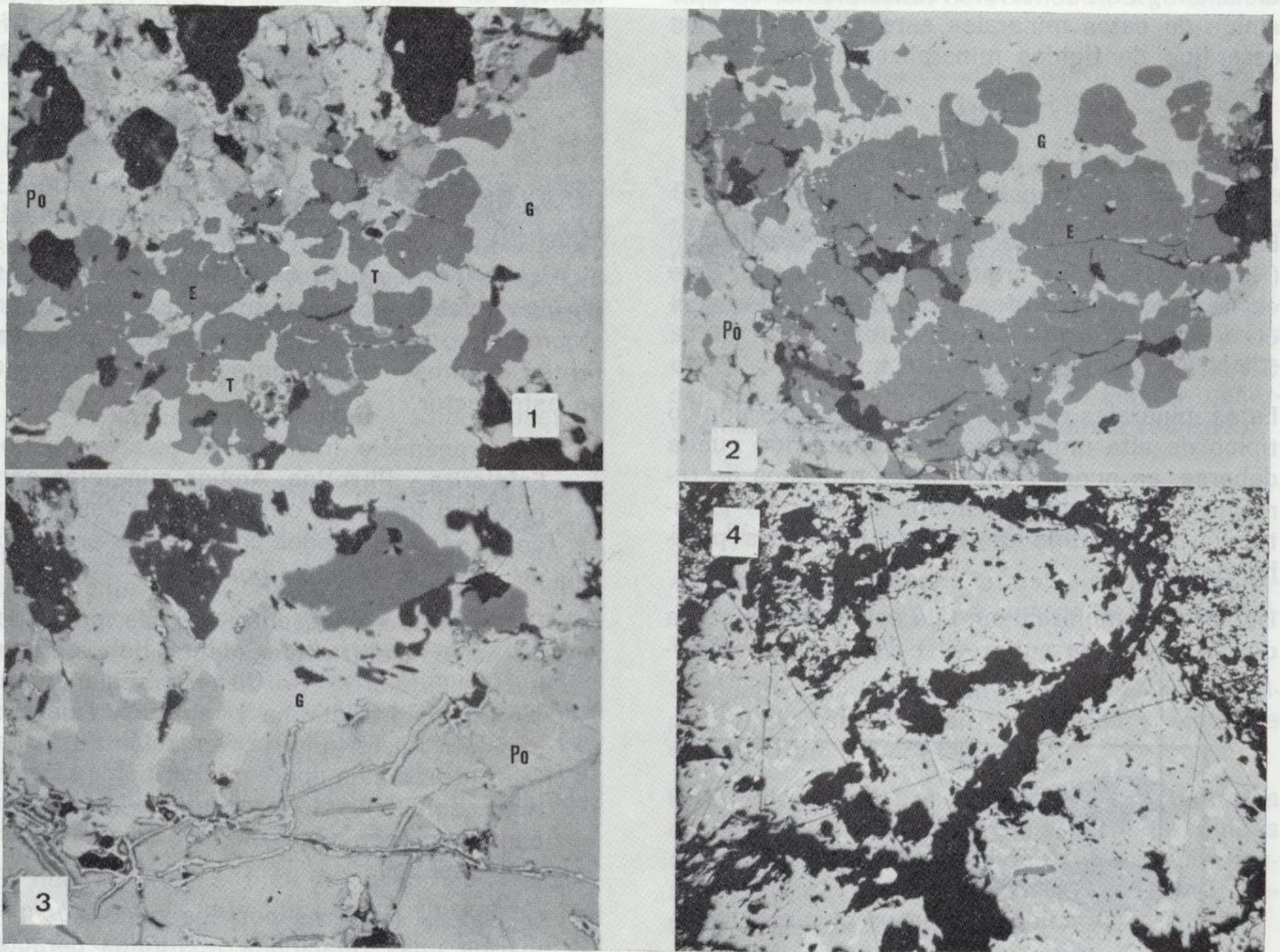


Figura 3.—Paragénesis principal y relaciones texturales.

- 1.—Aspecto general de la paragénesis principal en el indicio del Pico del Torn. (Muestra I-19 A ($\times 16$, la longitud mayor equivale a 0.5 mm.).
 - La Pirrotina (Po) está afectada por piritización (Py).
 - La Esfalerita (E) tiene intracrecimientos de Pirrotina (Po) y Calcopirita (Cpy).
 - La Galena (G) presenta texturas en golfos («entrantes y salientes») respecto a la Esfalerita (E) y Pirrotina (Po).
 - Se pueden observar en varios sectores la existencia de puntos triples (T) entre la Galena (G) y la Esfalerita (E).
- 2.—Detalle de la relación textural Esfalerita (E) - Galena (G). Muestra I-19 A (Pico del Torn) ($\times 16$, long. mayor equivale a 0.5 mm.).
 - La Galena (G) aparece rellenando las fracturas que afectan a los cristales de Esfalerita (E) y presenta típicas texturas de corrosión («entrantes y salientes»). Estas texturas se observan también sobre la Pirrotina (Po).
 - Se pueden observar puntos triples entre la Esfalerita (E) y la Galena (G). Este hecho evidencia el recalentamiento de esta paragénesis.
- 3.—Detalle de la relación textural Pirrotina (Po) — Galena (G). Muestra I-19 A (Pico del Torn) ($\times 16$).
 - La Galena (G) presenta texturas tipo («entrantes y salientes») sobre los grandes cristales de Pirrotina (Po).
 - La Pirrotina (Po) presenta una ligera e incipiente sulfurización que se traduce en la precipitación de Pirita (Py) en las grietas.
- 4.—Relación textural Esfalerita (E) - Calcopirita (Cpy). Muestra I-18 (Sant Martí Sacalm) ($\times 4$, longitud mayor equivale a 2 mm.).
 - Abundantes masas de Calcopirita (Cpy) dispersas en el seno de los cristales de Esfalerita.

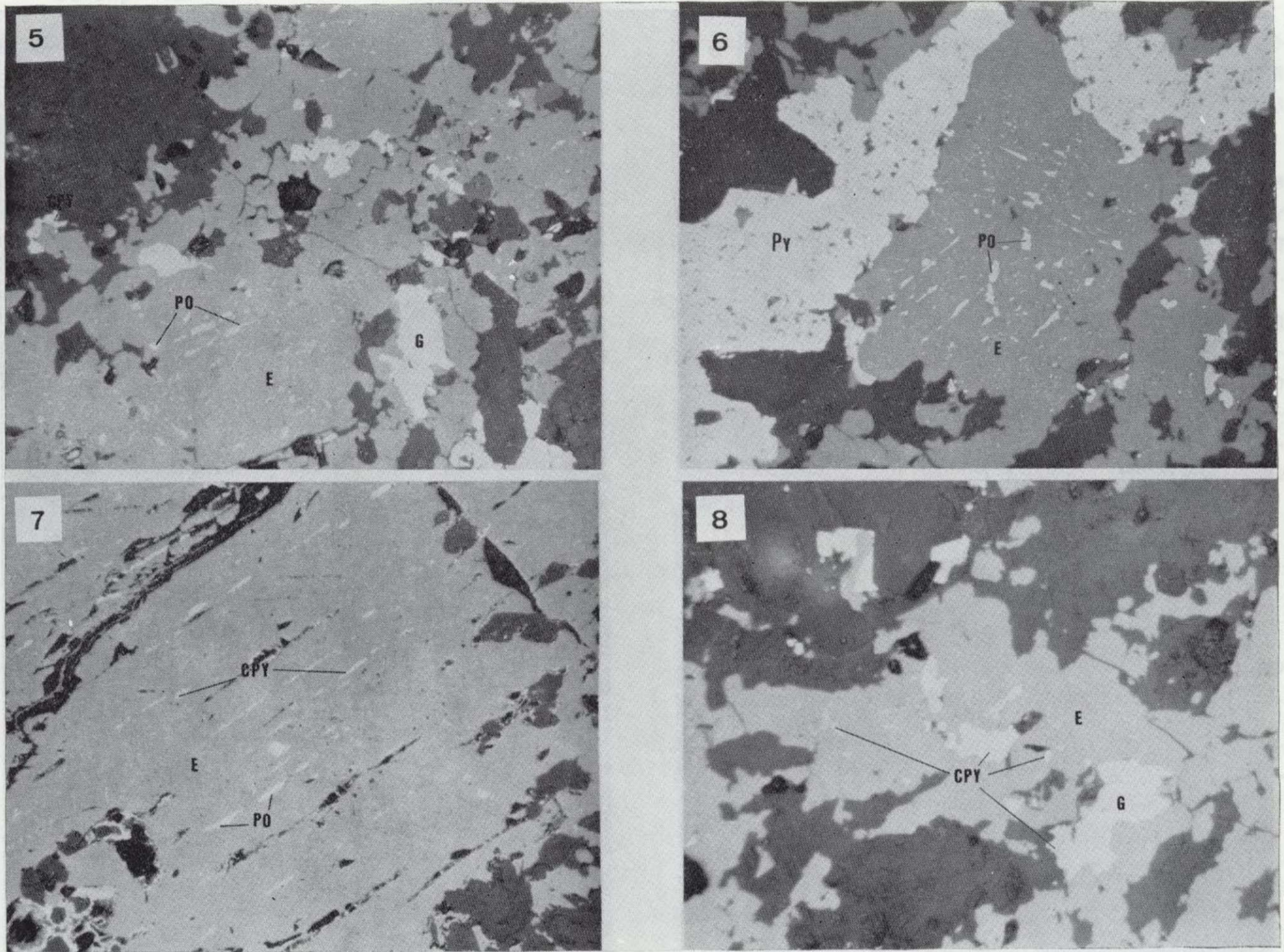


Figura 4.—Paragénesis principal. Enfermedad de la Esfalerita.

- 5.—Aspecto general de la paragénesis principal Esfalerita-Galena-Pirrotina-Calcopirita. Indicio del Pico del Torn. Muestra I-19 3C ($\times 16$).
- Cristales de Esfalerita (E) con intracrecimientos de Pirrotina (Po) que se alinean según las líneas de debilidad del cristal.
 - Calcopirita (Cpy) rodeando a Esfalerita (puntos triples).
- 6.—«Enfermedad de la Esfalerita». Muestra I-19 3C (Pico del Torn) ($\times 16$).
- La Pirrotina (Po) se desarrolla siguiendo las líneas de debilidad cristalina de la Esfalerita (E).
 - Pirita (Py) afectando a la Esfalerita (E) dando texturas de corrosión («entrantes y salientes»).
- 7.—«Enfermedad de la Esfalerita». Muestra I-18 C (Sant Martí Sacalm) ($\times 16$).
- La Pirrotina (Po) y la Calcopirita (Cpy) se desarrollan según las líneas de debilidad cristalina de la Esfalerita (E).
- 8.—Relación textural entre la Calcopirita (Cpy) y la Esfalerita (E). Indicio Pico del Torn. Muestra I-19 3C ($\times 16$).
- Crecimiento sincrónico de la Calcopirita-Esfalerita y Galena (Ga).
 - Puntos triples entre Galena-Calcopirita-Esfalerita.

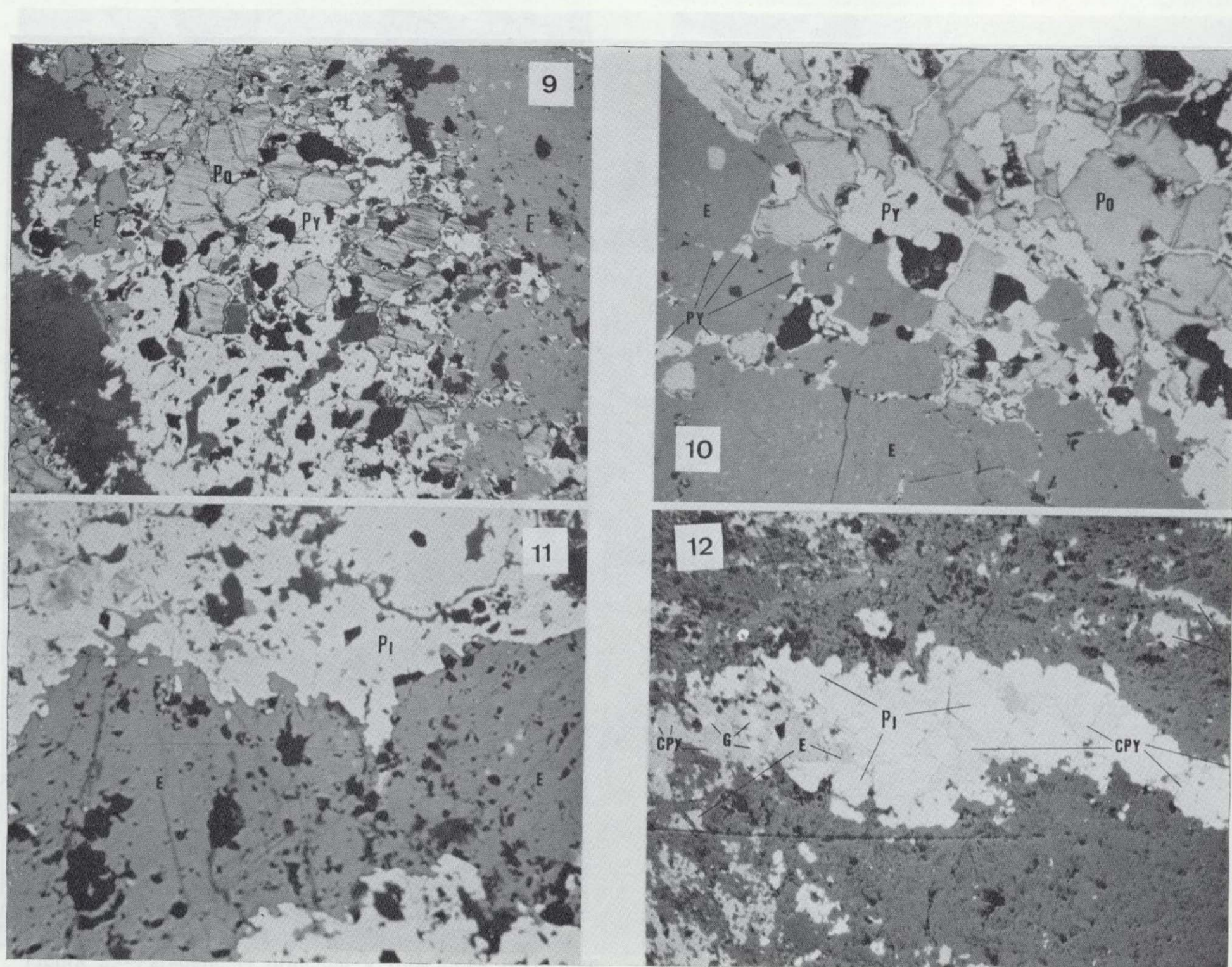


Figura 5.—Procesos de sulfidización.

- 9.—Procesos de sulfidización (piritización). Indicio del Pico del Torn. Muestra I-19 3A ($\times 4$, long. máxima, 2 im.).
— La Pirita (Py) afecta principalmente a la Pirrotina (Po) y en menor grado a la Esfalerita (E).
- 10.—Detalle del proceso de sulfidización (piritización) afectando a cristales de Pirrotina. Indicio del Pico del Torn. Muestra I-19 A ($\times 16$, long. máxima, 0.5 mm.).
— La Pirita (Py) se concentra en los bordes de los cristales de Pirrotina (Po) y en las grietas. Afecta también, aunque en menor grado, a los cristales de Esfalerita (E).
- 11.—Detalle de la sulfidización (piritización) afectando a cristales de Esfalerita (E). Indicio del Pico del Torn. Muestra I-19 B) ($\times 4$, long. máxima, 2 mm.).
— La Pirita (Pi) afecta a cristales de Esfalerita dando texturas de corrosión tipo «entrantes y salientes».
- 12.—Indicio del Pico del Torn. Muestra I-19 3B ($\times 4$).
— Pirita (Pi) cristalizada en cubos y Calcopirita (Cpy) relleno las grietas y cavidades tipo «Vug» de la mineralización principal con Esfalerita (E)-Galena (G) y Calcopirita (Cpy).

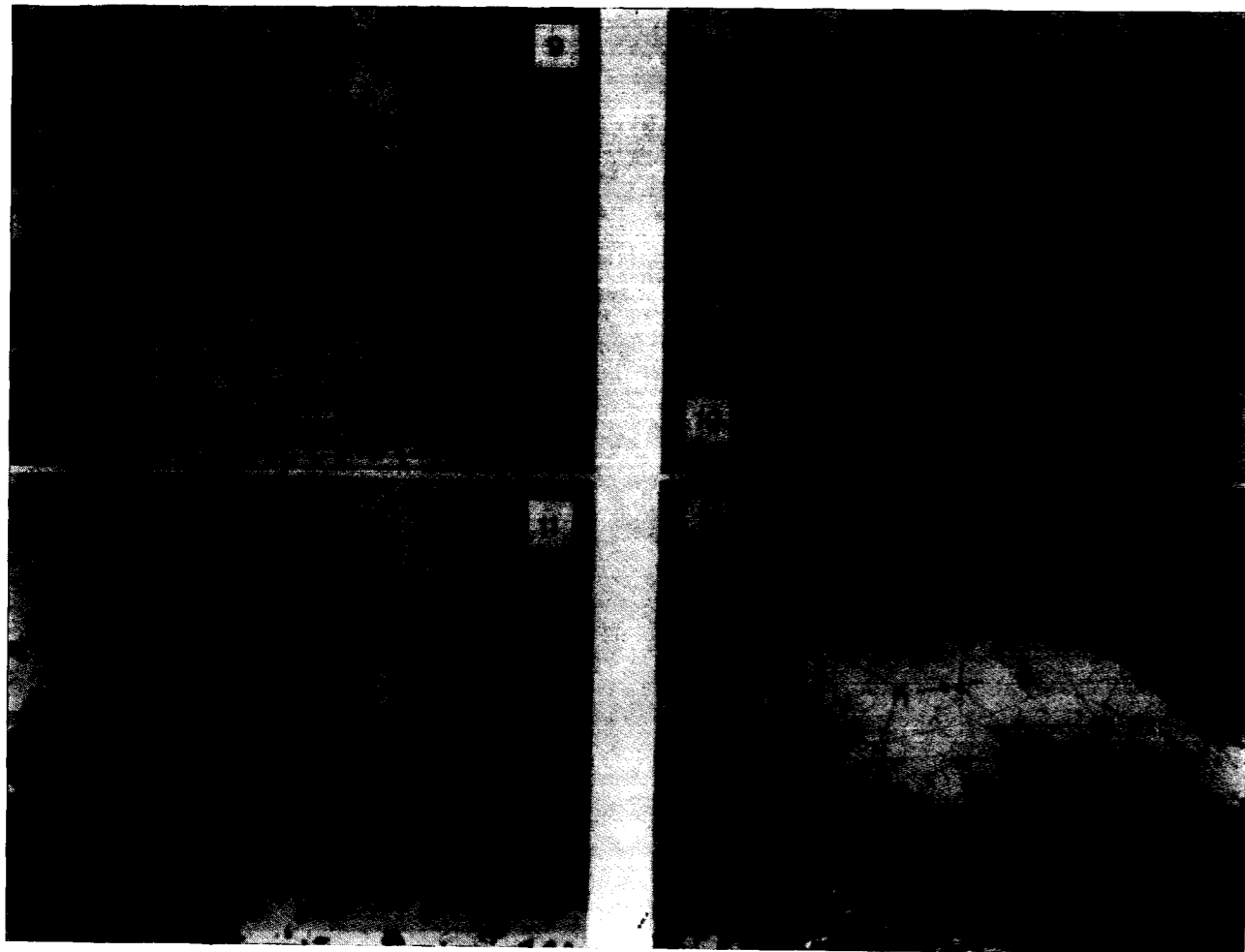


Figura 5.—Procesos de sulfidización.

- 9.—Procesos de sulfidización (piritización). Indicio del Pico del Torn. Muestra I-19 3A ($\times 4$, long. máxima, 2 im.).
— La Pirita (Py) afecta principalmente a la Pirrotina (Po) y en menor grado a la Esfalerita (E).
- 10.—Detalle del proceso de sulfidización (piritización) afectando a cristales de Pirrotina. Indicio del Pico del Torn. Muestra I-19 A ($\times 16$, long. máxima, 0.5 mm.).
— La Pirita (Py) se concentra en los bordes de los cristales de Pirrotina (Po) y en las grietas. Afecta también, aunque en menor grado, a los cristales de Esfalerita (E).
- 11.—Detalle de la sulfidización (piritización) afectando a cristales de Esfalerita (E). Indicio del Pico del Torn. Muestra I-19 B) ($\times 4$, long. máxima, 2 mm.).
— La Pirita (Pi) afecta a cristales de Esfalerita dando texturas de corrosión tipo «entrantes y salientes».
- 12.—Indicio del Pico del Torn. Muestra I-19 3B ($\times 4$).
— Pirita (Pi) cristalizada en cubos y Calcopirita (Cpy) rellenando las grietas y cavidades tipo «Vug» de la mineralización principal con Esfalerita (E)-Galena (G) y Calcopirita (Cpy).

nido en Galena y la forma de aparecer de la Calcopirita.

- 4) En el indicio de Sant Martí Sacalm apenas existe Galena y la Calcopirita muestra rasgos texturales que indican contemporaneidad respecto a la paragénesis primaria.

En el indicio del Pico del Torn la Galena es francamente abundante y la Calcopirita aparece asociada a texturas que indican procesos de desestabilización de los minerales preexistentes.

- 5) Se produce un segundo episodio mineralizante que origina sobre los sulfuros primarios una desestabilización, con la aparición de nuevas fases minerales y removilización de las ya existentes.

Precipitan Pirita, Melnikovita, Marcasita, Calcopirita y Pirrotina.

Los principales efectos que resultan de la desestabilización de los minerales primarios son los siguientes:

- Alteración de la Pirrotina a Pirita - Melnikovita.
- Precipitación de Pirrotina y Calcopirita en el interior de los cristales de Esfalerita («enfermedad de la Esfalerita»). Siguen las líneas de exfoliación y debilidad cristalina.
- Precipitación de Pirita rellenando fracturas y cavidades tipo «Vug».
- Precipitación de Calcopirita - Pirita rellenando pequeñas fracturas.

Básicamente existen dos fenómenos que pueden generar este tipo de procesos de desestabilización: Enfriamiento del depósito mineral o irrupción, en el sistema mineralizante, de fluidos con elevada fugacidad de Azufre.

Sin embargo, la observación de ciertas texturas: Precipitación de Pirrotina y Calcopirita en los planos de exfoliación de la Esfalerita, la removilización del cobre y la existencia de abundantes puntos triples entre los cristales de los minerales primarios, nos induce a proponer la existencia de un segundo episodio mineralizante caracterizado

por fluidos de elevada temperatura y con elevada fugacidad de Azufre.

- 6) Como consecuencia de la intrusión post-hercínica del cortejo de pórfidos se produce la desestabilización y removilización de la masa de sulfuros.

Aparecen asociaciones minerales típicas de alta temperatura (Magnetita - Hematites) y se producen mineralizaciones skarnoides en los mármoles de la serie cambro-ordovícica.

- 7) El gossan que se desarrolla sobre la masa de sulfuros es bastante pobre desde el punto de vista económico. Se han identificado principalmente minerales oxidados de hierro (Maghemita), minerales de alteración (Jarosita), restos de Ilmenita y algún fragmento de Esfalerita.

AGRADECIMIENTOS

Al Servei Geològic de Catalunya por el apoyo económico e informático recibido.

Al Dr. Carles Ayora y Albert Solé por su colaboración en el estudio metalográfico y observaciones sobre los aspectos genéticos.

REFERENCIAS

- BARTON, P. B. & TOULMIN (1966): *Phase relations involving Sphalerite in the Fe-Zn-S System*. Econ. Geol., vol. 61, pp. 815-849.
- BASTIN, E. S.; GRATON, L. C.; LINDGREN, W.; NEWHOUSE, W. H.; SCHWARTZ, G. M. & SHORT, M. N. (1931): *Criteria of age relations of minerals with special reference to polished section of ores*. Econ. Geol., vol. 26, pp. 561-610.
- CRAIG, J. R. & VAUGHAN, D. J. (1981): *Ore microscopy and ore petrography*. John Wiley & Sons, N. Y., 406 pp.
- DURAN, H. (1985): *El Paleozoico de Les Guilleries*. Tesis Doctoral inédita, U. A. B.
- ELDRIDGE, C. S.; BARTON Jr., U. B. & OHMOTO, H. (1983): *Mineral textures and their bearing on formation of the Kuroko ore-bodies*. In: OHMOTO & SKINNER (Eds.): *The Kuroko and related volcanogenic massive sulfide deposits*. Econ. Geol. Mon., 5, pp. 241-281.
- FERRER MODOLELL, A. E. (1989a): *El vulcanismo calcoalcalino del Ordovícico Superior de los macizos de Les Guilleries y Les Gavarres (Cordilleras Costeras Catalanas, prov. Girona) y sus mineralizaciones asociadas: Me-*

canismos eruptivos, metalogenia y prospección geoquímica. Tesis Doctoral, U. B., 2 tomos.

FERRER MODOLELL, A. E. (1989b): *Aspectos metalogénicos ligados al vulcanismo explosivo calco-alcalino del Ordovícico Superior en los macizos de Les Guilleries y Les Gavarres (Cordilleras Costeras Catalanas)*. XI Reunión de Geol. y Min. del NO peninsular. O Castro (A Coruña), 20-25 de noviembre de 1989 (abstract).

FERRER, A. E., y MARTI, J. (1989): *Caracterización geoquímica de los depósitos volcánicos del Ordovícico Superior de los macizos de Les Guilleries y Les Gavarres (Cordilleras Costeras Catalanas)*. III Congr. de Geoquímica de España, pp. 1-85 a a 1-96. Soria, septiembre de 1989.

FONT, X., y VILADEVALL, M. (1982): *Les minéralisations de F, Ba, Pb, Zn de la region du Montseny-Guilleries (Catalogne - Espagne) et leur contexte geologique*. Bull. BRGM. Sect. II, núm. 3, p. 289.

GIMENO, D., y VILADEVALL, M. (1983): *Las mineralizaciones estratiformes en Fe-Zn-Pb-Cu-(W) y en Pb del Cambro-*

Ordovícico del macizo de Les Guilleries (Girona). Rev. Inv. Geol., vol. 36, pp. 121-133.

GREIG, J. W.; POSNJAK, E.; MERWIN, H. E. & SOSMAN, R. B. (1935): *Equilibrium relationships of Fe₃O₄, Fe₂O₃ & Oxigen*. Amer. Jour. Sci., vol. 230, pp. 239-316.

MATA PERELLO, J. M. (1981): *Els minerals de Catalunya*. Tesis Doctoral inédita, U. B.

POTTORF, R. J. & BARNES, H. L. (1983): *Mineralogy, geochemistry and ore genesis of hydrothermal sediments from the Atlantis II deep Red Sea*. In: OHMOTO & SKINNER (Eds.): *The Kuroko and related volcanogenic massive sulfide deposits*. Econ. Geol. Mon., 5, pp. 198-223.

RAMDOHR, P. (1979): *The ore minerals and their intergrowths*. Pergamon Press.

STANTON, R. L. (1982): *Ore petrology*. McGraw-Hill Co., 713 pp.

WIGGINS, L. B. & CRAIG, J. R. (1980): *Reconnaissance of the Cu-Fe-Zn-S system: Sphalerite phase relationships*. Econ. Geol., vol. 75, pp. 742-751.

Original recibido: Noviembre de 1989.

Original aceptado: Mayo de 1991.

Aplicación de métodos estadísticos uni y multivariantes a estudios de contaminación. El caso de la Cubeta de La Llagosta.

Por X. FONT CISTERO (*) y A. NAVARRO FLORES (**)

RESUMEN

La utilización de técnicas estadísticas multivariantes (análisis de componentes principales, cluster, análisis factoriales, regresión múltiple, etc.) se está convirtiendo en una herramienta habitual en los estudios hidrogeoquímicos.

Un ejemplo ilustrativo de la aplicación de las técnicas multivariantes a los estudios de contaminación de aguas subterráneas se ha llevado a cabo en el estudio de la contaminación del acuífero de la Cubeta de La Llagosta (Barcelona). En esta zona existen múltiples focos contaminantes (vertederos incontrolados, polígonos industriales, vertidos a los cauces, etc.), cuyos efectos se superponen, de forma que con las técnicas hidroquímicas clásicas es difícil evaluar la incidencia de cada foco sobre la calidad final del agua.

La utilización del análisis de componentes principales y el análisis factorial sobre los parámetros físico-químicos del agua nos ha permitido sopesar la importancia de cada foco en la contaminación global y empezar a conocer los procesos que originan la contaminación del acuífero.

Palabras clave: Contaminación, Microcontaminantes orgánicos, Metales pesados, Análisis multivariante, Discriminación, Componentes principales, Focos contaminantes.

ABSTRACT

Multivariate analysis (principal component analysis; cluster; factorial analysis) is becoming a frequent support for hydrogeochemical studies. The use of multivariate techniques has been applied to the groundwater contamination of La Llagosta Basin. In this area, several foci of contamination (uncontrolled fill-ins; industrial locations; uncontrolled dumping into rivers) add their effects to the groundwater.

Preliminary results indicated that the classical hydrogeochemical methods, were not good enough to discriminate each individual effect of those foci of contamination in the water quality. The application of principal component analysis and factorial analysis over physico-chemical parameters of the groundwater, has contributed to evaluate the impact of each focus of contamination and to deduce the contamination mechanisms.

Key words: Contamination, Organic micropollutants, Heavy metals, Multivariate analysis, Discrimination, Principal component, Foci of contamination.

INTRODUCCION

La exploración geoquímica es la aplicación de los principios y métodos geoquímicos y biogeoquímicos en la búsqueda de depósitos minerales económicos, de petróleo y gases naturales (pro-

spección geoquímica «sensu stricto»), así como en la detección de procesos de contaminación que afectan a los seres vivos (geoquímica ambiental).

Los métodos estadísticos uni y multivariantes son una herramienta habitual en la exploración geoquímica que obedece no sólo a la necesidad de gestionar una cantidad ingente de datos geoquímicos, condensándolos y expresándolos de forma que permitan una aproximación más racional a los resultados finales de la prospección,

(*) Dpto. Geoquímica, Petrología y Prospección Geológica. Universidad de Barcelona. Zona Universitaria Pedralbes. 08071 Barcelona.

(**) Dpto. Mecánica de Fluidos. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Catalunya. c/ Colón, 7. 08222 Terrassa (Barcelona).

sino también por el grado de información adicional que estos métodos proporcionan.

Con una óptica similar a la utilizada en prospección geoquímica, cuya finalidad es el detectar e interpretar anomalías originadas por concentraciones o acumulaciones anormales de ciertos elementos en el ambiente geoquímico supergénico, se ha abordado este estudio, que tiene por objetivo aplicar estos métodos estadísticos en la interpretación de los resultados analíticos de las aguas subterráneas de la cubeta de La Llagosta.

La calidad del agua subterránea del acuífero aluvial de la cubeta de La Llagosta ha ido sufriendo, a lo largo de estos últimos años, un progresivo deterioro, destacando las alarmas producidas por la aparición de Cr (VI) y otros metales en zonas próximas a vertederos incontrolados, y la de microcontaminantes orgánicos en zonas industriales.

Desde los años 60 se ha venido desarrollando en la zona una intensa extracción de áridos, que, una vez finalizada la actividad, los agujeros creados se han utilizado como vertederos incontrolados, tanto de residuos urbanos como industriales, por falta de infraestructuras de saneamiento y gestión de los mismos.

Estos focos de contaminación múltiples, unidos al impacto de los polígonos industriales, han provocado una importante contaminación en las aguas subterráneas, cuyo estudio no es fácilmente abordable desde la óptica hidroquímica clásica, por lo cual se intenta utilizar técnicas estadísticas uni y multivariantes usadas en los estudios de prospección geoquímica para diferenciar los distintos mecanismos geoquímicos que provocan valores anómalos, y que pueden considerarse equivalentes a los mecanismos que provocan una contaminación en el agua subterránea.

1. MARCO GEOGRAFICO Y SOCIOECONOMICO

La Cubeta de La Llagosta, situada en el límite entre las comarcas del Vallés Oriental y Occidental (Barcelona), constituye la unidad hidrogeológica más importante de la cuenca del río Besós. Está limitada por el estrecho de Montmeló al norte y el estrecho de Montcada al sur, recogiendo el agua de los principales afluentes del Besós (fig. 1).

La cubeta ocupa una superficie asimilable a un rectángulo de 7 × 2 kilómetros, orientado de NE a SO y encajado entre la Cordillera Litoral y los suaves relieves de la Depresión del Vallés. El sistema acuífero mejor desarrollado y más explotado de la cubeta corresponde al aluvial del río Besós. Este acuífero, que hasta fechas relativamente recientes era drenado por el Besós, actualmente queda casi totalmente desconectado, debido al intenso régimen de explotación al que ha sido sometido, con el consiguiente descenso de los niveles piezométricos por debajo del nivel del río, así como a la acción impermeabilizante de los fangos depositados en el fondo del río.

La evolución demográfica de la población de la cubeta viene marcada por un notable crecimiento en los últimos veinticinco años (más de cien mil habitantes según el Censo de 1985), resultado de la intensa industrialización experimentada en toda la región a partir de los años 60, y que ha tenido una evidente repercusión en la explotación del acuífero.

El tipo de industria asentada en la cubeta es muy variado, estando representados casi todos los sectores, en particular el químico, metalúrgico, plásticos, curtidos, textil, materiales de construcción, papel, alimentación, etc. La ubicación de estas industrias carece de la planificación adecuada, habiendo primado la especulación del suelo sobre las condiciones idóneas de implantación.

El Censo de industrias realizado por la Diputació de Barcelona (1986) e INTECSA (1985) da un total de 289 empresas, con 14.187 empleados, y un consumo declarado de agua subterránea de 2.7 hectómetros cúbicos por año (inferior al real).

La actividad agrícola, que fue predominante hasta la década de los 60, ocupando la mayor parte del suelo disponible, ha dejado paso a la industria, que poco a poco ha ido ocupando los terrenos dedicados a la agricultura, en especial los de regadío, y en particular los situados cerca de los ríos.

Actualmente sólo subsisten algunos cultivos de cereales, forrajes, patatas y pequeños huertos.

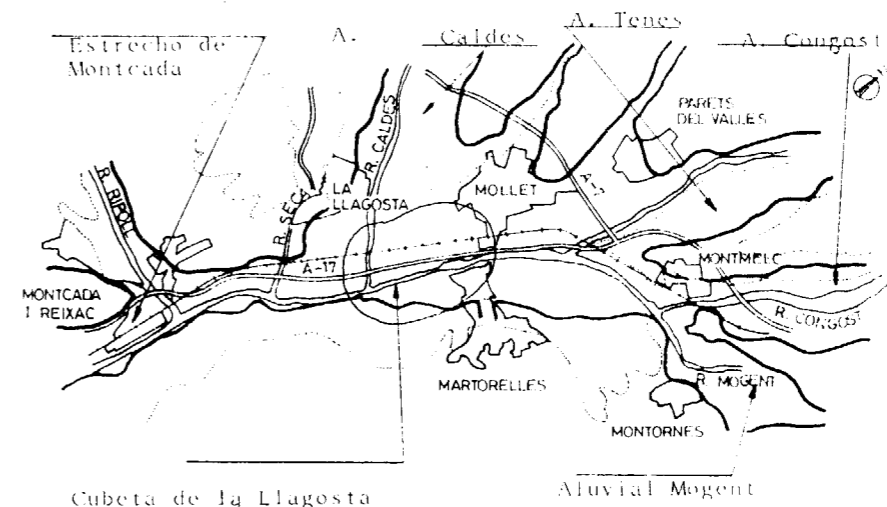
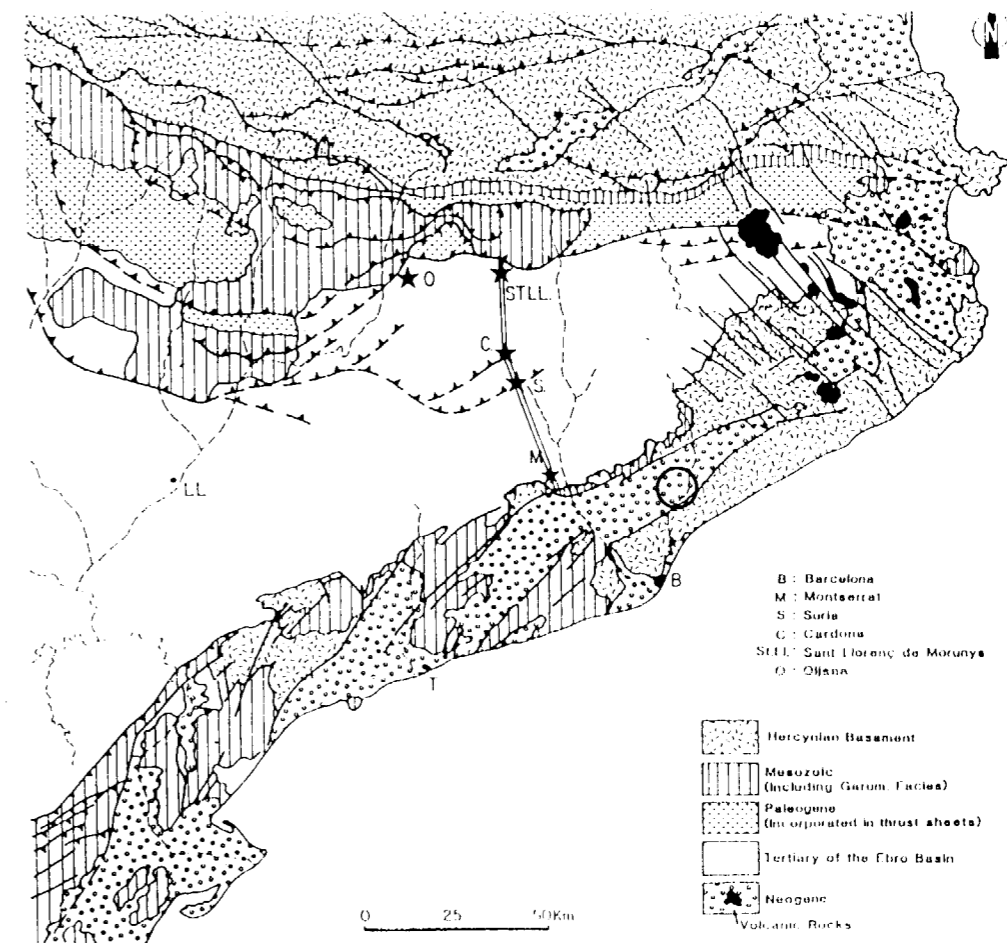


Figura 1.—Marco geológico general y situación de la Cubeta de La Llagosta (esquema geológico según ANADON et al., 1989).

2. HIDROGEOLOGIA Y CARACTERIZACION DE LAS FORMACIONES ACUIFERAS

En la cuenca media del Besós existen fundamentalmente tres sistemas acuíferos: el granítico, el miocénico y el cuaternario aluvial. Tanto el acuífero granítico como el miocénico, por su poca continuidad y su baja permeabilidad, tienen importancia sólo localmente.

El acuífero cuaternario aluvial, en cambio, está muy desarrollado y ocupa prácticamente toda la superficie de la cubeta. Está constituido por las terrazas media e inferior del río Besós y formado por gravas y arenas aluviales sin apenas matriz arcillo-limosa, en la base, y limos y arenas finas en la parte superior. Todo el conjunto se apoya sobre un sustrato impermeable constituido por los materiales miocenos (fig. 2).

Este acuífero aluvial se considera, en general, como libre, aunque localmente se puede comportar como semiconfinado por la existencia de capas limosas y arcillosas superficiales. Los valores de transmisividad, obtenidos a partir de caudales específicos, nos dan un intervalo de valores acotados entre 100 y 1.400 m²/día. La porosidad eficaz es del orden del 10 por 100, estimándose la capacidad útil de embalse en unos 13 Hm³.

Las extracciones del acuífero aluvial se estiman en 8.3 Hm³ para 1988, que sólo cubren el 50 por 100 del agua demandada, correspondiendo el 50 por 100 restante a los aportes externos del trasvase de la cuenca del río Ter.

El estudio de las isobatas de la base impermeable (fig. 3) indica la existencia de dos paleocanales principales situados a ambos lados del trazado actual del río, en donde la potencia de los materiales aluviales supera los 12 m.

Estos dos paleocanales se unen a la altura de la Riera Seca, después de recibir al paleocanal de la Riera de Caldes, que posiblemente es un doble paleocauce separado por un estrecho umbral central.

A partir de la Riera Seca tenemos un único paleocauce con un espesor medio de 12-14 m. de materiales aluviales, y que parece proseguir incluso más allá del estrecho de Montcada, hacia el acuífero deltáico.

FUNCIONAMIENTO DEL ACUIFERO ALUVIAL Y BALANCE HIDRICO

El acuífero aluvial funciona como un sistema complejo en el que las entradas más importantes son los aportes subterráneos de los acuíferos de las cuencas tributarias y la infiltración del agua del río Besós. Las salidas son fundamentalmente los bombeos y las salidas subterráneas por el estrecho de Montcada.

Para un año medio, las magnitudes del balance del acuífero aluvial pueden ser aproximadamente las siguientes (NAVARRO, 1989):

Entradas:

Infiltración de agua superficial (2.7 Hm³) + infiltración de la precipitación (1.7 Hm³) + entradas subterráneas (4.8 Hm³) + entradas Mioceno y retorno de riegos (0.2 Hm³) = 9.4 Hm³.

Salidas:

Bombeos (8.6 Hm³) + salida subterránea (0.8 Hm³) = 9.4 Hm³.

3. CARACTERISTICAS HIDROQUIMICAS DE LAS AGUAS. CONTAMINACION Y FOCOS CONTAMINANTES

Entre abril y mayo de 1988 se realizó una campaña de muestreo, analizándose un total de 29 muestras de pozos y tres de agua de río (fig. 2). Se determinaron los siguientes parámetros físico-químicos: color, turbidez, pH, conductividad, residuo seco, iones mayoritarios, detergentes, CN⁻, Fe, Al, Cr-VI, Ni, Cu, Zn, Cd, Sb, Pb, Mn, As, Hg, y en 17 muestras más representativas también se determinaron fenoles, amoníaco e hidrocarburos aromáticos policíclicos.

Los resultados analíticos indican una composición química bastante homogénea para todo el acuífero aluvial (NAVARRO, 1989). Se trata de aguas cloruradas cálcicas, muy mineralizadas y con una dureza total bastante elevada. Las relaciones iónicas usuales no presentan en general variaciones significativas, observándose cierta diferenciación en áreas concretas, destacando el marcado incremento del índice Kr (proporcional al CO₂ disuelto en equilibrio) en zonas de vertido incontrolado.

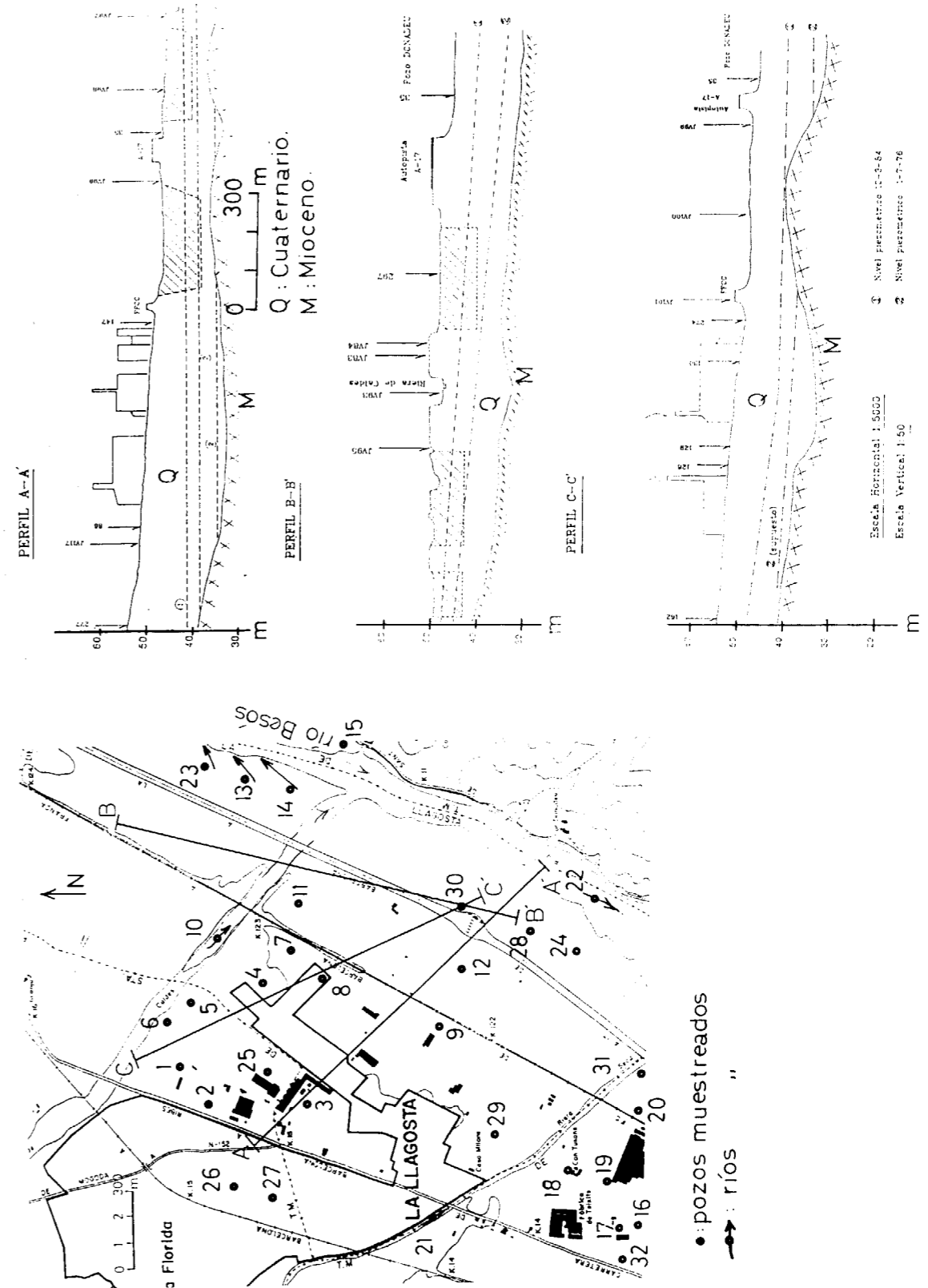


Figura 2.—Mapa de situación de puntos de muestreo y perfiles del acuífero aluvial de la Cubeta de La Llagosta (en rayado las áreas de relleno).

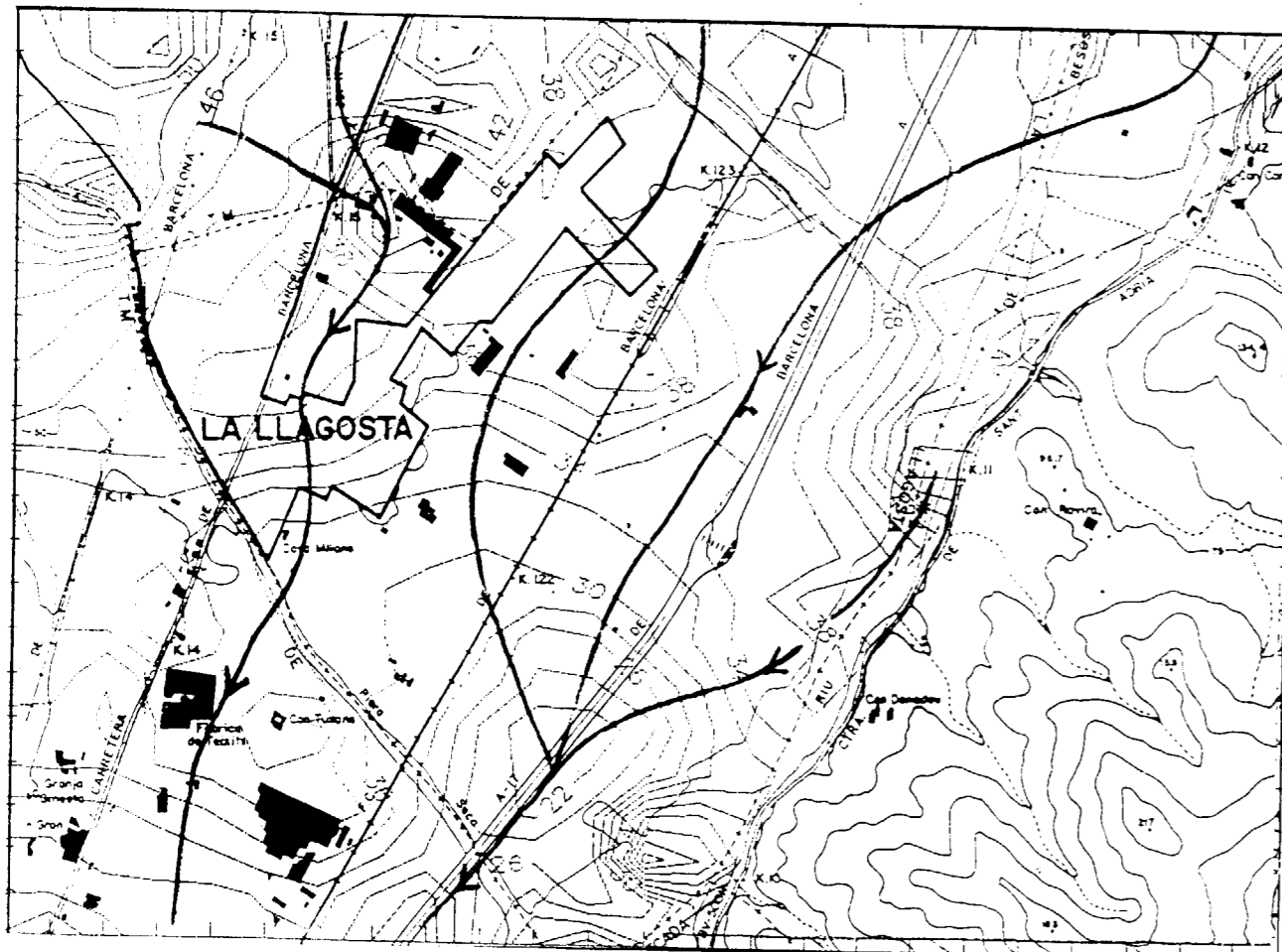


Figura 3.—Mapa de isobatas del área central de la Cubeta de La Llagosta (en punteado, curvas de la base impermeable del acuífero, y en trazo grueso, zona más profunda de los paleocanales).

Por otra parte, el estudio de la distribución de los valores de ciertos parámetros como conductividad, cloruros, nitratos, etc., permite una primera evaluación de la influencia de los distintos focos contaminantes: áreas de relleno, polígonos industriales, etc.

Así, los máximos valores de conductividad se alcanzan en las zonas de relleno situadas a ambos lados de la autopista A-17 y en un pequeño sector, posiblemente también relleno, al sur del área de estudio. En las zonas de relleno se alcanzan puntualmente valores superiores a los 2.500 μ s. por centímetro y superiores a los 2.000 μ s. por centímetro en toda la extensión de los rellenos. La zona de baja conductividad localizada junto a la Riera Seca está originada posiblemente por la infiltración de aguas poco salinas.

La distribución de los valores de cloruros es muy similar a la de la conductividad, las mayores concentraciones se sitúan junto a las áreas de relleno, en las que superan los 200 mg/l. de Cl^- . En el borde del acuífero y en las áreas próximas a la Riera Seca tenemos concentraciones entre los 30 y 80 mg/l.; en cambio, el contenido de Cl^- de la Riera de Caldes es muy parecido al del agua subterránea (unos 225 mg/l.), mientras que el río Besós y Riera Seca son sensiblemente superiores (328 y 374 mg/l., respectivamente) a los del agua subterránea.

En cuanto a los nitratos (fig. 4) los contenidos generalmente superan los 50 mg/l., en la mayor parte de la zona estudiada, situándose los máximos en los polígonos industriales y áreas urbanizadas.

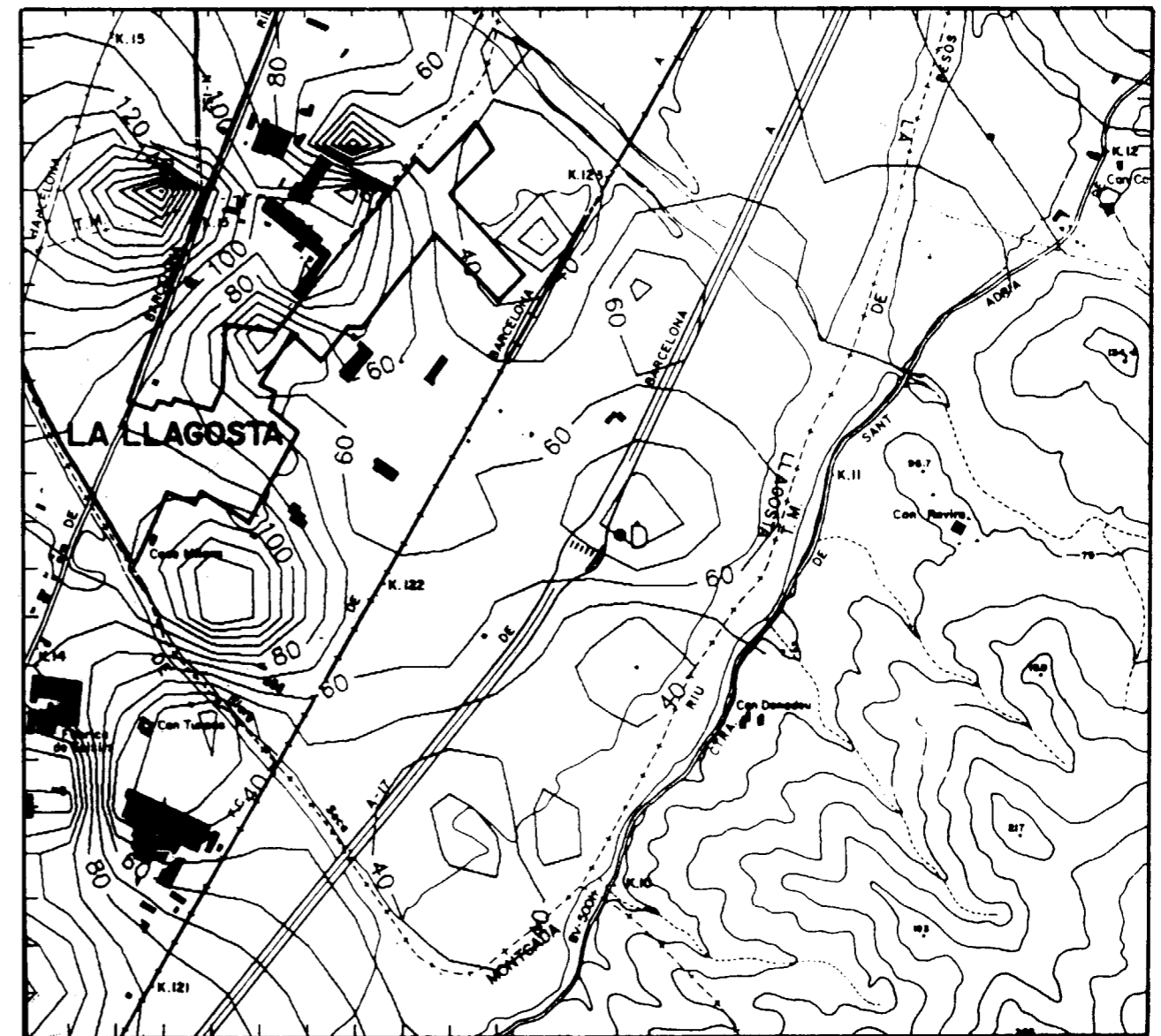


Figura 4.—Mapa de isonitratos (equidistancia de las curvas: 10 ppm).

Los metales pesados presentan una distribución condicionada específicamente por cada tipo de foco contaminante; así, el Zn, Cd y también el As-Sb presentan las mayores concentraciones en pozos ubicados junto a las industrias del sector metalúrgico. Mientras, el Pb, Cr-VI y Ni adquieren mayor importancia, en cuanto a extensión e intensidad de la contaminación junto a las zonas de relleno, especialmente la situada al lado de la autopista A-17.

FOCOS CONTAMINANTES

En líneas generales, a escala de la totalidad del acuífero aluvial, los focos que provocan la contaminación de las aguas subterráneas son múltiples y pueden sintetizarse a grandes rasgos en cinco grupos principales:

Vertederos municipales de residuos sólidos

Existen en la cubeta los siguientes: el de Mollet,

Sant Post y Montornés. Los dos últimos se ubican sobre las terrazas aluviales, constituyendo focos continuos de polución.

Rellenos de antiguas extracciones de áridos

La zona afectada por las extracciones alcanza una superficie de 175 Ha, lo que representa un 12 por 100 de la extensión total del acuífero. En general, la profundidad excavada alcanza el nivel piezométrico, pudiendo evaluarse la profundidad media de explotación entre 6-8 m. En este supuesto el volumen extraído se aproximaría a 14 Hm³, algo más del 8 por 100 del volumen total del acuífero.

Estas cavidades se han rellenado con residuos de toda índole, pero esencialmente con residuos industriales y urbanos, originándose un proceso de lavado de los rellenos, coincidiendo con el ascenso del nivel freático y la consiguiente aparición de lixiviados.

Vertidos industriales incontrolados

Proceden de las pérdidas de las redes de saneamiento de los polígonos de la cubeta, así como de los tanques e instalaciones de almacenamiento y de algún pozo de inyección.

Actividades agrícolas

Son muy reducidas; en la cubeta se limitan a ocasionar un incremento de los niveles de NO₃ en el acuífero.

Infiltración de los ríos

El papel de éstos parece reducirse a un aumento de la salinidad del acuífero en las áreas de mayor recarga inducida, si bien este fenómeno está minimizado por la estacionalidad de las avenidas, origen de la mayor parte de la recarga. En períodos de avenida el agua que se infiltra es de calidad similar a la del agua subterránea.

4. TRATAMIENTO ESTADISTICO DE LOS RESULTADOS

4.1. ANALISIS ESTADISTICO ELEMENTAL

El análisis estadístico elemental o análisis univariante es básico en cualquier estudio geoquí-

mico y en particular en el estudio de resultados hidroquímicos. Su finalidad es determinar el modelo de distribución que siguen las diversas variables analizadas y calcular los parámetros que nos permitan definir el fondo y umbral de anomalía de estas variables en el conjunto de datos considerados.

Un análisis univariante detallado y exhaustivo de las distintas variables, y más si se combina con el análisis bivariante, permite algunas veces prever muchos de los resultados determinados con métodos mucho más sofisticados de análisis multivariante.

Son dos las leyes de distribución que siguen fundamentalmente los resultados geoquímicos: la normal y la lognormal. La primera asocia a cada valor de una variable aleatoria continua su frecuencia absoluta y la segunda la asocia a los logaritmos de los valores. En geoquímica el modelo de distribución más generalizado para los elementos denominados mayoritarios es el normal; en cambio, los elementos minoritarios o traza siguen predominantemente el modelo lognormal. En los resultados hidroquímicos cabe esperar, por tanto, un comportamiento similar, es decir, los iones mayoritarios seguirían un modelo de distribución normal y los iones minoritarios y elementos traza un modelo lognormal.

Para determinar si una población sigue un modelo de distribución normal o lognormal existen diversos métodos y tests, tanto gráficos como numéricos; de estos últimos los más utilizados son: dispersión de los valores de tendencia central (media aritmética, moda y mediana), cálculo de la asimetría e índice de apuntamiento (curtosis), el test de chi-cuadrado, etc.

Cuando las poblaciones estudiadas son complejas, caso frecuente en estudios hidrogeoquímicos, el grado de seguridad alcanzado por los métodos numéricos no es muy elevado, de ahí que se haya utilizado el método gráfico, que, aunque más laborioso de ejecución, permite una rápida visualización de la ley de distribución y de los principales parámetros estadísticos.

Este método gráfico consiste en: 1) construcción del histograma de frecuencias, que permite una información visual rápida del rango de valores de la población y del valor de tendencia central,

así como la dispersión de los demás valores con respecto a aquél; y 2) construcción de la curva de frecuencias acumuladas en papel probabilístico.

Una vez definida la ley de distribución que siguen los resultados analíticos, podemos, a partir de la gráfica identificar la existencia de una o más poblaciones en este conjunto original, así como también calcular directamente el fondo y umbral de anomalía.

Esta metodología, básicamente utilizada en los estudios de exploración geoquímica aplicados a la prospección minera (HAWKES y WEBB, 1962; LEPETIER, 1969; NICHOL et al., 1970; REEDMAN, 1980; FONT, 1983) tiene también su aplicación en los estudios hidrogeológicos, en especial los dirigidos a la detección y localización de focos contaminantes.

Las áreas con problemas de contaminación pueden considerarse, desde el punto de vista geoquímico, como zonas con concentraciones de elementos traza en niveles no deseables. Estos niveles, bien sea por exceso o por defecto, tienen o pueden llegar a tener una incidencia perjudicial en uno o varios de los conjuntos que integran los ecosistemas de estas áreas. Así, un foco contaminante no es más que una anomalía en el ambiente geoquímico supergénico, que está

generando contenidos anómalos en ciertos elementos y cuyo halo de dispersión es detectado en las aguas subterráneas.

En principio, todas las técnicas utilizadas en prospección hidrogeoquímica, en cuanto se ocupan de medir, relacionar e interpretar los contenidos en elementos traza de las aguas naturales, serán capaces de evidenciar la existencia de áreas con valores anómalos en ciertos elementos, contribuyendo a su localización e incluso delimitación.

La utilización del análisis univariante en estudios hidrogeológicos, con una metodología similar a la expuesta, tiene un antecedente en VILLARROYA (1986), que utilizó la gráfica de frecuencias acumuladas para identificar las diferentes poblaciones que se deducían de las distribuciones lognormales de los resultados analíticos de cloruros, sulfatos y nitratos, como elementos que mejor reflejaban los procesos de contaminación.

En la Cubeta de La Llagosta se ha aplicado la metodología univariante, tal y como se aplica en prospección geoquímica, en las muestras de la campaña de 1988 (tabla I). En esta tabla puede apreciarse cómo prácticamente todos los iones mayoritarios siguen el modelo de distribución normal (fig. 5), incluso el nitrato, que comúnmente se ha clasificado como un ión minoritario, y

TABLA I

Principales parámetros estadísticos de las variables analizadas (elementos mayoritarios en ppm y los metales pesados en ppb)

Variable	Distribución	Media	Moda	Mediana	Desviación	Asimetría
CO ₃ H	normal	428	445	466	173	-0.51
SO ₄	normal	412	225	212	116	0.62
Cl	normal	187	189	184	94	0.11
NO ₃	normal	58	0	58	46	0.42
Na	normal	127	163	123	58	0.22
K	lognormal	6.5	4.5	6.4	1.7	0.24
Ca	normal	161	170	176	68	-0.13
Mg	normal	40	47	44	19	-0.15
Fe	lognormal	36.8		25	4.5	0.76
Mn	lognormal	18.9		13	4.8	0.55
Zn	lognormal	42.5	61	51	3.6	-0.26
Cu	lognormal	13.8	28.5	18	3.1	-0.15
As	lognormal	1.7	2	1.4	0.9	0.88
Ni	lognormal	10.5		9	11.5	-0.02
Cr (6)	lognormal	8	4.8	5	3.8	2.15

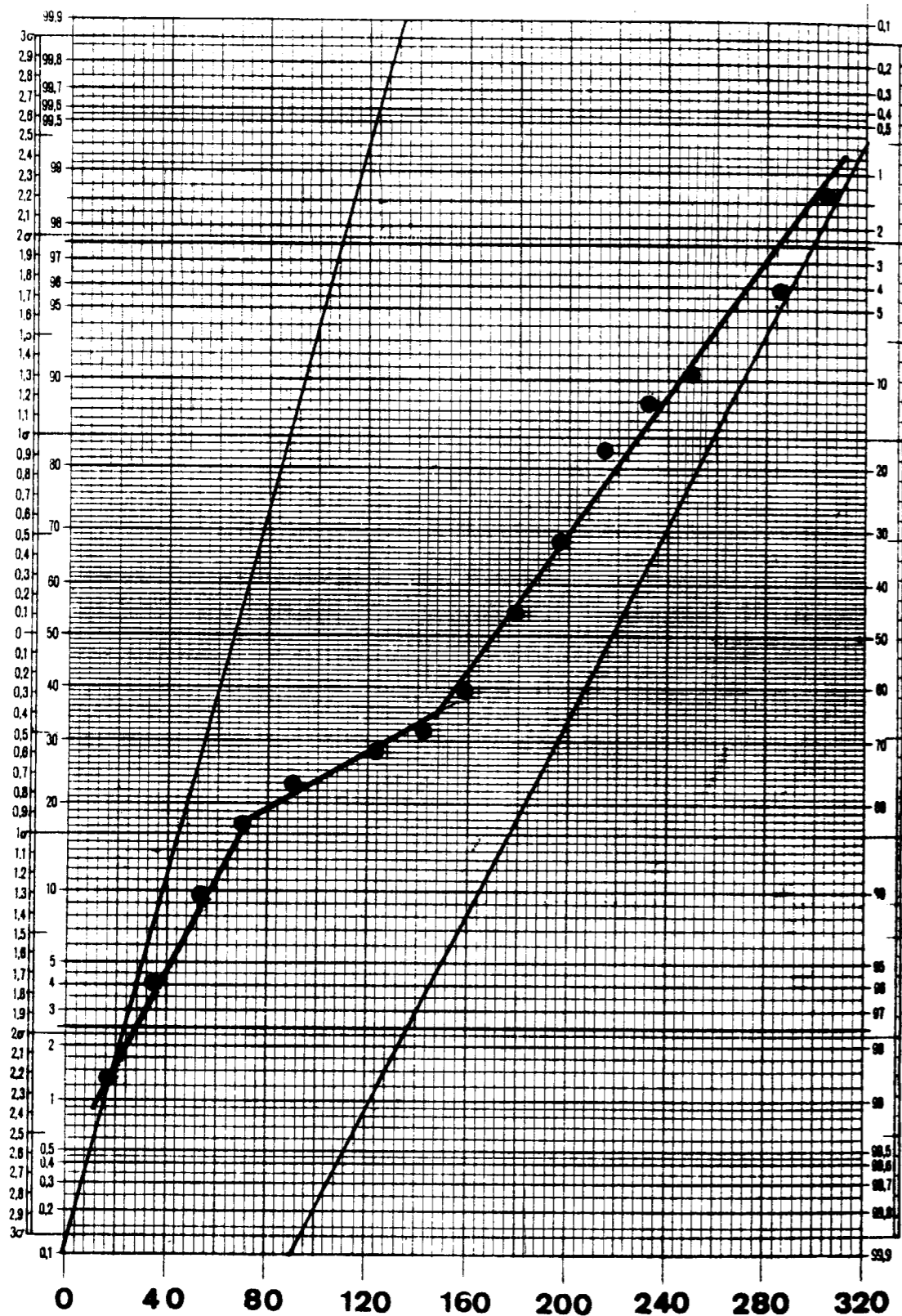


Figura 5.—Diagrama aritmético-probabilístico del calcio.

por tanto susceptible de seguir un modelo log-normal. El único elemento que no se adapta a esta distribución es el ión potasio, que, debido a su comportamiento geoquímico y al rango de valores que presenta, puede considerarse como más afín a los elementos traza. En cambio, puede apreciarse cómo todos los metales pesados expresados en esta tabla siguen un modelo claramente lognormal (tabla I y fig. 6).

A partir de las gráficas de frecuencias acumuladas construidas para todos los elementos analizados se han calculado los valores de fondo y umbral de anomalía (tabla II).

TABLA II

Valores de fondo y umbrales de anomalías de las variables analizadas (elementos mayoritarios en ppm y metales pesados en ppb)

Variable	Fondo	Umbral de anomalía
CO ₃ H	450	590
SO ₄	212	300
Cl	180	278
NO ₃	52	105
Na	119	181
K	6.6	13.2
Ca 1)	71	100
Ca 2)	192	236
Mg	40	60
Fe	92	275
Zn	40	158
Cu	25	52
Ni	10	35
Mn	11	123
Cr (VI)	1	9
As	1.1	3

La noción de fondo geoquímico de un elemento dado representa el intervalo de valores que toman los contenidos de éste en un medio determinado no contaminado o no mineralizado. El valor de fondo viene dado por la intersección en la recta de frecuencias acumuladas con la ordenada del 50 por 100. En el caso de una distribución normal este valor coincide con gran aproximación con la media aritmética. Si la distribución es lognormal, el fondo calculado a partir de la gráfica de frecuencias acumuladas coincide con la media geométrica.

El umbral o umbrales de anomalía representan el límite superior de las fluctuaciones de los valores de fondo; es, por tanto, función del fondo y de la dispersión que presenta la distribución. La medida de la dispersión es de gran importancia en la determinación del umbral de anomalía, ya que dos poblaciones que tengan el mismo valor de fondo, pueden tener distintos umbrales si sus coeficientes de desviación son distintos.

A partir de los umbrales de anomalías determinaremos las muestras que se apartan de la norma o fondo regional, que corresponderán a las muestras afectadas por procesos de contaminación. Si el número de muestras es lo suficientemente representativo, desde el punto de vista estadístico, esta aproximación es mucho más realista que la que se usa en los estudios habituales de contaminación, es decir, determinar las muestras que superan los estándares de calidad comúnmente utilizados. Con este procedimiento, y con un análisis muy detallado de los distintos contenidos en elementos mayoritarios y traza, se pueden detectar procesos muy sutiles de contaminación o incluso los estadios iniciales de ciertas contaminaciones generalizadas (fig. 7).

4.2. ANALISIS MULTIVARIANTE: FUNDAMENTOS Y APLICACIONES

El análisis multivariante es la rama de la estadística y del análisis de datos que estudia, interpreta y elabora el material estadístico sobre la base de un conjunto de $n > 1$ variables (CUADRAS, 1981). A grandes rasgos los distintos métodos de análisis multivariante se diferencian entre sí según el área de aplicación (una o varias poblaciones) o por la intervención de uno o varios grupos de variables.

El análisis de componentes principales (ACP) y el análisis factorial

Son muy similares, siendo su finalidad primordial extraer en forma condensada la mayoría de la información contenida en una población. El fundamento de la aplicación del ACP es reemplazar las variables iniciales correlacionadas por unas nuevas variables independientes (factores o componentes principales), que son combinación lineal de las variables iniciales. Los facto-

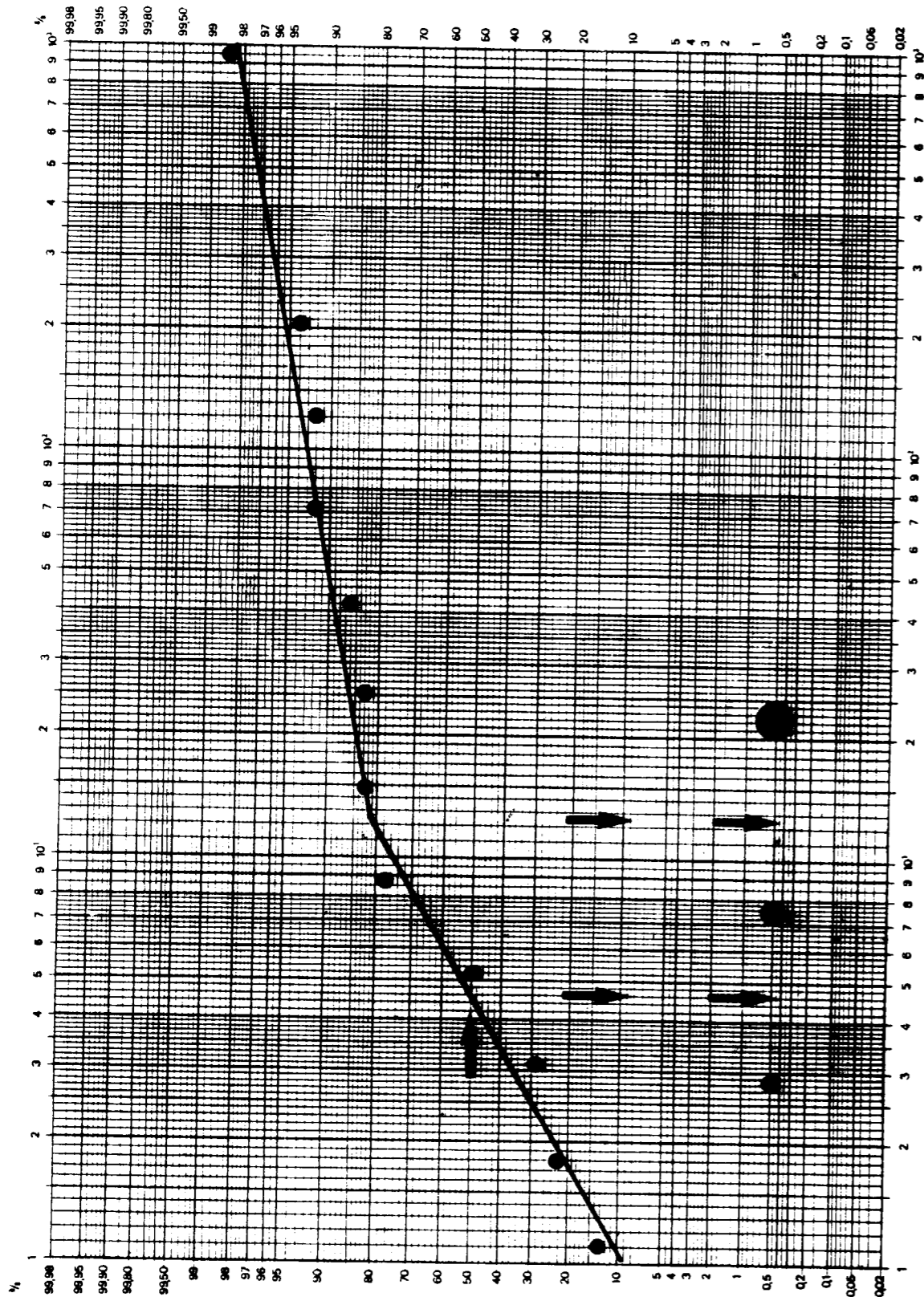


Figura 6.—Diagrama logaritmico-probabilistico del zinc.

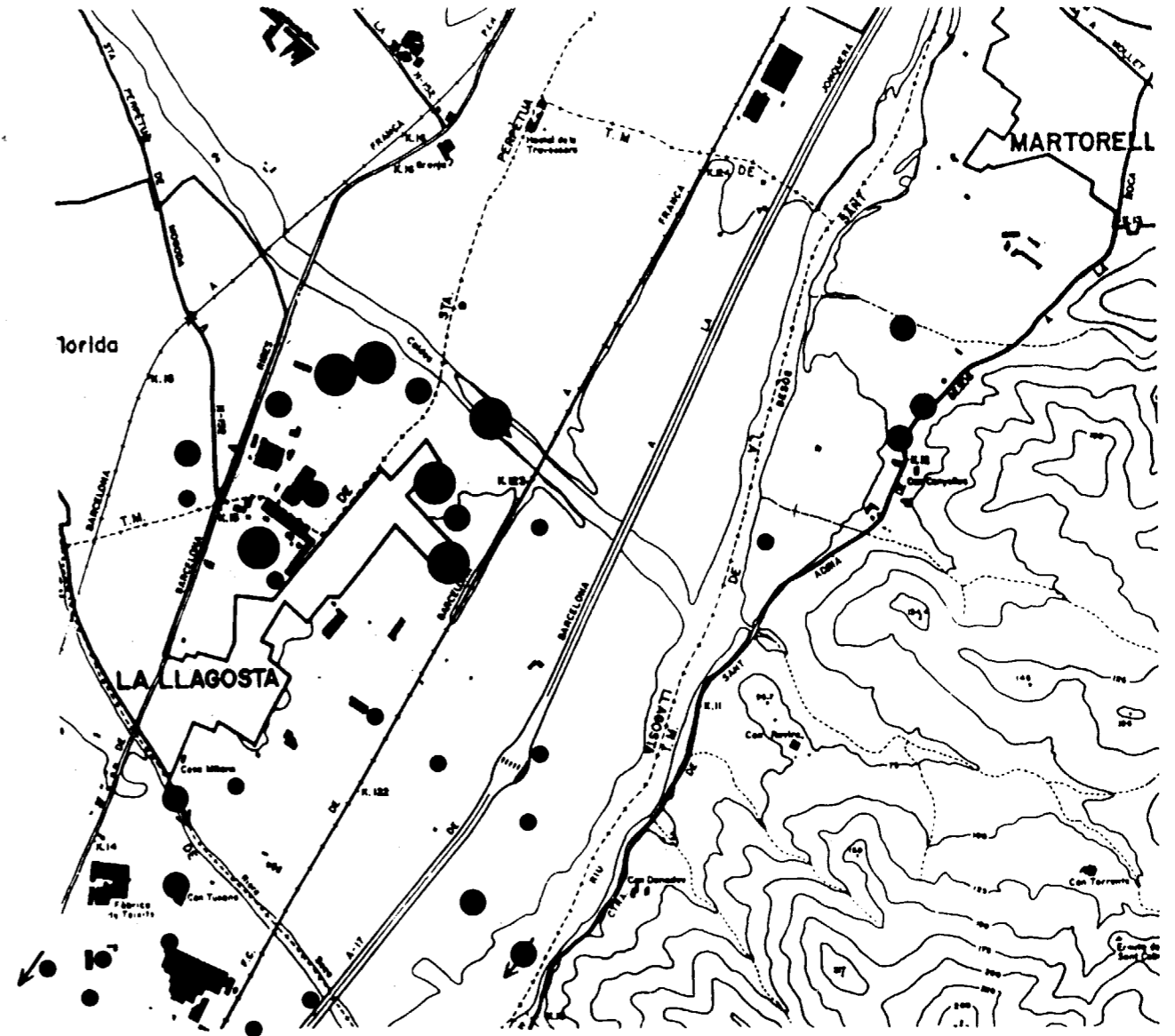


Figura 7.—Representación de los contenidos en zinc de las muestras analizadas. El tamaño de los círculos, proporcional al contenido, y según los valores de la figura 6.

res se determinan de modo que expliquen la mayor varianza de la población, calculándose también la contribución de cada variable antigua a cada nuevo factor, y el coeficiente de cada muestra respecto a las nuevas variables.

Según CASAS (1979), en una población de n muestras en las que hemos determinado p variables, las componentes principales serán las combinaciones lineales de estas variables:

$$Y_i = \sum_{j=1}^p a_{ij} \cdot X_j$$

Estos coeficientes a_{ij} se calculan de modo que la primera de las nuevas variables, Y_1 , tenga la máxima varianza, y así sucesivamente para el resto de nuevas variables. Ahora bien, cada una de ellas ha de ser linealmente independiente de las demás, y la varianza explicada es progresivamente menor. Por lo general, las cuatro o cinco primeras componentes principales suelen explicar la mayor parte de la varianza de la población (entre el 70 y el 85 por 100).

A partir de estas nuevas componentes principa-

les podemos reinterpretar la variabilidad de la población en términos de fenómenos o procesos naturales, que expliquen en cierta forma la complejidad del conjunto estudiado (por ejemplo, mecanismos de contaminación). A partir de los coeficientes factoriales o componentes se pueden representar cartográficamente las muestras en función de las nuevas componentes o factores, permitiendo visualizar la importancia a escala regional o local del fenómeno reflejado por cada componente en cuestión (FONT, 1983).

APLICACIONES

El análisis de componentes principales se ha aplicado frecuentemente a los resultados de estudios de prospección geoquímica en redes de drenaje y litogeoquímica, tanto en campañas a gran escala (BARBIER et al., 1978), como a escala regional o en áreas localizadas (CASAS, 1979; FONT, 1983).

En hidroquímica, el empleo de métodos multivariantes se está extendiendo cada vez más, aunque todavía no es una herramienta habitual como puedan serlo los métodos clásicos de representación gráfica (diagramas de Piper, logarítmicos, triangulares, etc.). Sin embargo, ya empieza a existir una importante bibliografía sobre el tema.

En su mayor parte, los trabajos que utilizan los métodos multivariantes para la interpretación de datos hidroquímicos son de carácter general, y buscan normalmente una relación entre litologías y la composición química normal de las aguas subterráneas. Estudios con este planteamiento son los de CASTILLO (1986), sobre las aguas del acuífero de la vega de Granada; IBAÑEZ y SANCHIS (1983), sobre las aguas del acuífero del macizo de Caroch (Valencia), y GOMEZ et al., (1987a y b), sobre la calidad de las aguas de las cuencas del norte de España (Arratia y Nervión).

En relación a acuíferos kársticos existen también abundantes ejemplos de utilización de técnicas multivariantes; recientemente tenemos los trabajos de MUDRY y BLAVOUX (1986) en el karst de Le Vaucluse, y el de PATON et al. (1986) en la cuenca del río Cuyaguaje (Cuba).

En el estudio de las aguas subterráneas de depósitos terciarios y cuaternarios tenemos los tra-

bajos de BENAVENTE et al. (1983), NAVARRO (1986a y 1989) y NAVARRO y FONT (1989).

En el campo de la industria marina los análisis factoriales y de componentes principales se han venido utilizando para conocer el origen y estado del contenido salino de las aguas de zonas costeras. En este sentido destacar los trabajos de GONZALEZ et al. (1988) y PULIDO et al. (1988), referido este último al empleo de métodos factoriales y taxométricos.

En relación a problemas de contaminación, la utilización específica de técnicas multivariantes no está demasiado extendida, y son escasos los trabajos que la ponen en práctica. Sin embargo, merece la pena destacar los estudios de THOMAS et al. (1986) sobre metodología de control de calidad en aguas subterráneas, y SCHLEYER et al. (1987) sobre la utilización de métodos multivariantes para el análisis de grandes bancos de datos hidrogeológicos.

También merece destacarse la aportación de JOSEPH et al. (1988), quienes emplean el ACP para interpretar la influencia en el medio kárstico de una crecida.

TRATAMIENTO MULTIVARIANTE DE LOS DATOS

El conjunto de datos tratados abarca un total de 32 muestras y 20 variables, cuya relación es la siguiente: pH, conductividad, CO₃H⁻, CO₄⁻, Cl⁻, NO₃⁻, NO₂⁻, Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Sb, As, Fe, Mn, Cr-VI, Pb, Zn, Cu y Ni.

En primer lugar se realizó un análisis factorial con el total de datos y variables, y a partir de los resultados se construyó el diagrama factor-varianza con la finalidad de seleccionar las variables verdaderamente significativas. Los dos diagramas realizados (figs. 8 y 9) nos indican que las variables con un elevado grado de significación son aquellas cuya contribución a los distintos factores, expresada en forma de varianza acumulada (comunalidades) se alcanza con un número bajo de factores.

Siguiendo esta metodología se pueden considerar como significativas: conductividad, CO₃H⁻, SO₄⁻, Cl⁻, NO₃⁻, Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, As, Fe, Mn, Cr-VI, Pb, Cu y Ni.

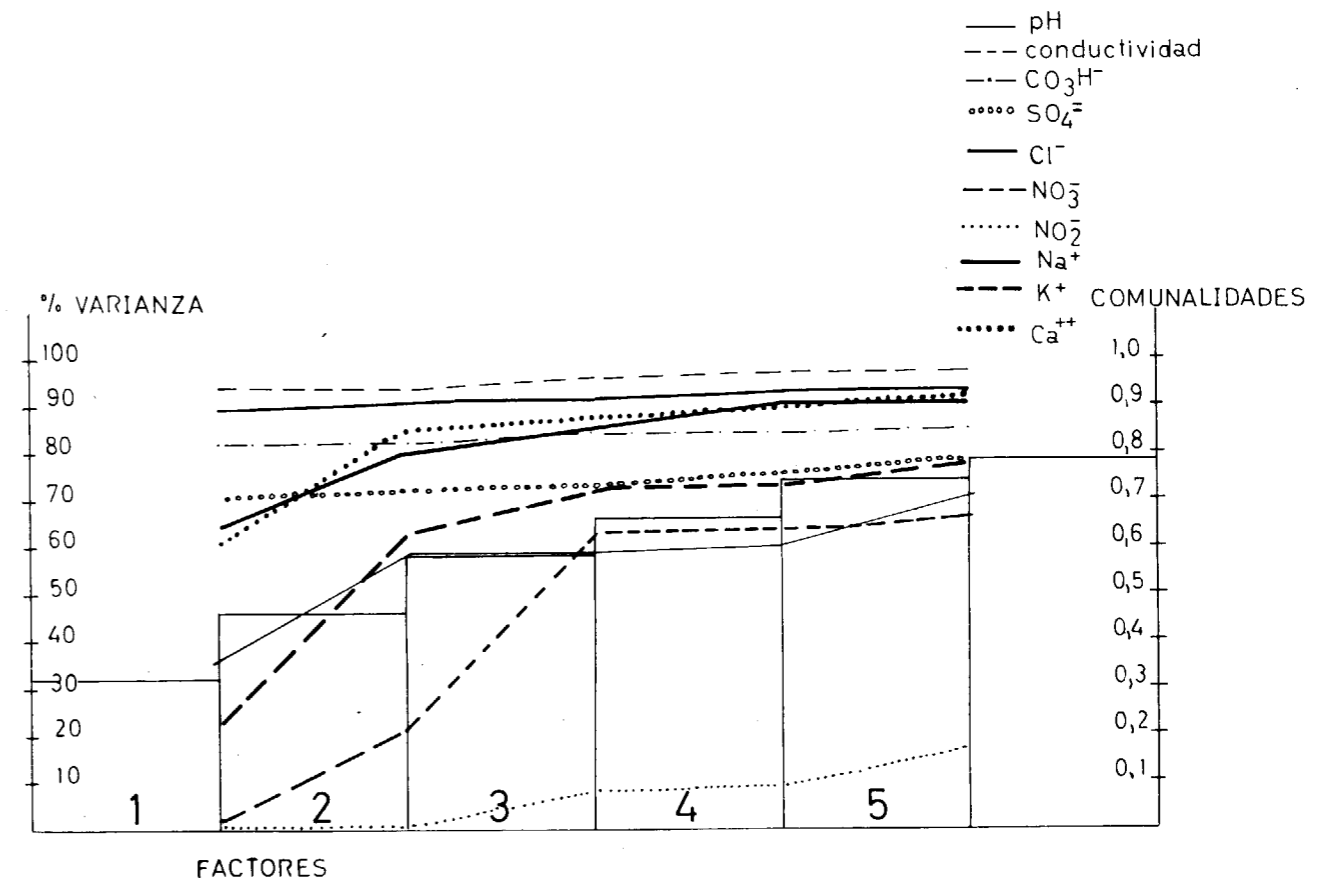


Figura 8.—Diagrama factor-varianza de pH, conductividad e iones mayoritarios (excepto el magnesio).

Comparando estas variables entre sí gracias al coeficiente de correlación lineal (fig. 10), se comprueba cómo en buena medida la mayor parte de ellas están correlacionadas entre sí, de donde se deduce que la aplicación del análisis de componentes principales (ACP) sobre este conjunto de variables es «a priori» procedente.

En el ACP realizado se utilizaron únicamente quince variables, prescindiendo de la conductividad por su carácter redundante en relación a las otras variables que definen la mineralización del agua subterránea (Cl⁻, SO₄⁻, etc.).

RESULTADOS DEL ACP

El ACP nos indica que las cinco primeras componentes principales explican un 82,5 por 100 de la varianza total de la población (tabla III). Las

TABLA III
Valores propios (1) y varianza explicada (2) por cada componente principal

	1	2	3
	5.15	34.33	34.33
	2.52	16.86	51.20
	2.21	14.73	65.94
	1.62	10.80	76.74
	0.92	6.18	82.92
	0.66	4.45	87.38
	0.53	3.55	90.94
	0.47	3.15	94.10
	0.37	2.46	96.56
	0.19	1.33	97.90
	0.12	0.81	98.71
	0.10	0.72	99.43
	0.05	0.33	99.76
	0.02	0.18	99.95
	0.00	0.04	100.00

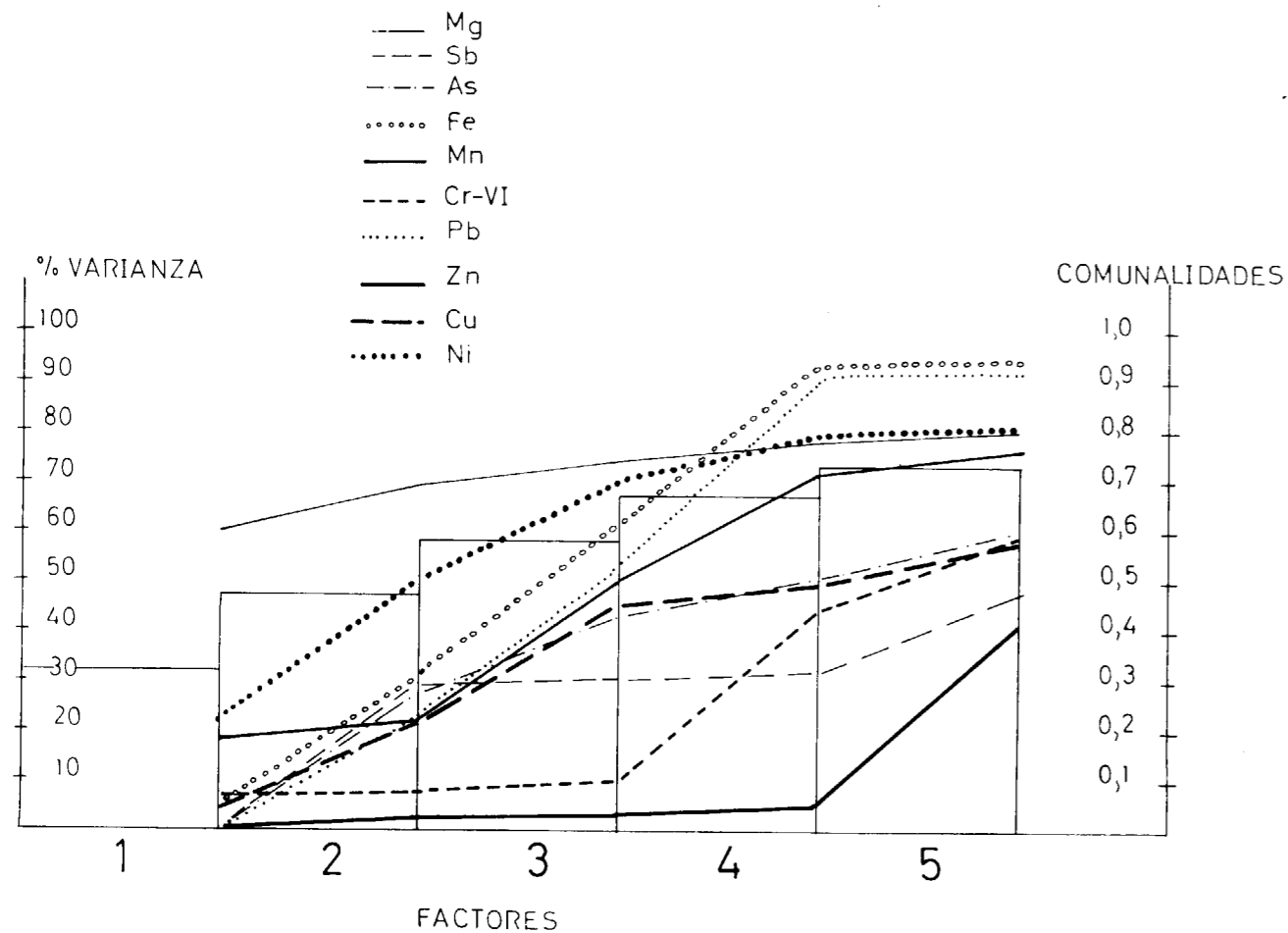


Figura 9.—Diagrama factor-varianza del magnesio y los metales pesados.

componentes principales calculadas (tabla IV) están relacionadas con las variables primitivas del modo siguiente:

- Componente 1: Corresponde a la asociación de CO_3H , SO_4 , Cl , Na , Ca y Mg . Representa al factor de mineralización de las aguas subterráneas, y aparece de un modo habitual en el tratamiento multivariante de la mayoría de aguas subterráneas (NAVARRO y FONT, 1989).
- Componente 2: Se asocia directamente con el Ca , Fe , Pb y NO_3 , e inversamente con el K . Tanto por el conjunto de variables consideradas como por la situación de muestras con cargas elevadas en este factor, podría corresponder a la infiltración de aguas residuales industriales, que por procesos de intercambio iónico crean áreas de alta dureza en el acuífero.

TABLA IV
Matriz de ejes principales. Columnas vectores propios y filas variables antiguas

	1	2	3	4	5
1 CO_3H}^+ ...	.39	.00	-.11	.08	-.11
2 SO_4^- ...	.36	.13	-.10	-.09	.01
3 Cl}^- ...	.42	-.00	.01	.09	-.01
4 NO_3^- ...	.02	.33	-.42	.00	-.20
5 Na}^+ ...	.37	-.19	.13	.21	.04
6 K}^+ ...	.23	-.38	.18	.09	-.12
7 Ca}^{++} ...	.31	.34	-.09	-.11	-.18
8 Mg}^{++} ...	.32	.22	-.17	-.18	.06
9 As} ...	.05	-.28	-.26	.27	.60
10 Fe} ...	.08	.36	.39	.34	.16
11 Cr-VI} ...	.13	.06	.10	-.53	.48
12 Mn} ...	.20	-.12	.32	-.39	.15
13 Pb} ...	.03	.36	.39	.38	.13
14 Cu} ...	.10	-.27	.31	-.13	-.46
15 Ni} ...	.22	-.25	-.31	.26	-.00

	CO_3H	SO_4	Cl	NO_3	Na	Ca	Mg	As	Fe	Cr	Mn	Pb	Cu	Ni
CO_3H	*													
SO_4	†	*												
Cl	†	†	*											
NO_3	-	-	-	*										
Na	†	†	†	‡	*									
K	†	-	†	†	†	*								
Ca	†	†	†	†	-	*								
Mg	†	†	†	†	-	†	*							
As	-	-	-	†	‡	‡	‡	*						
Fe	-	-	‡	‡	‡	†	‡	‡	*					
Cr	‡	†	-	-	-	-	-	-	‡	*				
Mn	-	†	†	†	†	†	†	†	†	†	*			
Pb	-	-	-	-	-	-	-	‡	†	-	-	*		
Cu	-	-	‡	†	†	†	-	-	-	-	-	-	*	
Ni	†	†	†	‡	†	†	-	†	‡	-	-	‡	-	*

Figura 10.—Matriz de correlación de las variables analizadas más significativas. Los símbolos representan: = autocorrelación. †=correlación significativa. —= correlación no significativa. ‡=correlación moderada ($r=0.20 - 0.29$).

- Componente 3: Asocia de forma directa al Fe , Mn , Pb y Cu e inversamente al Ni y NO_3 . Podría explicar un cierto tipo de contaminación metálica, posiblemente asociada a procesos de reducción (elevados contenidos en Fe y Mn), y en principio, sin ninguna relación clara con focos de contaminación industrial.
- Componente 4: Está directamente relacionada con el Fe y Pb , e inversamente con Cr-VI y Mn . Por la distribución espacial de las muestras, reflejaría la contaminación crómica asociada a las áreas de relleno.
- Componente 5: Asocia con valores positivos al As y Cr-VI y con valores negativos al Cu . Explicaría una contaminación metálica, posiblemente de origen industrial y de carácter puntual y con toda probabilidad intermitente.

LA REPRESENTACION GRAFICA

Utilizando los distintos componentes principales ha sido posible delimitar con claridad el impacto de cada foco contaminante, así como cuál era el

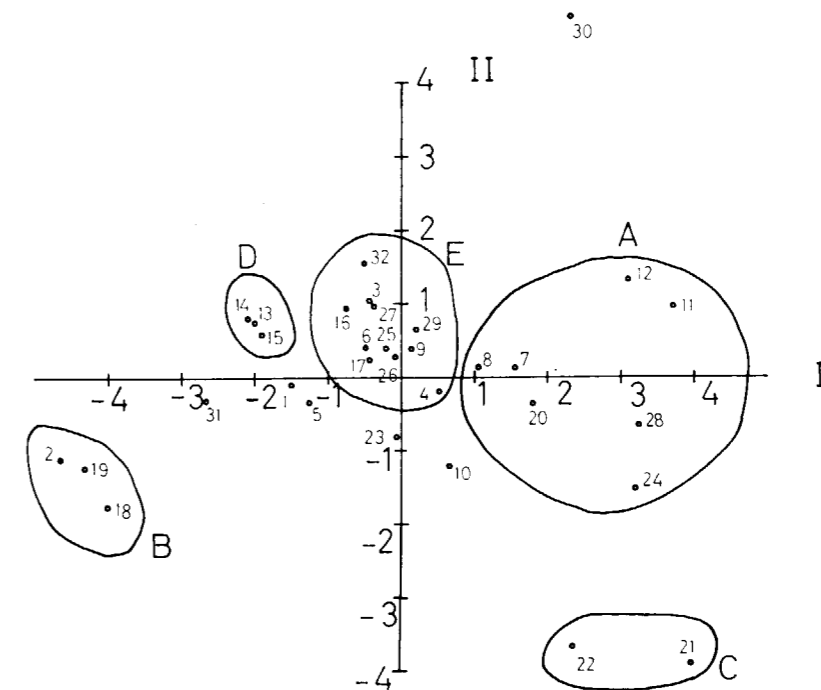


Figura 11 a).
a) Plano componencial I-II.

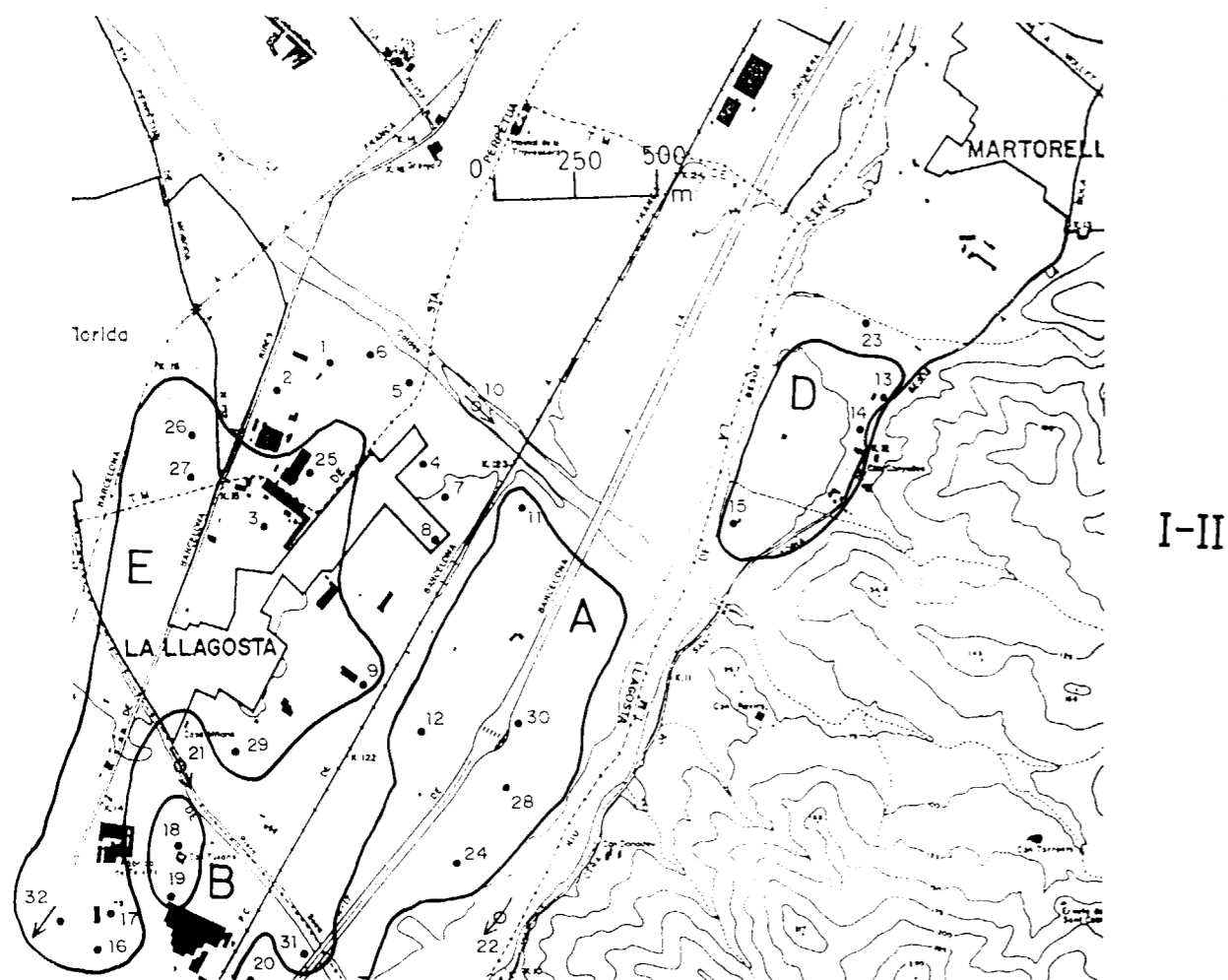


Figura 11 b).

b) Representación sobre el plano de las poblaciones obtenidas.

área y muestras afectadas. La representación de las muestras en función de los cuatro primeros componentes principales, ha permitido determinar la existencia de cinco poblaciones ligadas a zonas geográficas concretas y caracterizadas por mecanismos de contaminación distintos. Para el plano componencial I-II (correspondiente a las componentes 1 y 2), las poblaciones diferenciadas han sido (fig. 11 a y b):

- Población A: Está formada por muestras pertenecientes a pozos ubicados cerca de las áreas de relleno (muestras 7, 8, 11, 12, 20, 24 y 28).
- Población B: Está formada por muestras anómalas y afectadas por la infiltración de agua

procedente del trasvase del río Ter a través de las pérdidas de las conducciones.

- Población C: Compuesta por las muestras de aguas superficiales correspondientes al río Besós y a la Riera Seca.
- Población D: La forman las muestras de pozos situados en el borde del acuífero, y por tanto no contaminados (13, 14 y 15).
- Población E: Formada por gran parte de las muestras correspondientes a los polígonos industriales, y cuya distribución espacial se corresponde con gran aproximación a la estructura del paleocanal de la margen derecha del río Besós (fig. 3).

El plano componencial I-III reproduce en gran medida las poblaciones anteriormente descritas (figs. 12 a y b), destacándose el efecto de los paleocanales, de forma que no sólo se refleja el efecto del paleocanal de la margen derecha (población E), sino que algunas poblaciones con contenidos metálicos elevados, posiblemente por la existencia de condiciones reductoras (población C: 4, 7, 8 y 10), se asocian espacialmente con otros paleocanales. En el caso de la población C (fig. 12) parece incluso observarse una cierta relación con el agua superficial de la Riera de Caldes (muestra 10), cuyo impacto en el agua subterránea afecta únicamente a los pozos situados en el paleocanal que cruza la Riera por su sector central (pozos 4, 7 y 8).

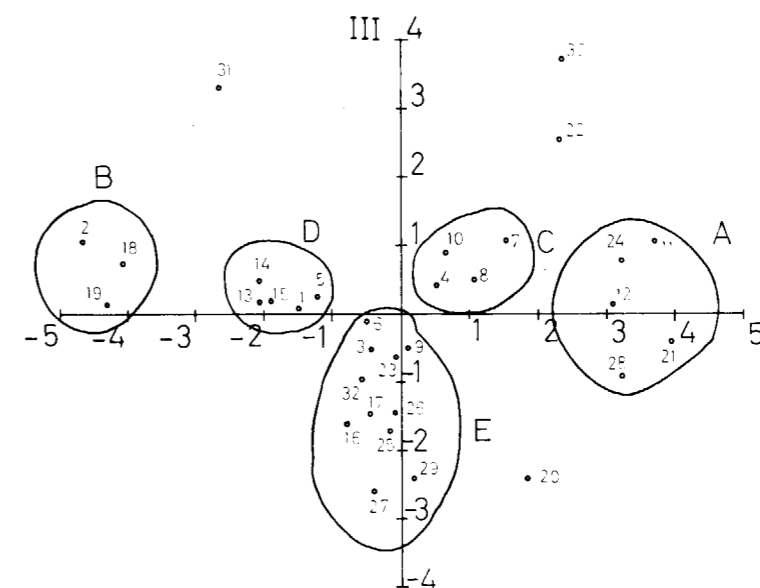
En el plano componencial I-IV se pone de manifiesto el efecto de la contaminación crónica a partir de zonas de relleno. La población afectada por la contaminación en Cr-VI (población A: 7, 11, 12 y 24) presenta una distribución espacial coincidente con la simulada en el modelo de transporte de solutos realizado por NAVARRO y SOLER (1990).

A partir de los resultados de la regresión lineal múltiple se ha podido establecer una buena correlación entre el ión NO_3^- y los metales pesados

(As, Fe, Mn, Cr-VI, Pb, Cu y Ni), lo que vendría a significar, si utilizamos el nitrato como indicador de aporte de materia orgánica (contenidos elevados en zonas de vertido de aguas residuales), una posible relación entre materia orgánica y disolución de metales pesados.

CONCLUSIONES

- La utilización de las técnicas uni y multivariantes habituales en estudios de exploración geoquímica se han revelado como un instrumento muy eficaz en los estudios de contaminación de aguas subterráneas, ya que permiten la localización espacial de los focos contaminantes.
- Su utilidad, además, se acentúa en el caso de múltiples focos contaminantes, cuya resolución por métodos clásicos de hidroquímica no es inmediata, y donde en especial el método de ACP posibilita incluso una primera aproximación para deducir los mecanismos de contaminación.
- Se ha comprobado que desde el punto de vista estadístico los metales pesados tienen un comportamiento totalmente distinto a los

Figura 12 a).
a) Plano componencial I-III.

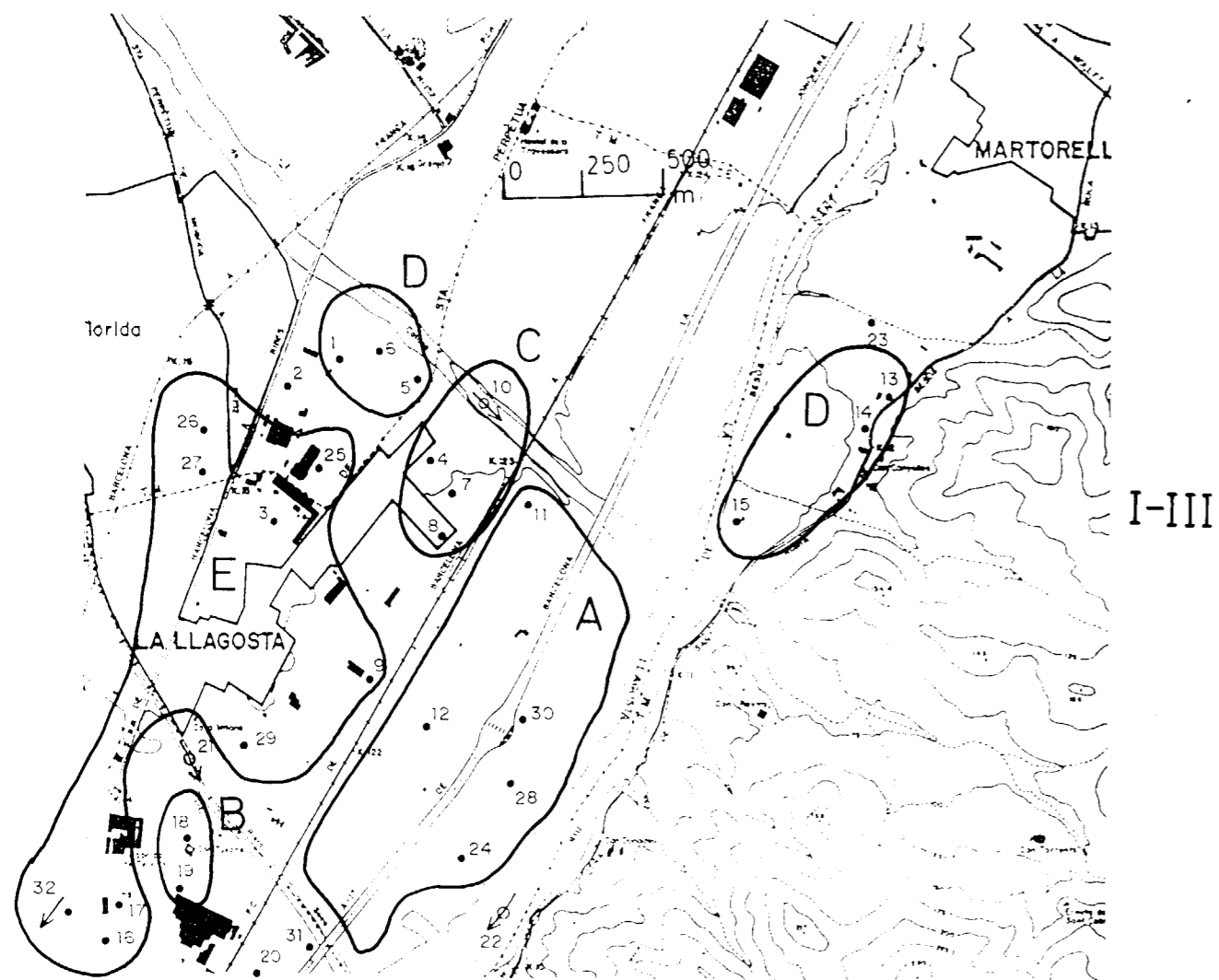


Figura 12 b).

b) Representación sobre el plano de las poblaciones obtenidas.

iones mayoritarios. En éstos el modelo de distribución seguido es el normal, mientras los metales pesados e iones minoritarios siguen el lognormal.

— Como consecuencia, la utilización de los umbrales de anomalía ha permitido diferenciar las muestras ligadas a problemas de contaminación de las que obedecen a una mineralización normal o de fondo.

— Las técnicas multivariantes, y en especial el ACP, han permitido discriminar entre los cinco focos básicos de contaminación existentes en La Cubeta, relacionándolos con las

componentes principales deducidas; éstas son, de mayor a menor importancia:

Componente 1: Asociado a áreas de relleno que incrementan la mineralización del agua.

Componente 2: Ligada a los procesos de infiltración de aguas residuales industriales.

Componente 3: Asociada a fenómenos de reducción y a la aparición de metales pesados.

Componente 4: Relacionada con la contaminación de cromo de áreas de relleno.

Componente 5: Asociada a procesos de contaminación industrial de carácter puntual (vertidos furtivos).

— En la actualidad, y debido a la creciente contaminación de las aguas subterráneas, este tipo de métodos adquiere una gran importancia, ya que pueden utilizarse para localizar y discriminar los posibles causantes de un proceso de contaminación, cuya evidencia no es del todo manifiesta.

REFERENCIAS

- BARBIER, J., y WILHEM, E. (1978): *Superficial geochemical dispersion around sulphide deposits: some examples*. Journal Geochem. Expl., v. 10, pp. 1-39.
- BENAVENTE, J.; DA COSTA ALMEIDA, C.; CASTILLO, A., y OLIVEIRA DA SILVA, M. (1983): *Algunos ejemplos de aplicación del análisis factorial al tratamiento de datos hidroquímicos*. III Simposio de Hidrogeología. Hidrogeología y Recursos Hídricos. Tomo IX. Madrid, pp. 297-309.
- CASAS, A. (1979): *Estudio litogeoquímico del Paleozoico del Montseny y su aplicación a la prospección minera*. Tesis doctoral. Univ. de Barcelona, 315 pp. Inédita.
- CASTILLO, A. (1986): *Estudio hidroquímico del acuífero de la Vega de Granada*. Tesis doctoral. Univ. de Granada, 638 pp.
- CUADRAS, C. M. (1981): *Métodos de análisis multivariable*. Ed. Euribar. Barcelona.
- DIPUTACIO DE BARCELONA (1986): *Censo industrial*. Informe interno. Barcelona.
- FONT, X. (1983): *Estudio de las mineralizaciones del Macizo del Montseny-Guillerics (Barcelona y Girona) y su aplicación en la prospección geoquímica de redes de drenaje*. Ed. Dpto. Prospección Geológica y Geofísica, 543 pp.
- GOMEZ, G.; GARCIA, I.; ROMERO, F., y VILLAGRA, M. J. (1987a): *Estudio hidroquímico de la cuenca del río Nervión*. Tecnología del Agua, año VII, núm. 38, pp. 85-93.
- GOMEZ, G.; GRACIA, I.; ROMERO, F., y VILLAGRA, M. J. et al. (1987b): *Estudio hidroquímico de la cuenca del río Arratia*. Tecnología del Agua, año VII, núm. 60, pp. 65-72.
- GONZALEZ, A.; MARTIN, D.; ANTIGÜEDAD, I., y SANCHO, V. (1988): *Aplicación del análisis factorial al conocimiento del origen y evolución de la salinización en el sistema acuífero 25 (provincia de Huelva)*. TIAC'88. Tecnología de la Intrusión en Acuíferos Costeros. Almuñécar (Granada), pp. 521-539.
- HAWKES, H. E., y WEBB, J. S. (1962): *Geochemistry in Mineral Exploration*. Harper and Row, Londres.
- IBAÑEZ, V., y SANCHIS, E. J. (1983): *Utilización de métodos estadísticos multivariantes en hidroquímica*. III Simposio de Hidrogeología. Madrid, pp. 263-275.
- INTECSA (1985): *Estudio de viabilidad de saneamiento, realización de afloramientos, muestreo y análisis, trabajos topográficos y geotécnicos y pliegos de bases de las estacio-*

nes depuradoras de aguas residuales del sistema de saneamiento de Parets del Vallés. Generalitat de Catalunya. Dpto. de Política Territorial i Obres Públiques. Barcelona.

JOSEPH, C.; RODIER, C.; SOULIE, M.; SINEGRE, F.; BAYLET, R., y DELTOUR, P. (1988): *Approche des transferts de pollution bactérienne dans une crue karstique par l'étude des paramètres physico-chimiques*. Revue des Sciences de l'eau, núms. 1-2, pp. 73-106.

LEPELTIER, C. (1969): *A simplified statistical treatment of geochemical data by graphical representation*. Econ. Geol., v. 64, pp. 538-550.

MUDRY, J., y BLAVOUX, B. (1986): *Utilization de l'analyse de composantes principales (sur variables centrées réduites) pour l'étude du fonctionnement hydrocinématique de trois aquifères karstiques du Sud-Est de la France*. Hydrogeologie, núm. 1, pp. 53-59.

NAVARRO, A. (1986a): *Estudio hidrogeológico de los depósitos cuaternarios del Valle del Congost*. Tesis de Licenciatura. Univ. de Barcelona, 220 pp. Inédita.

NAVARRO, A. (1989): *Estudio de los acuíferos aluviales de la cuenca media del río Besós. Origen y evolución de la contaminación*. Tesis doctoral. Universidad de Barcelona, 534 pp. Inédita.

NAVARRO, A., y FONT, X. (1989): *Aportación al conocimiento hidrogeológico de los acuíferos de la Plaana de Vic*. Revista d'Inv. Geol., núms. 43/44 (en prensa).

NAVARRO, A., y SOLER, M. (1990): *Aplicación de un modelo matemático de simulación al estudio del movimiento de Cr-VI en el acuífero aluvial de la cubeta de La Llagosta*. Química Hoy, 21 pp. (en prensa).

NICHOL, I.; GARRETT, R. G., y WEBB, J. S. (1969): *The role of some statistical and mathematical methods in the interpretación of regional geochemical data*. Econ. Geol., v. 64, pp. 204-220.

PAJON, J. M. (1986): *Caracterización geoquímica y geomatemática de formaciones geológicas y sedimentos de la cuenca del río Cuyaguajate. Relación con las características hidroquímicas de los acuíferos*. Voluntad Hidráulica, vol. 72, pp. 43-49.

PULIDO, A.; NAVARRETE, F.; MARTINEZ, J. L.; ALONSO, C.; MACIAS, A.; MOLINA, L.; BENAVENTE, J.; CHICA, M., y PADILLA, A. (1988): *Metodología del estudio de la intrusión marina del Campo de las Dalías (Almería)*. TIAC'88. Tecnología de la Intrusión en Acuíferos Costeros. Almuñécar (Granada), pp. 295-309.

REEDMAN, J. H. (1980): *Techniques in mineral exploration*. Applied Science Publ., Londres, 533 pp.

SCHLEYER, R., et al. (1987): *Asir database for contaminated sites. Statistical data evaluation as a tool for groundwater contamination assesment*. Vulnerability of soil and groundwater to pollutants. Proceedings and information, núm. 38, NIPH and EH. The Hague, pp. 273-278.

THOMAS, O.; SZYMANSKI, K.; MAZAS, N., y MARTINBOUYER, M. (1986): *Methodologie de controle de la qualité des eaux souterraines*. T. S. M. - L'Eau. Mai 1986, pp. 253-258.

VILLARROYA, M. (1986): *Estudio hidrogeológico del acuífero costero del Maresme Sur (Barcelona)*. Tesis doctoral. Univ. de Barcelona, 244 pp. Inédita.

Original recibido: Noviembre de 1990.

Original aceptado: Abril de 1991.

Contribución del binomio horno de microondas-espectrometría de plasma al análisis de suelos.

Por S. DEL BARRIO MARTIN (1), R. BENITO GARCIA (1) y F. J. VALLE FUENTES (2)

RESUMEN

Se pone a punto un procedimiento de puesta en solución de suelos empleando la técnica de digestión en un horno de microondas. Se optimizan los parámetros del equipo respecto a peso de muestra, mezcla ácida, potencia inicial y final y volumen de aforado. Las soluciones obtenidas, procedentes de cuatro muestras patrón, se analizan por espectrometría de plasma de acoplamiento inductivo (ICP) con resultados de exactitud y precisión, a corto plazo de tiempo aceptables.

Palabras clave: Digestión, Microondas, Suelos, Análisis, ICP-AES.

ABSTRACT

A soil decomposition procedure has been developed using the technique of microwave digestion. The instrumental parameters are optimized in relation to weight of sample, acid mixture, initial and final power and volumen of solution. The four standard reference material digestions are analysed by inductively coupled plasma spectrometry (ICP) with acceptable accuracy and short-time precision.

Key words: Digestion, Microwave, Soils, analysis, ICP-AES.

INTRODUCCION

Al aplicar diferentes métodos de ataque por vía húmeda a silicatos, se aprecia la dificultad que presenta su puesta en solución si se compara con la de otros materiales inorgánicos. Los problemas estriban, fundamentalmente, en la inercia que posee este tipo de muestras frente a los reactivos ácidos.

El uso de la energía de las microondas como fuente de calor en los procesos de digestión por vía húmeda fue introducido por ABU-SAMRA et al. (1975) en un trabajo dedicado al ataque de diversas matrices biológicas. En la experimentación emplearon un horno de microondas de cocina modificado convenientemente. Pero es en la década de los 80, cuando renace el interés por el ataque de muestras de distinta naturaleza empleando el citado sistema, que culmina con el Eastern Analytical Symposium celebra-

do en New York en 1986, centrado exclusivamente en el empleo de esta técnica en el análisis químico.

En el campo de los materiales geológicos varios autores han desarrollado metodologías por esta vía para su digestión, destacando el trabajo de LAMOTHE et al. (1986), que ponen en solución un gran número de patrones geológicos de distinta naturaleza.

Debido a la heterogeneidad que presentan las muestras geológicas, para su ataque mediante microondas, es preciso desarrollar procedimientos específicos que tengan en cuenta los siguientes parámetros: mezcla ácida, potencia aplicada y tiempo de digestión.

FUNDAMENTO DE LAS MICROONDAS E INSTRUMENTACION

Las microondas, extensamente estudiadas por NEAS y COLLINS (1988), son una forma de ra-

diación electromagnética no ionizante cuya energía produce un movimiento molecular por migración de iones y rotación de dipolos sin originar cambios en la estructura molecular de la muestra sobre la que incide. La energía de las microondas tiene un rango de frecuencias comprendido entre 300 y 300.000 MHz. De las frecuencias aprobadas por la Comisión Federal de Comunicaciones en 1959 la utilizada con fines analíticos es la de 2.450 MHz. Esta frecuencia da lugar a una potencia efectiva variable entre 600 y 1.200 W, que proporciona 43.000 calorías en el interior de la muestra en tan sólo cinco minutos.

Cuando un material absorbe energía de microondas se produce un incremento de su temperatura cuyo valor depende del factor de disipación del mismo. Dicho factor se define como el cociente entre la pérdida dieléctrica del material y su constante dieléctrica. Esta constante es una medida de su capacidad para ser atravesado por la energía de las microondas, mientras que el factor de pérdida es su capacidad para disipar dicha energía en forma de calor. La generación de calor tiene lugar por dos procedimientos: conducción iónica y rotación dipolar, si bien en la mayoría de las aplicaciones ambos sistemas ocurren simultáneamente.

La digestión con microondas es más rápida y eficaz que la digestión mediante calentamiento por conducción. En esta última sólo una pequeña fracción del líquido alcanza la temperatura correspondiente al calor aplicado en el exterior de los reactores debido a que éstos son poco conductores, a la existencia de vaporización en la superficie del líquido y al establecimiento de un gradiente térmico por corrientes de convección. Sin embargo, en el calentamiento con microondas todo el líquido alcanza la misma temperatura simultáneamente, dándose zonas de supercalentamiento localizado por absorber la muestra sólida energía de microondas (fig. 1).

Los sistemas de microondas con fines analíticos constan de los siguientes componentes (fig. 2):

- Magnetron: generador de las microondas.
- Cavity del horno: recinto en el cual se van a propagar las microondas.
- Guía de ondas: canaliza las microondas generadas por el magnetron hasta la cavity del horno.

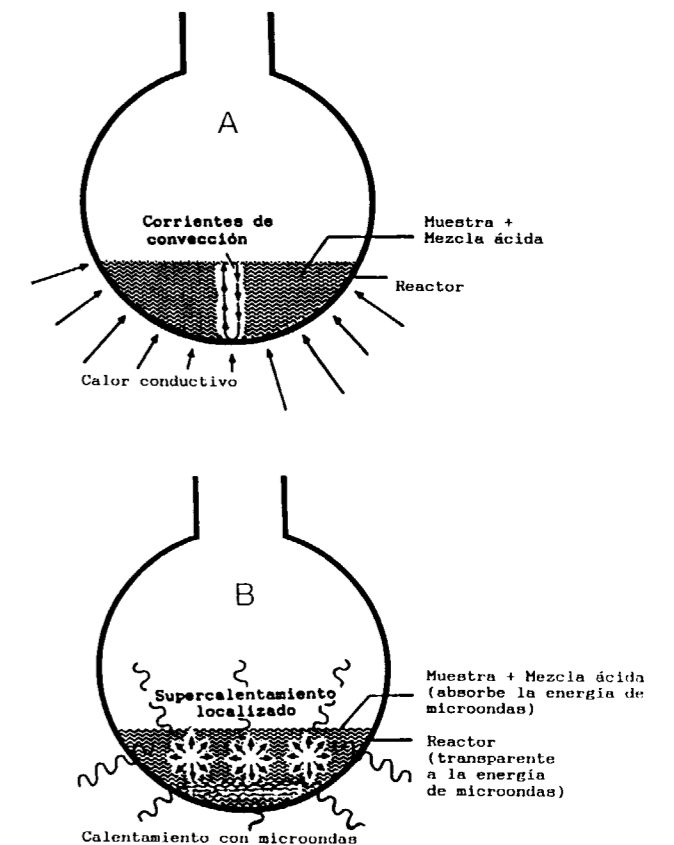


Figura 1.—Diferencia de mecanismo entre el calentamiento de muestras por conducción (A) y por energía de microondas (B).

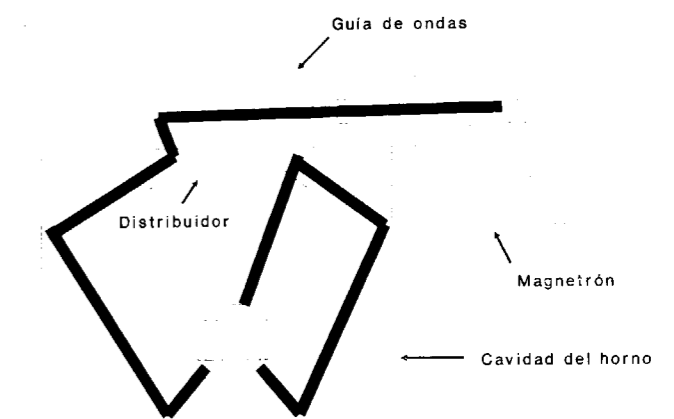


Figura 2.—Esquema general de un horno de microondas para la digestión de muestras.

- Distribuidor de ondas: refleja y distribuye la radiación que entra en la cavity del horno procedente de la guía de ondas.

(1) Instituto Tecnológico GeoMinero de España (ITGE).
(2) Instituto de Cerámica y Vidrio (CSIC).

PARTE EXPERIMENTAL

Equipos

— Digestor modelo FLOYD RHS-150, que proporciona una potencia de hasta 600 W y una temperatura de hasta 400° C, equipado con reactores de polietileno de 150 ml. de capacidad que admiten una presión máxima de 200 psi.

— Espectrómetro de emisión plasma multicanal Jarrell Ash modelo ICAP 61, trabajando en las siguientes condiciones:

Potencia inducida=1.100 W

Potencia reflejada < 5 W

Flujo de argón generador del plasma=
= 16 l/min.

Flujo de argón de nebulización=0,75 l/min.

Caudal de nebulización de la muestra=
= 2 ml/min.

Altura de observación=16 mm.

Materiales

Se han utilizado cuatro muestras de suelos de composición certificada cuyas referencias y tipos son los siguientes:

193A	SO-1	Arcilla Regosólica
193A	SO-2	Horizonte B Podsólico
193A	SO-3	Horizonte C Cálcareo
193A	SO-4	Horizonte A Chernozemico

Puesta en solución

Se han ensayado las siguientes mezclas ácidas: HNO₃ + H₂O₂; HF + H₂SO₄; HF + Agua regia y HF + HCl + HClO₄. De las citadas, la última es la que ha proporcionado, en unos primeros ensayos, mayores porcentajes de recuperación de los elementos a analizar. Por este motivo ha sido con ella con la que se ha procedido a optimizar los parámetros operatorios que intervienen en un sistema de microondas.

Los resultados de dicha optimización han sido:

Peso de muestra: 0,25 g.

Mezcla ácida: 3 ml. de HF+3 ml. de HCl+3 ml. de HClO₄.

Potencia inicial: 30 por 100, equivalente a 90 W, durante 10 minutos.

Potencia final: 50 por 100, equivalente a 150 W, durante 5 minutos.
Volumen final: 25 ml.

Con fines comparativos se ha realizado un ataque a sequedad de las muestras con HF+HNO₃+HClO₄, llevándolas a sequedad según el procedimiento descrito por DEL BARRIO (1991).

Elementos analizados

Se han determinado por ICP los elementos que aparecen certificados y que, a la vez, se dispone de línea de trabajo en el espectrómetro. En la tabla I se reúnen sus longitudes de onda, órdenes espectrales y concentraciones mínimas determinables (CMD).

TABLA I
Líneas de trabajo y CMD

Elemento	Longitud de onda (nm)	Orden espectral	CMD (ppm)
Na	589,592	1	100
Mg	279,079	1	100
Al	237,324	2	100
K	766,491	1	100
Ca	317,933	2	100
Ti	336,121	2	100
Fe	271,441	1	100
P	214,914	2	100
Mn	294,920	1	5
V	292,402	2	2,5
Cr	267,716	2	2
Co	228,616	2	2,5
Ni	231,604	2	10
Cu	324,754	2	5
Zn	213,856	3	10
Pb	220,353	2	10

RESULTADOS Y DISCUSION

La tabla II recoge los resultados obtenidos en los análisis realizados por ICP sobre las soluciones procedentes de la digestión con microondas y los extractos clorhídricos del ataque a sequedad. Estos valores se dan acompañados de su precisión a corto plazo de tiempo expresada co-

TABLA II
Análisis de suelos por ICP

	SO-1			SO-2		
	CERTIFICADO	MICROONDAS	SEQUEDAD	CERTIFICADO	MICROONDAS	SEQUEDAD
Na*	1,97	2,08 ± 0,04	1,99 ± 0,03	1,90	1,85 ± 0,01	1,78 ± 0,02
Mg*	2,31	2,22 ± 0,02	2,39 ± 0,03	0,54	0,48 ± 0,02	0,51 ± 0,01
Al*	9,38	8,48 ± 0,11	9,15 ± 0,14	8,07	7,50 ± 0,06	7,95 ± 0,04
K*	2,68	2,49 ± 0,04	2,65 ± 0,04	2,45	2,34 ± 0,02	2,32 ± 0,02
Ca*	1,80	1,57 ± 0,03	1,71 ± 0,03	1,96	1,83 ± 0,01	1,93 ± 0,01
Ti*	0,53	0,51 ± 0,01	0,52 ± 0,01	0,86	0,89 ± 0,01	0,85 ± 0,01
Fe*	6,00	6,05 ± 0,10	6,31 ± 0,09	5,56	5,69 ± 0,03	5,85 ± 0,02
P	620	597 ± 16	619 ± 8	3000	2982 ± 14	2973 ± 15
Mn	890	809 ± 14	817 ± 12	720	669 ± 2	654 ± 2
V	139	119 ± 2	123 ± 2	64	52 ± 1	51 ± 1
Cr	160	162 ± 3	159 ± 2	16	16 ± 1	17 ± 1
Co	32	27 ± 1	27 ± 1	9	10 ± 1	9 ± 1
Ni	94	83 ± 2	84 ± 1	8	9 ± 1	9 ± 1
Cu	61	59 ± 1	59 ± 1	7	9 ± 1	8 ± 1
Zn	146	136 ± 3	137 ± 2	124	123 ± 1	114 ± 1
Pb	21	17 ± 2	17 ± 1	21	17 ± 1	17 ± 1

* Datos expresados en %. Resto de los elementos en ppm.

	SO-3			SO-4		
	CERTIFICADO	MICROONDAS	SEQUEDAD	CERTIFICADO	MICROONDAS	SEQUEDAD
Na*	0,74	0,75 ± 0,02	0,71 ± 0,01	1,00	1,00 ± 0,01	0,93 ± 0,01
Mg*	4,98	5,11 ± 0,13	5,10 ± 0,06	0,56	0,53 ± 0,01	0,51 ± 0,01
Al*	3,06	2,99 ± 0,08	2,90 ± 0,04	5,46	5,34 ± 0,06	5,13 ± 0,03
K*	1,16	1,10 ± 0,03	1,13 ± 0,02	1,73	1,63 ± 0,02	1,60 ± 0,01
Ca*	14,63	15,40 ± 0,10	14,90 ± 0,10	1,11	1,03 ± 0,01	0,98 ± 0,01
Ti*	0,20	0,16 ± 0,01	0,15 ± 0,01	0,34	0,31 ± 0,01	0,26 ± 0,01
Fe*	1,51	1,41 ± 0,04	1,36 ± 0,02	2,37	2,43 ± 0,02	2,39 ± 0,01
P	480	430 ± 10	427 ± 4	900	859 ± 8	863 ± 7
Mn	520	452 ± 11	447 ± 5	600	551 ± 5	543 ± 3
V	38	26 ± 1	25 ± 1	90	77 ± 1	77 ± 1
Cr	26	29 ± 1	23 ± 1	61	63 ± 1	45 ± 1
Co	8	7 ± 1	6 ± 1	11	11 ± 1	11 ± 1
Ni	16	15 ± 1	13 ± 1	26	26 ± 1	24 ± 1
Cu	17	16 ± 1	16 ± 1	22	23 ± 1	22 ± 1
Zn	52	44 ± 1	45 ± 1	94	93 ± 2	87 ± 1
Pb	14	12 ± 1	12 ± 1	16	14 ± 2	14 ± 1

* Datos expresados en %. Resto de los elementos en ppm

mo desviación standard (10 lecturas consecutivas por muestra en el espectrómetro). La tabla se completa con las concentraciones certificadas.

En conjunto, los resultados pueden considerarse aceptables, ya que no se desvían sensiblemente de los certificados. Por otra parte, tampoco presentan variaciones importantes con respecto a los obtenidos en el ataque ácido a sequedad, procedimiento este último que está suficientemente contrastado en los laboratorios del ITGE para este tipo de materiales.

Las diferencias de concentración más acusadas

que se producen con los dos tipos de ataque se dan en los siguientes casos: Al, Ca y Ba en SO-1; Al en SO-2; Cr en SO-3, y este último elemento y Ti en SO-4.

Una visualización de lo anteriormente expuesto se contempla en las figuras 3 y 4, donde se representa la desviación de los resultados (certificados-microondas) respecto a la CMD para los elementos mayoritarios y minoritarios (fig. 3) y para los traza (fig. 4).

Respecto a la representación de los mayoritarios y minoritarios, a primera vista, las desviaciones más acusadas se producen en el Al (SO-1 y

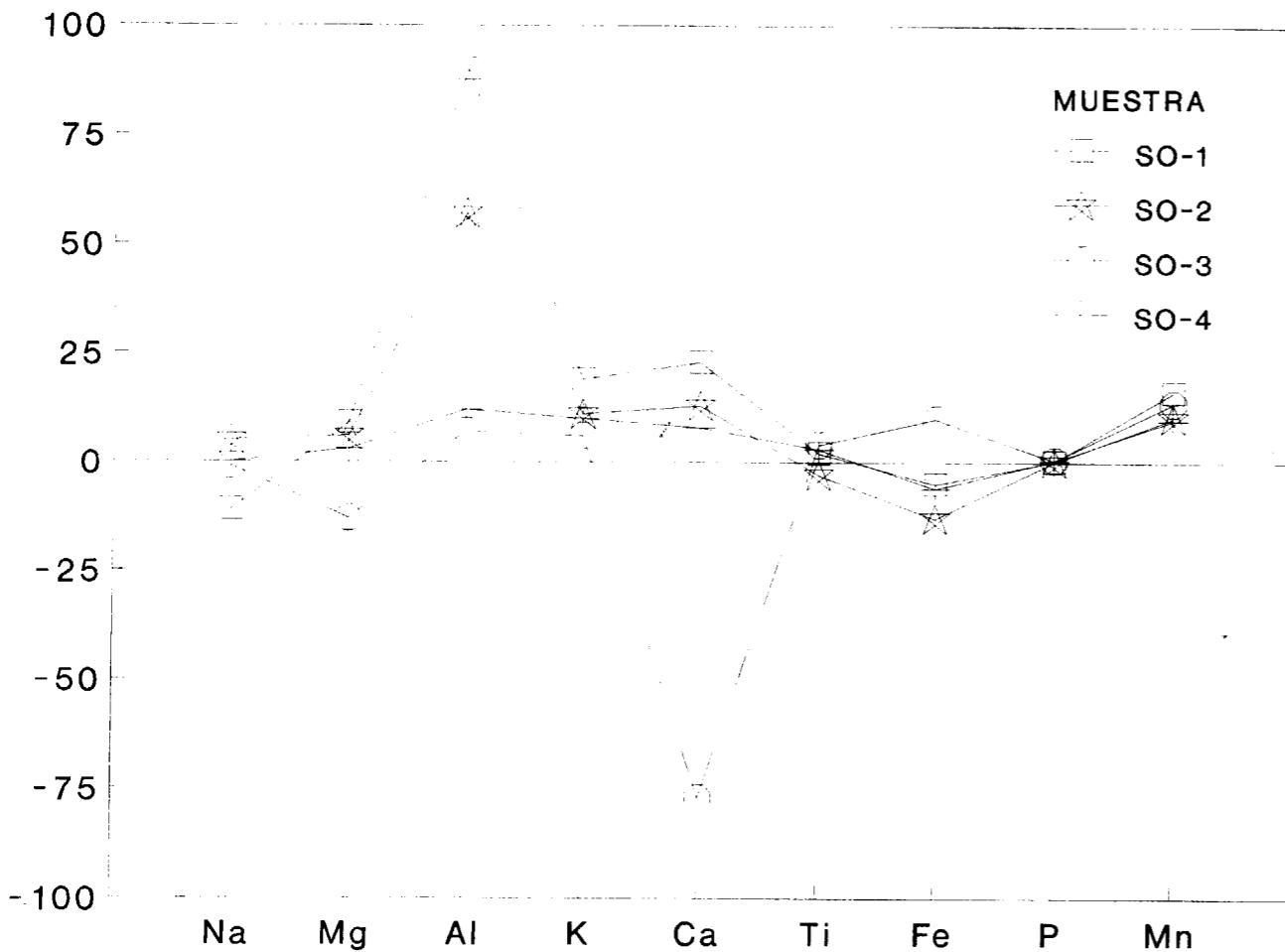


Figura 3.—Desviación de los resultados (certificados microondas) respecto a la CMD para los elementos mayoritarios y minoritarios.

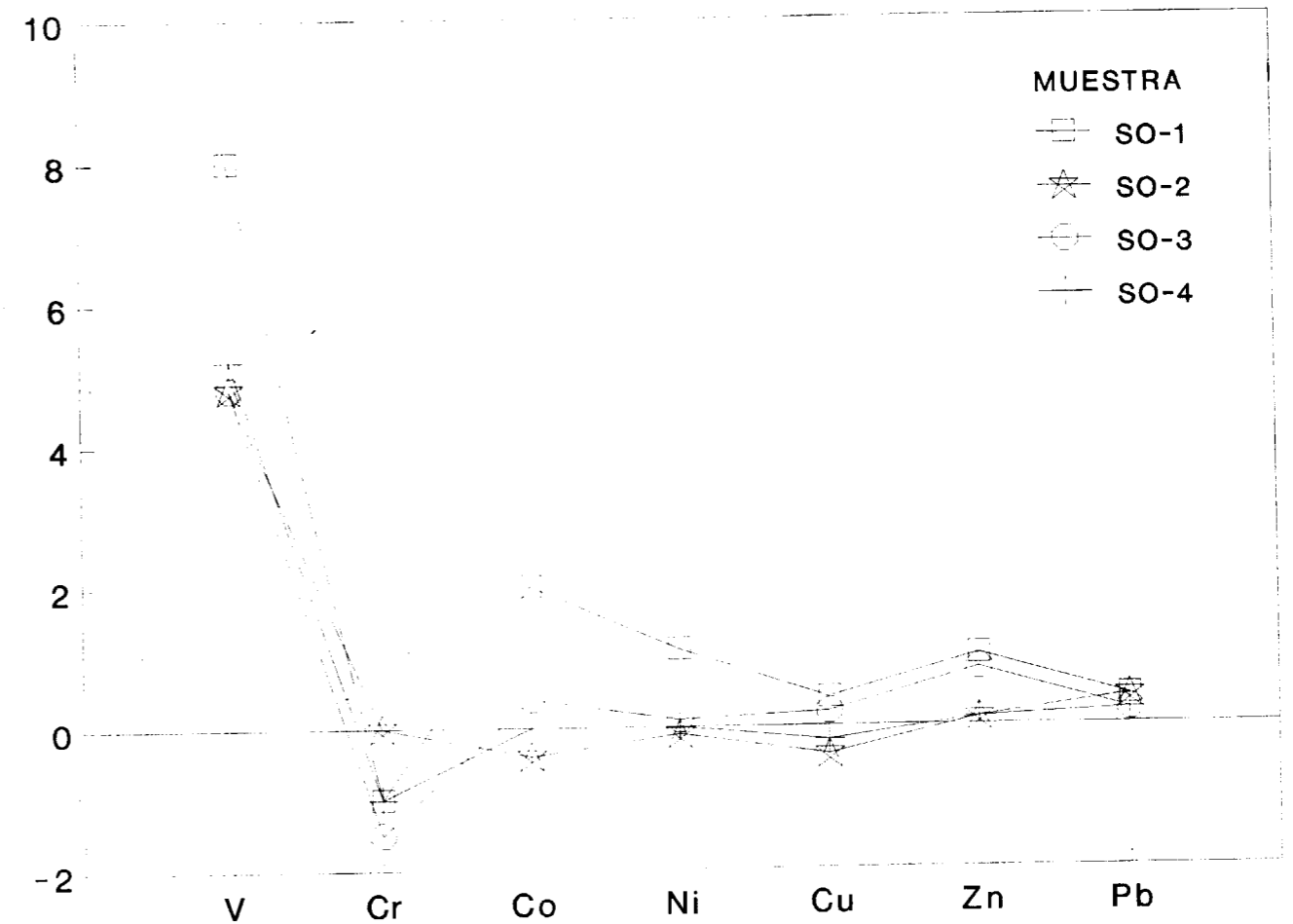


Figura 4.—Desviación de los resultados (certificados microondas) respecto a la CMD para los elementos traza.

SO-2) y en el Ca (SO-3); sin embargo, debe tenerse en cuenta que los dos primeros suelos contienen altos porcentajes de Al mientras que el tercero es un horizonte calcáreo. El resto de estos elementos, con unos contenidos más homogéneos en las cuatro muestras, se comportan de forma muy similar con desviaciones que nunca superan un valor absoluto de 25 respecto a la CMD.

Por lo que concierne a los elementos traza, experimentan un comportamiento similar, siendo los correspondientes al suelo SO-1 (V, Co y Ni) los más desviados en razón a su concentración (mayor en dicha muestra que en las otras tres). Una problemática especial la presenta el V en

todas las muestras, siendo las concentraciones encontradas para este elemento, tanto en el ataque con microondas como en el ácido a sequedad, aproximadamente un 15 por 100 más bajas que las certificadas. La variabilidad de valencia que experimenta este elemento durante los ataques ácidos induce a pensar que su porcentaje de recuperación no sea total, con su consiguiente detracción de la solución problema.

Paralelamente se han confrontado las concentraciones obtenidas por digestión de microondas con las certificadas, calculándose las correspondientes regresiones.

A título de ejemplo, en la figura 5 se ofrecen las representaciones realizadas para V, Co, Cr

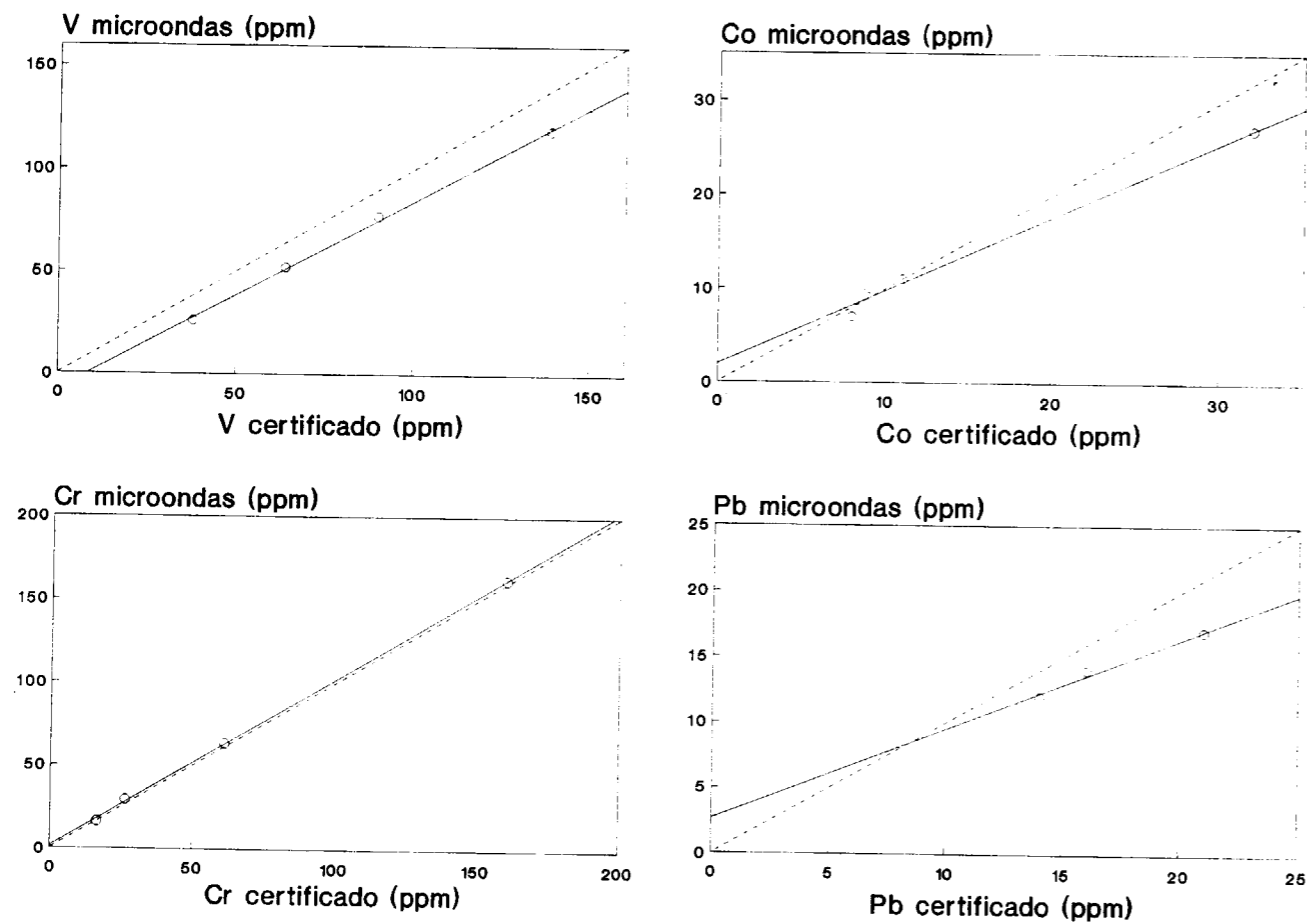


Figura 5.—Rectas de regresión concentración experimental frente a concentración certificada para V, Co, Cr y Pb.

y Pb; elementos los dos primeros cuyo comportamiento ya se ha discutido anteriormente; el Cr, que ofrece desviaciones mínimas en las cuatro muestras, y el Pb, que presenta respecto a los valores certificados diferencias apreciables, aunque pequeñas al nivel de concentración en estas muestras.

En la tabla III se presentan los coeficientes de correlación y las pendientes de las rectas de todos los elementos analizados. En general, las correlaciones están próximas a la unidad, lo que indica un comportamiento similar de las muestras frente al ataque. Analíticamente, las pendientes de las rectas son óptimas, a excepción de la del Co y la del Pb, ya discutidos.

CONCLUSIONES

La digestión de suelos empleando un horno de microondas es rápida, sencilla y limpia, aunque para obtener un aprovechamiento integral de la misma se requiere un estudio de muestras, optimización instrumental y mezclas ácidas más completo que el aquí expuesto.

Los porcentajes de los distintos elementos analizados por ICP en cuatro muestras patrón digeridas por este procedimiento concuerdan aceptablemente con los valores certificados y con los obtenidos por el sistema de disgregación que preconiza el empleo de $\text{HF} + \text{HNO}_3 + \text{HClO}_4$ en crisoles de teflón abiertos.

TABLA III
Parámetros de regresión

Elemento	Coefficiente de correlación	Pendiente de la recta
Na	0,9949	1,03
Mg	0,9996	1,04
Al	0,9985	0,87
K	0,9992	0,93
Ca	0,9999	1,07
Ti	0,9998	1,11
Fe	0,9996	1,03
P	1,0000	1,01
Mn	0,9964	0,95
V	0,9992	0,92
Cr	0,9998	1,00
Co	0,9945	0,78
Ni	0,9996	0,86
Cu	0,9988	0,94
Zn	0,9934	1,00
Pb	0,9941	0,68

REFERENCIAS

ABU-SAMRA, A.; MORRIS, J. S., y KOIRTYOHANN, S. R. (1975): *Wet ashing of some biological samples in a Microwave Oven*. Anal. Chem., 47, 1475-1477.

DEL BARRIO, S. (1991): *Estudio e investigación de un espectrómetro de emisión plasma ICP aplicado a la prospección geoquímica multielemental. Parte III: Optimización de parámetros instrumentales. Corrección de interferencias, Aplicaciones*. Bol. Geol. Miner., 102-3, 400-437.

NEAS, E. D., y COLLINS, N. J. (1988): *Microwave Heating: Theoretical Concepts and Equipment Design*. En: *Introduction to microwave sample preparation* (H. M. KINGSTON y L. B. JASSIE, eds.). ACS Professional Reference Book, 7-32.

LAMOTHE, P. J.; FRIES, T. L., y CONSUL, J. J. (1986): *Evaluation of a Microwave Oven System for the dissolution of geologic samples*. Anal. Chem., 58, 1881-1886.

Original recibido: Septiembre de 1991.

Original aceptado: Octubre de 1991.

Determinación experimental de la permeabilidad de la roca matriz o «intact rock»: Factores condicionantes.

V. G. RUIZ DE ARGANDOÑA, A. MARTINEZ HERNANDO y M. MONTOTO (*)

RESUMEN

En esta revisión bibliográfica se analizan los principales factores que influyen en la determinación experimental, en laboratorio, de la permeabilidad de la roca matriz o «intact rock». Uno de ellos, naturaleza de la red microfractográfica, constituye uno de los componentes petrográficos más condicionantes; otros, como la presión y la temperatura, aunque ambientales, condicionan también los resultados finales.

En general, puede afirmarse que la permeabilidad disminuye tanto al aumentar la rugosidad de las paredes de las microfisuras como al aumentar la presión efectiva. A su vez, aumenta con la temperatura, y a partir de un cierto valor de ésta, si se mantiene constante, se provoca un descenso en la permeabilidad.

Palabras clave: Permeabilidad, Roca matriz, Laboratorio, Presión, Temperatura, Fisuras.

ABSTRACT

This paper reviews the main parameters influencing the experimental evaluation in laboratory of the permeability of the «intact rock». Among those parameters, the nature of the microfractographic network, is one of the most influencing rock-forming components; others, like the pressure and the temperature, although related to the environmental conditions, clearly influence the final results.

In general, permeability decreases on the increase of the roughness of the crack walls as well as with the effective pressure. Besides, it increases with temperature, and above a given temperature level, even if it is maintained constant, the permeability is reduced.

Key words: Permeability, Intact-rock, Laboratory, Pressure, Temperature, Fisures.

INTRODUCCION

La permeabilidad de un material rocoso es la propiedad física que valora su capacidad para permitir el tránsito de un fluido a su través. Este trabajo, que complementa otro anterior (RUIZ DE ARGANDOÑA et al., 1989) se ciñe también a la permeabilidad de la «roca matriz» (o «intact rock»), según denominación de la «International Society for Rock Mechanics»: volumen de roca libre de discontinuidades de macizo, como fracturas, diaclasas, etc.

Su importancia en temas relacionados con el uso industrial del subsuelo y en especial en temas de tanto impacto social como el almacenamiento de residuos radioactivos en formaciones geológicas es condicionante. De hecho constituye una de las características petrofísicas más importantes a estudiar en las llamadas «barreras naturales» (macizo rocoso-almacén).

No obstante, su análisis no debe reducirse a la determinación de su valor numérico, sino que debe también estudiarse su dependencia con otros aspectos ambientales como la presión y la temperatura; es decir, con aquellos que, en

(*) Dpto. de Geología. Grupo de Petrofísica. Universidad de Oviedo.

general, pueden variar en el seno del macizo rocoso a lo largo de su utilización industrial.

Es el caso, ya mencionado, del almacenamiento de residuos de alta actividad, en que debe garantizarse que el progresivo incremento de la temperatura en la roca almacén no afectará a los valores futuros de la permeabilidad de la barrera próxima; en caso contrario podría dejar de ser efectiva la barrera diseñada para el aislamiento de tales residuos.

Por otra parte, en el caso que se produjese una migración de radionucleidos a través del material rocoso, entra en juego la influencia de la naturaleza de la rugosidad de la red microfractográfica (conectividad, rugosidad, tortuosidad, etcétera); dicha naturaleza, reflejada en los valores finales de la permeabilidad, puede impedir el movimiento de los radionucleidos o hacer que éste sea tan lento que su actividad disminuya a niveles de seguridad antes de alcanzar la biosfera.

PRESION

La relación entre la permeabilidad (k) y la presión de confinamiento (P_c) ha sido señalada por diversos autores a partir de los años 30 en adelante (GRIGGS, 1936; GOGUEL, 1948; FATT y DAVIS, 1952; McLACTHIE et al., 1985; GRAY y REX, 1963; ZOBACK y BYERLEE, 1975, 1976; SOMERTON y MATHUR, 1976; FRIEDMAN, 1976, y NELSON, 1976, entre otros), deduciéndose a partir de estos estudios que en compresión triaxial, la k es mucho más sensible que la porosidad a los cambios de P_c y ambas disminuyen al aumentar P_c (KNUTSON y BOHOR, 1963).

BRACE, en 1977, resume brevemente los conocimientos sobre este tema, diciendo que: «Los esfuerzos producen grandes cambios en la permeabilidad, ya sea aumentándola o disminuyéndola, siendo las diaclasas la zona de la roca más sensible a dichos cambios.

- La permeabilidad de las rocas diaclasadas es de varios órdenes de magnitud más grandes que la de al «roca matriz».
- La simple relación entre $(P_c - P_p)$ y la permeabilidad puede ser adecuada para granitos no diaclasados, pero no para arenas y rocas diaclasadas.»

En este sentido, y para la «roca matriz», puede decirse que la permeabilidad depende únicamente de la presión efectiva (P_e), por la relación

$$P_e = P_c - P_p \text{ (ROBIN, 1973)}$$

encontrándose tanto de forma experimental como teórica que esta ley no siempre se cumple, adquiriendo entonces la forma:

$$P_e = P_c - \&P_p$$

donde $\&$ es una constante que toma valores < 1 , siendo:

$$\& = 1 - V_p \beta_s / (\delta V_p / \delta p)$$

dependiendo por tanto de factores como: porosidad y geometría de los poros, textura y composición mineralógica.

La variación de $\&$ con la P_c puede ofrecer información útil sobre los cambios de la geometría del crack durante el cierre de éste.

Así, los simples modelos de cracks elípticos (WALSH, 1965, y BERNABE et al., 1982) muestran que los cracks son menos complicados cuando su «aspect-ratio» se aproxima a 1,0. Posteriormente, WHITERSPOON et al. (1982) determinan que la longitud de un crack se puede definir como la separación entre dos puntos en los cuales las paredes del crack están en contacto. Cuando el número de contactos aumenta, un crack podría progresivamente transformarse en una forma semiplanar (interconectando cracks con alto «aspect-ratio»), siendo los pequeños cracks resultantes más resistentes a la presión que el crack inicial.

WALSH (1981) concluye sus estudios indicando que valores de $\&$ cercanos a 1,0 indican fisuras muy estrechas (flujos de «crack-line») de muy bajo «aspect-ratio» y con superficies pulidas, siendo valores más bajos (0,56) los que indican fisuras de dimensiones más iguales (formas tubulares); por tanto, un aumento en el «aspect-ratio» debido a la rugosidad de los muros de cracks, puede explicar la disminución de $\&$ cuando aumenta la P_c .

Por otra parte, KRANZ et al., 1979 observó que cuando una de estas presiones (P_c o P_p) se mantiene constante y se cambia la otra, aparecen dos hechos: a) los efectos sobre la permeabilidad no son siempre iguales, para cambios igua-

les en P_c o en P_p ; y b) que la cantidad a la cual se cambian las dos presiones también afecta a la permeabilidad; es decir, que la permeabilidad depende claramente de los esfuerzos aplicados anteriormente.

Relacionado con ello, es la histéresis de la permeabilidad, siendo genéricamente una característica importante de los materiales que contienen cracks y son sometidos a ciclos de carga y descarga. La histéresis ocurre por el cierre de las fisuras, ya que una parte de ellas no recuperan su estado inicial y, por tanto, algunas asperezas pueden ser deformadas plásticamente mientras que otras pueden romperse con el aumento de la P_c .

Así, pues, la deformación plástica o la rotura de las asperezas hace que aumente el área de contacto y disminuya el área de superficie disponible para que la P_p actúe; en este sentido, aumenta la tortuosidad del flujo, provocando la histéresis de la permeabilidad sobre la roca, probablemente como resultado del daño hecho por la rotura del material entre los granos y paredes de los cracks.

Ya SPRUNT y BRACE, en 1974, determinaron que la presión producía tales efectos en el granito; asimismo, FEVES y SIMMONS (1976) señalaron que los ciclos de carga/descarga hacen disminuir la porosidad de crack. Posteriormente, SCHOLZ y HICKMAN, en 1983, observaron efectos similares de histéresis en la permeabilidad, en trabajos realizados en el granito Barre.

También, relacionado con todo esto, WITHERSPOON y GALE (1977) precisaron que la velocidad de flujo variaba mucho entre la inyección y extracción del fluido, siendo esta diferencia (histéresis) menor cuando se aumentaba el esfuerzo.

BERNABE (1986a), realizando medidas de k en granitos con ciclos de carga/descarga de la P_c , observó grandes efectos de histéresis en la permeabilidad y que k dependía fuertemente de los esfuerzos anteriormente aplicados; los estudios también sugieren una disminución de k con el aumento de P_c .

Así pues, de forma general puede decirse que la k disminuye al aumentar la P_c , y para una misma P_c la k aumenta con el incremento de la P_p (figs. 1 y 2) (BRACE et al., 1968; WALSH, 1981; PATSOULES y CRIPPS, 1982; WALSH y BRACE,

1984; BERNABE, 1986a y b, 1987 y 1988; HARPALANI y McPHERSON, 1985; WALDER y NUR, 1986; MORROW et al., 1986; MORROW y BYERLEE, 1988, y GAVRILENKO y GUEGUEN, 1989).

En cuanto al efecto de la anisotropía de los cracks en los valores de la permeabilidad con presiones efectivas, PENG y JOHNSON (1972) encontraron que no existía un aparente efecto en

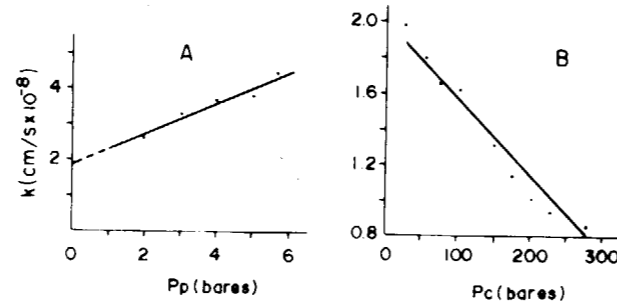


Figura 1.—(A) Permeabilidad (k) en función de la presión de poro (P_p) y P_c constante de 15 bares; (B) Permeabilidad (k) en función de la presión de confinamiento (P_c) y P_p constante de 1 bar (PATSOULES y CRIPPS, 1982).

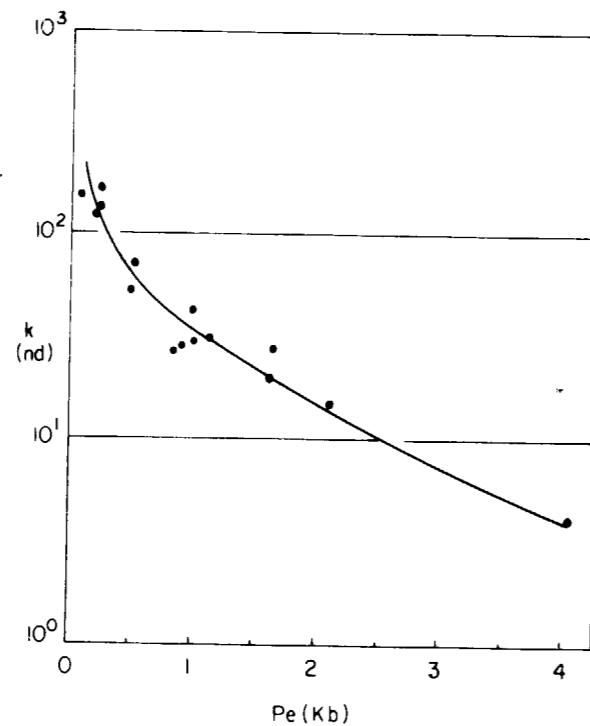


Figura 2.—Permeabilidad (k) en función de la presión efectiva (P_e) (BRACE et al., 1968).

los valores de k con dicha anisotropía, siendo BERNABE (1986b) el que concluye que algunos cracks participan en el flujo independientemente de su dirección (fig. 3).

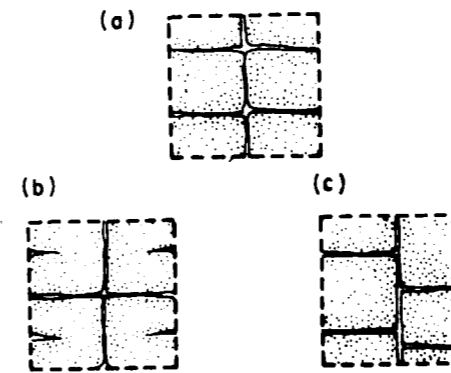


Figura 3.—Ejemplos de distribución de cracks de forma anisótropa: (a) con un fuerte efecto direccional sobre la permeabilidad; (b) sin efecto direccional, y (c) un reducido efecto (BERNABE, 1986b).

Los resultados de BERNABE (1986b) están de acuerdo con MADDEN (1976), que asegura que las propiedades de transporte por los cracks no son muy sensibles con débiles anisotropías de la roca. La situación sería muy diferente en rocas con fuertes anisotropías; así, BERNABE (1986b) midió la k en muestras, testificadas en tres direcciones perpendiculares, y calculó k para intervalos de P_c variando entre 0,6 y 0,7 MPa, apreciando el efecto direccional (fig. 4).

TRIMMER et al. (1980), relacionando el efecto de la P_c , P_p y el esfuerzo diferencial (porcentaje de esfuerzo de rotura, E_f) sobre la permeabilidad de la «roca matriz» y de materiales fracturados, simultaneando medidas de conductividad eléctrica (C), velocidad de propagación de ondas y variaciones en las aperturas de las fisuras, confirmaron que aumentando la P_e , la k y la C primeramente disminuyen debido al cierre de cracks (asociándose a una disminución de la porosidad) (fig. 5), seguido de un aumento posterior a partir del inicio de la dilatancia (BRACE et al., 1968).

Medidas realizadas en este sentido por otros autores están de acuerdo con este modelo (BRACE y ORANGE, 1968; ZOBACK y BYERLEE, 1975; BRACE, 1977, y KATSUBE y WALSH, 1987), y así, tan-

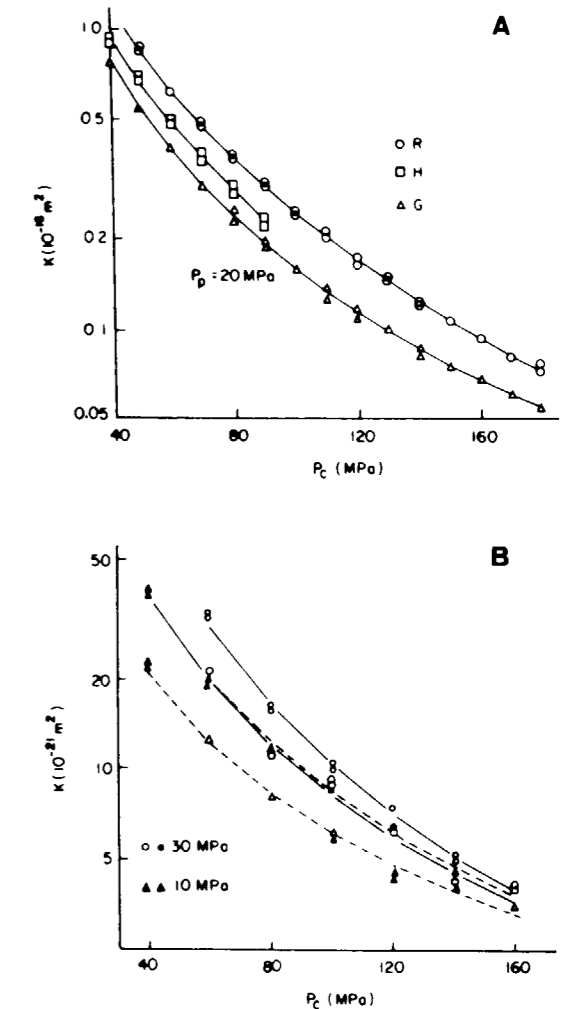


Figura 4.—(A) Permeabilidad (k) en función de la presión de confinamiento (P_c) en tres direcciones (R, H, G) y $P_p=20$ MPa; (B) para P_p de 10 y 30 MPa (BERNABE, 1986b).

to la k como la C disminuyen con el aumento de la P_c y aumentan cuando la roca se aproxima a la rotura.

Esto se pone de manifiesto debido a la relación existente entre resistividad y permeabilidad. Así, BRACE et al. (1968) y COYNER et al. (1979), a partir de medidas de la permeabilidad y resistividad (fig. 6), encontraron que ambas estaban relacionadas linealmente por la fórmula:

$$K = C^{1.5}$$

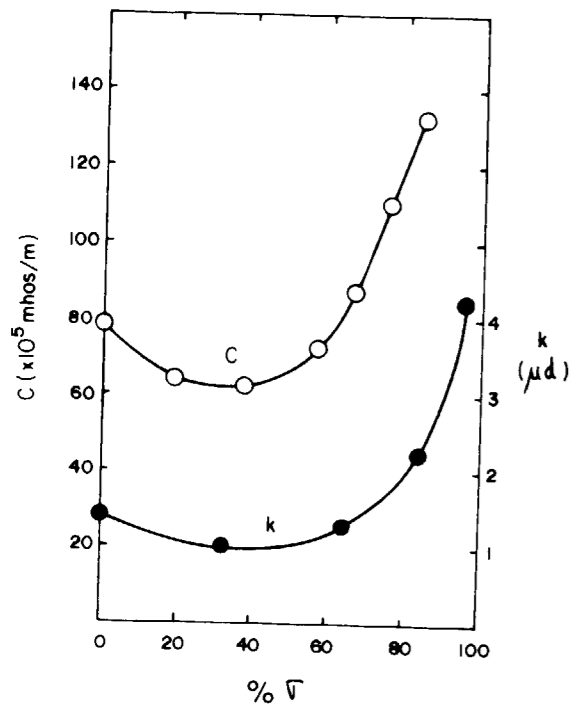


Figura 5.—Variación de la conductividad eléctrica (C) y permeabilidad (k), en función del esfuerzo (σ) (BRACE et al., 1968).

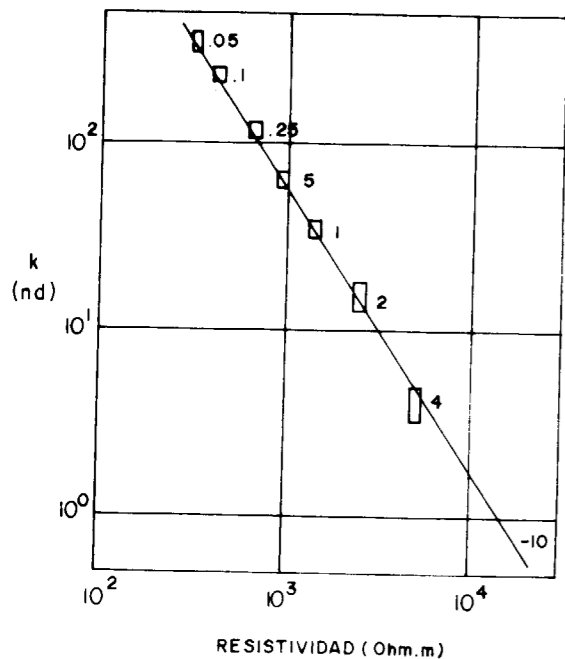


Figura 6.—Permeabilidad (k) en función de la resistividad eléctrica (los números en cada punto es la P_c en Kilobares) (BRACE et al., 1968).

Por otra parte, WALSH y BRACE (1984), en un gran número de ensayos, determinaron que:

$$k = C^r,$$

donde $1 \leq r \leq 3$.

WALSH (1981), basándose en la teoría de GREENWOOD y WILLIAMSON (1966), propuso que $k^{1/3}$ variaba linealmente con el Log P y experimentalmente determinó que k^n es proporcional a Log P, donde n no es necesariamente igual a 1/3. La expresión:

$$\frac{k}{k_0} = \left[1 - \sqrt{2 \left(\frac{h}{a_0} \right) \text{Ln} \left(\frac{P}{P_0} \right)} \right]^3 \left[\frac{1 - b(P - P_0)}{1 + b(P - P_0)} \right] \quad [1]$$

describe como el flujo del fluido por una fisura varía en función de la P_p y de la P_c .

Se asume que la fisura son dos superficies rugosas en contacto y que la resistencia del flujo a través de la misma es causada por: (a) la viscosidad del fluido; (b) las estrechas aperturas entre superficies, y (c) la tortuosidad de las vías de flujo debido a las diversas asperezas en contacto.

Así pues, el análisis de WALSH (1981) representa que la velocidad del flujo en [1] se puede expresar como el producto de dos factores: el primer término representa el efecto de la apertura y el segundo el efecto de la tortuosidad, aunque este último puede ser despreciable, es decir, $k^{1/3}$ está relacionado linealmente con el Ln P_c , ya que, como se ve en la expresión [1], la apertura aumenta a la tercera potencia, mientras que la tortuosidad no.

KATSUBE y WALSH, en 1987, teniendo en cuenta la baja porosidad de las rocas cristalinas, pensaron que la fisuración es principalmente de crack, lo cual ha sido confirmado por observaciones realizadas posteriormente al SEM. El modelo llamado «equivalent-channel» (WYLLIE y ROSE, 1950; WYLLIE y SPANGLER, 1952) se utiliza para interpretar el complicado flujo a través de la roca, reemplazando el crack por un simple tubo que tiene una sección transversal constante y sigue una vía tortuosa zx, donde x es la longitud de la muestra en la dirección del flujo y z es mayor que la unidad.

WALSH y BRACE, en 1984, analizan de nuevo el modelo de «equivalent-channel» y combinan expresiones de la permeabilidad (k) y del factor de formación (F) ($F = C_p/C_e$), obteniendo nuevas expresiones para m y encontrando una relación empírica entre los cambios de la permeabilidad y el factor de formación:

$$k = a \cdot F^r,$$

donde $1 \leq r \leq 3$ y a es una constante que varía con cada tipo de roca.

Posteriormente, estudiaron el efecto de la presión sobre las propiedades de transporte, en un modelo que representaba el flujo como un conducto con la forma de un crack, obteniendo la expresión:

$$a = (bkF)^{1/2},$$

donde

$$a = m,$$

siendo a=apertura del crack y b=es una constante que toma valores entre $2 \leq b \leq 3$ (el valor 2,0 es para conductos circulares y 3,0 para conductos con secciones iguales a las de los cracks).

Dichos autores determinaron que $(3kF)^{1/2}$ es proporcional a k^n , donde $n = r - 1/2r$. Asimismo, $(3kF)^{1/2}$ es proporcional al Log P, siendo la inclinación de dicha relación la desviación standar de la altura de las asperezas.

Por lo tanto, como se ha dicho anteriormente, $1 \leq r \leq 3$, conlleva que $0 \leq n \leq 1/3$, siendo, por lo tanto el valor $n = 1/3$ el límite superior; así, pues, y dado que el valor de n es relativamente pequeño, requieren medidas precisas y una preparación de las muestras muy cuidadosa para obtener su valor experimental.

KATSUBE y WALSH (1987), siguiendo las experiencias de ARCHIE (1942) y de BRACE et al. (1965), representan la permeabilidad como una función de la porosidad efectiva, encontrando buenos parámetros de correlación.

Por último, estudios realizados sobre la variación de la k con el tiempo y una P_c constante, diversos autores (SPRUNT y NUR, 1976; SUMMERS et al., 1978; SUTHERLAND y CAVE, 1980, y MARONE y RUBESTONE, 1988) han demostrado cómo la k disminuía con el tiempo, con una

velocidad que depende de la P_c y de la temperatura a que está sometida la muestra (fig. 7).

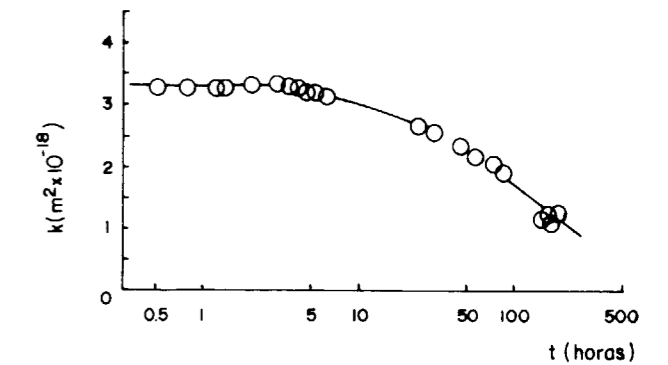


Figura 7.—Variación de la permeabilidad (k) con el tiempo (t); P_c constante de 13.8 MPa (SUTHERLAND y CAVE, 1980).

Asimismo, probaron la influencia del tiempo y P_c constante, la cual, al aumentar, reduce la velocidad de disminución de la permeabilidad, pero no cambia su tendencia descendente.

TEMPERATURA

Los efectos de la temperatura sobre la permeabilidad en materiales rocosos han sido estudiados desde hace tiempo (SOMERTON et al., 1965; PERAMI, 1971; SANYAL et al., 1974; SPRUNT y NUR, 1976; NELSON, 1976; LUNDSTROM y STILLE, 1978; SUMMERS et al., 1978; BAUER y JOHNSON, 1979; BRACE, 1980; PAGE y HEARD, 1981; VOEGELE et al., 1981; CALLEJA, 1985 y VAUGHAN et al., 1986), entre otros.

Por regla general, existe un aumento progresivo de la permeabilidad con la temperatura, pero, a partir de una cierta temperatura, y con el mantenimiento de la misma, tiene lugar una disminución.

Así, POTTER (1978), entre otros, observó que la permeabilidad de la roca depende de la temperatura y de la presión de confinamiento a la cual está la roca. Este aumento de la permeabilidad es causada por los cracks producidos en las muestras debido a la expansión térmica diferencial de los minerales.

Posteriormente, HEARD (1980) estudió el coeficiente de expansión térmica lineal (α) de una monzonita cuarzosa a una P_e de 0, 13,8 y 27,6 MPa (0-276 bars) y una temperatura desde 19° a 300° C (fig. 8), observando que los valores de α no son constantes, y ni eran una simple función

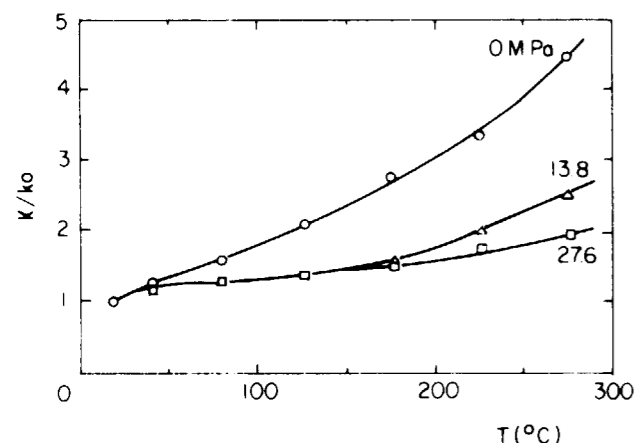


Figura 8.—Variación de la permeabilidad (k) con la temperatura (T), para diferentes presiones efectivas (HEARD, 1980).

de la temperatura o presión. Así, los estudios sobre la roca calentada indican que la expansión térmica está asociada con la formación de nuevos microcracks, calculando que el incremento de la permeabilidad para la roca calentada se podría evaluar por:

$$\frac{K_T}{K_a} \propto \frac{\Delta T}{\Delta a^3}$$

Diversos autores (BRACE et al., 1968; ZOBACK y BYERLEE, 1975; SUMMERS et al., 1978, y POTTER et al., 1981), entre otros, estudiaron la variación de la permeabilidad a temperatura constante, con el tiempo, en materiales rocosos con diferentes sistemas de fracturas y en la «roca matriz», demostrando que la permeabilidad depende claramente del tiempo y de la temperatura.

En todos los casos, la permeabilidad a temperaturas elevadas aumentaba entre 1 y 2 órdenes de la permeabilidad a la temperatura ambiente. Posteriormente, con el tiempo, la permeabilidad disminuía debido a la disolución de algunos minerales y su posterior deposición sobre las microfisuras

cerrando los poros. Es decir, la disolución de los feldespatos y el cuarzo se concentra cerca de la entrada de los poros, donde la presión de poro era más alta. La precipitación de los mismos se producía dentro de la muestra donde la presión decaía, originando, finalmente, una reducción de la permeabilidad.

Así, la permeabilidad final después de 10 días a 300° C fue menor que la obtenida a temperaturas más bajas. Además, existe una reducción drástica de la permeabilidad en el primer día y medio, a partir de una temperatura de aproximadamente 400° C.

Los estudios de MORROW et al. (1981 y 1985) y MOORE et al. (1986) vienen a confirmar lo anteriormente expuesto. Estos autores estudiaron los cambios de la permeabilidad como flujo de agua a través de muestras graníticas sometidas a diferentes gradientes de temperaturas, simulando profundidades de 1,2 y 2,4 kilómetros. En todos los casos, la permeabilidad disminuyó entre 1 y 2 órdenes de magnitud y a una proporción que aumentaba con las altas temperaturas. Así, a 200° C la permeabilidad descendió en un mes alrededor de 1/3 del valor original (fig. 9A); aumentando la temperatura, la disminución de la permeabilidad se acentuó, ocurriendo sólo en 4 días a 280° C (fig. 9B); a 310° C disminuyó fuertemente en unos pocos días al 5 por 100 de su valor inicial. La disolución del cuarzo y feldespatos y su nueva deposición sobre los cracks parece ser la causa principal de reducción de la permeabilidad (MOORE et al., 1983).

Así pues, varios son los parámetros que pueden afectar a la permeabilidad cuando la roca es calentada: composición mineralógica, porosidad abierta, alteraciones químicas debidas a la temperatura (tanto de los minerales como del agua presente en el interior de los poros), esfuerzos «in situ», gradiente de temperatura y tiempo.

RUGOSIDAD DE LAS FISURAS

BRACE et al., 1968; ZOBACK y BYERLEE, 1975; SUMMERS et al., 1978, entre otros, determinaron que la historia del esfuerzo y la rugosidad de la superficie de las fisuras tenían un gran efecto sobre las propiedades hidráulicas de las rocas en el caso de rocas fisuradas.

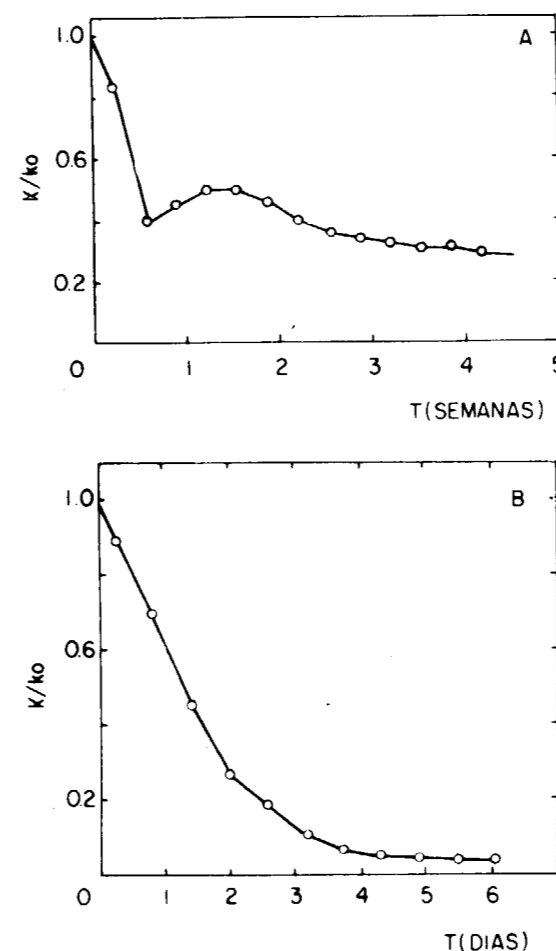


Figura 9.—Variación de la permeabilidad normalizada con el tiempo (t) a diferentes temperaturas: A) 200° C; B) 280° C (MORROW et al., 1981).

Ya en este sentido, IWAI (1976) investigó los efectos que el área de contacto y la geometría de las asperezas tienen sobre la permeabilidad. Así, a bajas presiones (2-6 bars), el área de contacto real de un granito era menor de 0.1 por 100 del área total aparente, y aumentó a 10-12 por 100 a 200 bars, encontrando la siguiente relación:

$$\gamma \frac{K_p}{K_o} + 1 = \frac{\infty}{\gamma \frac{A_r}{A+1}}$$

donde γ , ∞ son constantes empíricas; afirmando que el área de contacto aumentaba linealmente con la carga normal.

Posteriormente, KRANZ et al. (1979) investigaron la influencia de la rugosidad de la superficie de las fisuras sobre la permeabilidad, encontrando que el pulido o no de las mismas tiene el mismo efecto que el de una presión. Así, para cualquier tipo de rugosidad inicial, al aumentar la presión aumenta el área de contacto real entre las dos superficies opuestas y, a cualquier presión, podemos obtener mayor o menor superficie de contacto real, dependiendo de la rugosidad inicial existente.

Según los anteriores autores, la rugosidad afecta a la permeabilidad de dos formas: por una parte, haciendo cambiar la longitud (tortuosidad) de las fisuras y, por otra parte, afectando al cierre de las mismas.

Así, en las superficies muy pulidas las asperezas son pequeñas, y a bajas presiones la fisura se cierra rápidamente, haciendo disminuir rápidamente la permeabilidad, hasta que alguna de las asperezas toma contacto con la superficie opuesta aumentando la tortuosidad del flujo, y disminuyendo la velocidad de cierre de la junta tendiendo a una permeabilidad constante (fig. 10). Sin embargo, en superficies donde las asperezas son más grandes, la tendencia a dis-

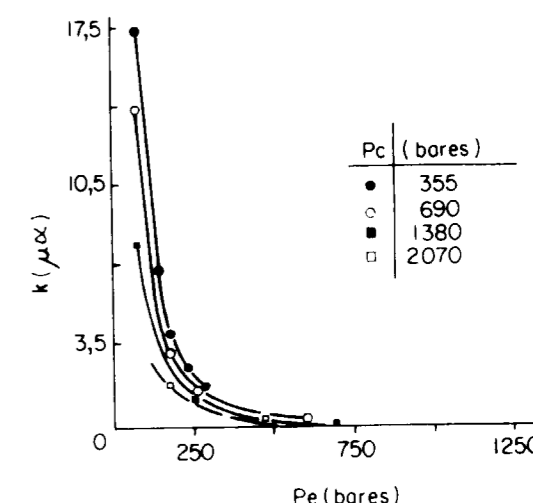


Figura 10.—Permeabilidad (k) frente a diferentes presiones efectivas (P_e) cuyas superficies están pulidas con abrasivo de grano 600 (KRANZ et al., 1979).

minuir la permeabilidad es más lenta según aumenta la presión. La figura 11 resume todo lo

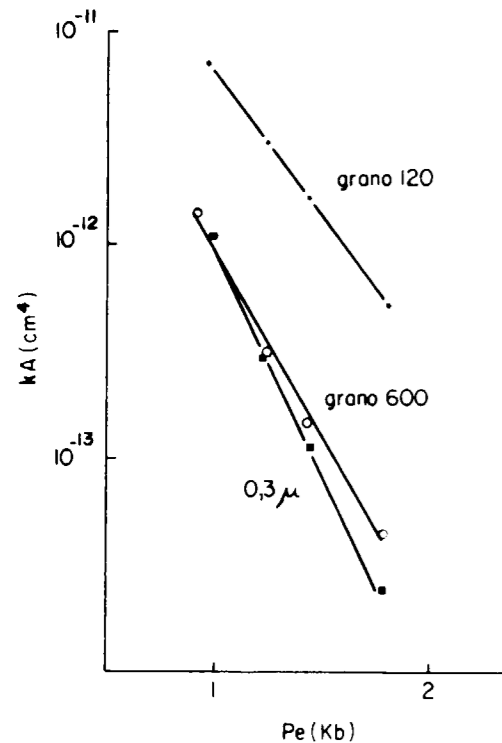


Figura 11.—Relación entre kA_f , presión efectiva (P_e) y rugosidad de las fisuras (KRANZ et al., 1979).

expuesto anteriormente; así, kA_f disminuye con el pulido de las superficies de las fisuras y, al aplicar una presión efectiva, la velocidad de disminución de la permeabilidad en la fisura es mayor en aquellas en las que las asperezas son menores.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a la «Commission of the European Communities, Directorate-General for Science, Research and Development Joint Research Center, R & D Programme, Management and Storage of Radioactive Waste», Proyecto FI1W-0143-C (TT) por la financiación de esta investigación.

APENDICE

k = Permeabilidad (m/s).

P_c = Presión de confinamiento (Pascal).

P_p = Presión de poro (Pascal).

P_e = Presión efectiva (Pascal).

β = Coeficiente de la ley de presión efectiva.

V_p = Volumen de poro (m^3).

β_s = Compresibilidad de la roca matriz (Pascal).

$\delta V_p / \delta P$ = Gradiente de volumen de poro con la presión hidrostática (m^3 /pascal).

E_f = Esfuerzo diferencial (porcentaje del esfuerzo de rotura) (Pascal).

C = Conductividad eléctrica (mho/m).

P = Presión (Pascal).

k_o = Permeabilidad a una presión P_o de referencia (m/s).

a_o = Apertura de la fractura a una presión P_o de referencia (m).

h = Valor medio de las alturas de las asperezas de la fractura (m).

$b = \delta s / \delta p$ = Variación del área de contacto (m^2) y la presión aplicada (Pascal).

x = Longitud de la muestra en dirección del flujo (m).

z = Valor numérico > 1 .

F = Factor de formación.

C_p = Conductividad del poro (m/s).

C_e = Conductividad efectiva (m/s).

m = Radio hidráulico medio (m).

α = Coeficiente de expansión térmica ($^{\circ}K^{-1}$).

k_T = Permeabilidad a la temperatura T (m/s).

k_a = Permeabilidad inicial a la temperatura ambiente (m/s).

ϕ_T = Porosidad a la temperatura T (%).

ϕ_a = Porosidad inicial a la temperatura ambiente (%).

k_p = Permeabilidad a una presión determinada (m/s).

A_r = Área real de fractura (m^2).

A = Área aparente de la fractura (m^2).

A_f = Área transversal del flujo (m^2).

REFERENCIAS

- ARCHIE, G. E. (1942): *The electrical resistivity log as aid in determining some reservoir characteristics*. Trans. Am. Inst. Mech. Eng., 146, pp. 54-61.
- BAUER, S. J., y JOHNSON, B. (1979): *Effects of slow uniform heating on the physical properties of the Westerly and Charcoal granites*. 20th U.S. Symp. on Rock Mechanics, Austin, Texas (USA), pp. 7-18.
- BERNABE, Y.; BRACE, W. F., y EVANS, R. (1982): *Permeability, porosity and pore geometry of hot-pressed calcite*. Mech. Mater., 1, pp. 173-183.

BERNABE, Y. (1986a): *Pore volumen and transport properties changes during confining pressure cycling of several crystalline rocks*. Mech. Mater., 5, pp. 235-249.

BERNABE, Y. (1986b): *The effective pressure law for permeability in Chelmsford Granite and Barre Granite*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 23 (3), pp. 267-275.

BERNABE, Y. (1987): *The effective pressure law for permeability during pore pressure and confining pressure cycling of several crystalline rocks*. J. of Geophys. Res., 92 (B1), pp. 649-657.

BERNABE, Y. (1988): *Comparison of the effective pressure law for permeability and resistivity formation factor in Chelmsford granite*. Pageoph., 127 (4), pp. 607-625.

BRACE, W. F.; ORANGE, A. S., y MADDEN, T. R. (1965): *The effect of pressure on the electrical resistivity of water-saturation crystalline rocks*. J. of Geophys. Res., 70 (22), pp. 5669-5678.

BRACE, W. F., y ORANGE, A. S. (1968): *Further studies of the effect of pressure on electrical resistivity of rocks*. J. of Geophys. Res., 73, pp. 5407-5420.

BRACE, W. F.; WALSH, J. B., y FRANGOS, W. T. (1968): *Permeability of granite under high pressures*. Journal of Geophys. Res., 73 (6), pp. 2225-2236.

BRACE, W. F. (1977): *Permeability from resistivity and pore shape*. J. of Geophys. Res., 82 (23), pp. 3343-3349.

BRACE, W. F. (1980): *Permeability of crystalline and argillaceous rocks*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 17 (5), pp. 241-251.

CALLEJA, L. (1985): *Variación de propiedades físicas en rocas cristalinas sometidas a gradientes térmicos*. Tesis Doctoral. Facultad de Geología. Universidad de Oviedo, 252 pp.

COYNER, K. B.; BRACE, W. F., y WALSH, J. B. (1979): *New laboratory measurements of permeability and electrical resistivity of crystalline rocks*. Trans. Am. Geophys. Union, 60, p. 943.

FATT, I., y DAVIS, D. H. (1952): *Reduction in permeability with overburden pressure*. Jour. Petroleum Technology, 4 Tech. Note 147, Dec., pp. 16.

FEVES, M., y SIMMONS, G. (1976): *Effects of stress on cracks in Westerly granite*. Bull. Seism. Soc. Am., 66, pp. 1755-1765.

FRIEDMAN, M. (1976): *Porosity, permeability and rock mechanics. A review*. Proc. 17th U.S. Symp. on Rock Mechanics (Site Characterization), Utah (USA), pp. 2A1.1-2A1.17.

GAVRILENKO, P., y GUEGUEN, Y. (1989): *Pressure dependence of permeability: a model for cracked rocks*. Geophys. J. Int., 98, pp. 159-172.

GOGUEL, J. (1948): *Introduction à l'étude mécanique des déformations de l'écorce terrestre*. Paris, Imprimerie Nationale, 12 pp.

GRAY, D. H., y REX, R. W. (1963): *Formation damage in sandstones caused by clay dispersion and migration*. Clays & Clay, Mins. Proc., 14th Nat. Conf., pp. 355-366.

GREENWOOD, J. A., y WILLIAMSON, J. (1966): *Contact of nominally flat surface*. Proc. R. Soc. London Ser., A-295, pp. 300-319.

GRIGGS, D. T. (1936): *Deformations of rocks under high confining pressure*. Jour. Geology, 44, pp. 541-577.

HARPALANI, S., y McPHERSON, M. J. (1985): *Effect of stress on permeability of coal*. 26th US Symp. on Rock Mechanics (Research & Engineering Applications in Rock Masses), Rapid City (SD, USA), pp. 831-839.

HEARD, H. C. (1980): *Thermal expansion and inferred permeability of climax quartz monzonite to 300° C and 27.6 MPa*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 17 (5), pp. 289-296.

IWAI, K. (1976): *Fundamental studies of fluid flow through a single fracture*. Ph. D. Thesis, Univ. Stafdord (Calif.), USA, 208, 237 pp.

KATSUBE, T. J., y WALSH, J. B. (1987): *Effective aperture for fluid flow microcracks*. Int. J. of Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 24 (3), pp. 175-183.

KNUTSON, C. F., y BOHOR, B. F. (1963): *Reservoir rock behaviour under moderate confining pressure*. Proc. 5th Symp. on Rock Mechanics, Minnesota (USA), pp. 627-659.

KRANZ, R. L.; FRANKEL, A. D.; ENGELDER, T., y SCHOLZ, C. H. (1979): *The permeability of whole and jointed Barre Granite*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 16 (4), pp. 225-234.

LUNDSTROM, L., y STILLE, H. (1978): *Large-scale permeability test of the granite in the Stripa mine and thermal conductivity test*. Lawrence Berkeley Lab. Tech. Rept. N. LBL-7052, 33 pp.

MADDEN, T. R. (1976): *Random networks and mixing laws*. Geophys., 41, pp. 1104-1125.

MARONE, C., y RUBESTONE, J. (1988): *An experimental study of permeability and fluid chemistry in an artificially joint marble*. J. of Geophys. Res., 93 (B11), pp. 13763-13775.

McLATCHIE, A. S.; HEMSTOCK, R. A., y YOUNG, J. W. (1958): *The effective compressibility of reservoir rock and its effect on permeability*. Trans. American Inst. Mech. Engr., 213, pp. 386-388.

MOORE, D. E.; MORROW, C. A., y BYERLEE, J. D. (1983): *Chemical reactions accompanying fluid flow through granite held in a temperature gradient*. Geochimica et Cosmochimica Acta, 47, pp. 445-453.

MOORE, D. E.; MORROW, C. A., y BYERLEE, J. D. (1986): *High-temperature permeability and groundwater chemistry of some Nevada test site tuffs*. J. of Geophys. Res., 91 (B2), pp. 2163-2171.

MORROW, C.; LOCKNER, D.; MOORE, D., y BYERLEE, J. (1981): *Permeability of granite in a temperature gradient*. J. of Geophys. Res., 86 (B4), 6, pp. 3002-3008.

MORROW, C. A.; MOORE, D. E., y BYERLEE, J. D. (1985): *Permeability changes in crystalline rocks due to temperature: effects of mineral assemblage*. Proc. Symp. Mat. Res. Soc., 44, pp. 467-474.

MORROW, C. A.; ZHANG BO-CHONG y BYERLEE, J. D. (1986): *Effective pressure law for permeability of Westerly granite under cycling loading*. J. of Geophys. Res., 91, pp. 3870-3876.

MORROW, C. A., y BYERLEE, J. (1988): *Permeability of rock samples from Cajon Pass, California*. Geophys. Res. Letters, 15 (9), pp. 1033-1036.

NELSON, R. A. (1976): *An experimental study of fracture permeability in porous rock*. 17th U.S. Symp. on Rock Mechanics (Site Characterization), Utah (USA), pp. 2A6.1-2A6.8.

PAGE, L., y HEARD, H. C. (1981): *Elastic moduli, thermal expansion, and inferred permeability of Climax quartz monzonite and Sudbury gabbro to 500° C an 55 MPa*. Proc. 22nd U.S. Symp. on Rock Mechanics (Rock Mechanics from Research to Applications), Cambridge, MA (USA), 1, pp. 97-104.

PATSOULES, M. G., y CRIPPS, J. C. (1982): *An investigation of the permeability of Yorkshire Chalk under differing Pore water and confining pressure conditions*. Energy Sources, 6 (4), pp. 321-334.

PENG, S. S., y JOHNSON, A. M. (1972): *Crack growth and faulting in cylindrical specimens of Chelmsford granite*. Int. J. of Rock Mech. Mat., 2, pp. 345-352.

PERAMI, R. (1971): *Contribution à l'étude expérimentale de la microfissuration des roches sous actions mécaniques et thermiques*. Thèse Doct. ès Sci. Natur. Univ. Paul Sabatier, Toulouse (Francia), núm. d'ordre 440, 276 pp.

POTTER, J. M. (1978): *Experimental permeability studies at elevated temperature and pressure of granitic rocks*. Thesis Doct., Los Alamos Sci. Lab., LA-7224-T, 101 pp.

POTTER, J. M.; DIBBLE, W. E., y NUR, A. (1981): *Effects of temperature and solution composition on the permeability of St. Peters sandstone*. J. Petroleum Tech. Mayo, pp. 905-907.

ROBIN, P. Y. F. (1973): *Note on effective pressure*. J. of Geophys. Res., 78 (14), pp. 2434-2437.

RUIZ DE ARGANDOÑA, V. G.; MARTINEZ HERNANDO, A., y MONTOTO, M. (1989): *Permeabilidad de la «roca matriz» o «intact rock»*. Boletín Geológico y Minero, vol. 100-4, pp. 688-694.

SANYAL, S. K.; MARS DEN, Jr., S. S., y RAMSEY, Jr., H. J. (1974): *Effect of temperature on petrophysical properties of reservoir rocks*. SPE, 4898, SPE & AIME, 23 pp.

SCHOLZ, C. H., y HICKMAN, S. H. (1983): *Hysteresis in the closure of nominally flat crack*. J. of Geophys. Res., 88, pp. 6501-6504.

SOMERTON, H. W.; MEHTA, M. M., y DEAN, G. M. (1965): *Thermal alteration of sandstones*. 39th Ann. Soc. Petr. Engr. of Am. Inst. Min. Met. and Petr. Engr. Fall. Mtg., Houston, 6 pp.

SOMERTON, H. W., y MATHUR, K. A. (1976): *Effects of temperature and stress on fluid flow and storage capacity of porous rocks*. Proc. 17th U.S. Symp. on Rock Mechanics (Site characterization), Utah (USA), pp. 2A2.1-2A2.8.

SPRUNT, E. S., y BRACE, W. F. (1974): *Some permanent structural changes in rocks due to pressure and temperature*. Proc. of 3rd Congress ISRM (Advances in Rock Mechanics), Denver (USA), pp. 524-529.

SPRUNT, E. S., y NUR, A. (1976): *Reduction of porosity by pressure solution: Experimental verification*. Geology, 4, pp. 463-466.

SUMERS, R.; WINKLER, K., y BYERLEE, J. (1978): *Permeability changes during the flow of water Through Westerly granite at temperatures of 100-400° C*. J. of Geophys. Res., 83 (B1), pp. 339-344.

SUTHERLAND, H. J., y CAVE, S. P. (1980): *Argon gas permeability of New Mexico rock salt under hydrostatic compression*. Int. J. Rock Mech. Min. & Geomech. Abstr., 17 (5), pp. 281-288.

TRIMMER, D.; BONNER, B.; HEARD, H. C., y DUBA, A. (1980): *Effect of pressure and stress on water transport in intact and fractures gabbro and granite*. J. of Geophys. Res., 85 (B12), pp. 7059-7071.

VAUGHAN, P. J.; MOORE, D. E.; MORROW, C. A., y BYERLEE, J. D. (1986): *Role of cracks in progressive permeability reduction during flow of heated aqueous fluid through granite*. J. of Geophys. Res., 91 (B7), pp. 7517-7530.

VOEGELE, M.; HARDIN, E.; LINGLE, D.; BOARD, M., y BARTON, N. (1981): *Site characterization of joint permeability using heated block test*. Proc. 22nd Symp. on Rock Mechanics (Rock Mechanics from Research to Applications), Cambridge, MA (USA), pp. 120-127.

WALDER, J., y NUR, A. (1986): *Permeability measurement by the pulse-decay method: Effects of poroelastic phenomena and non-linear pore pressure diffusion*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 23 (3), pp. 225-232.

WALSH, J. B. (1965): *The effect of crack on the uniaxial elastic compression of rocks*. J. of Geophys. Res., 70, pp. 399-411.

WALSH, J. B. (1981): *Effect of pore pressure and confining pressure on fracture permeability*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., vol. 18 (5), pp. 429-435.

WALSH, J. B., y BRACE, W. F. (1984): *The effect of pressure on porosity and the transport properties of rock*. J. Geophys. Res., vol. 89 (B11), pp. 9425-9431.

WITHERSPOON, P. A., y GALE, J. E. (1977): *Mechanical and hydraulic properties of rocks related to induced seismicity*. Eng. Geology, 11, pp. 23-55.

WITHERSPOON, P. A.; TSANG, Y. W.; LONG, J. C. S., y NOORIPHAD, J. (1982): *New approaches to problems of*

fluid flow in fractured rock masses. Proc. 22nd. U.S. Symp. on Rock Mechanics (Rock Mechanics from Research Applications), Cambridge, MA (USA), pp. 1-20.

WYLLIE, M. R., y ROSE, W. D. (1950): *Some theoretical considerations related to the quantitative evaluation of the physical characteristics of reservoir rock from elastic log data*. Petrol. Trans. AIME, 189, pp. 105.

WYLLIE, M. R., y SPANGLER, M. B. (1952): *Application of*

electrical resistivity measurements to problem of fluid flow in porous media. Am. Assoc. Petrol. Bull., 86, pp. 359.

ZOBACK, M. D., y BYERLEE, J. D. (1975): *Permeability and effective stress*. The Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 59 (1), pp. 154-158.

ZOBACK, M. D., y BYERLEE, J. D. (1976): *Effect of high-pressure deformation on permeability of Ottawa sand*. The Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 60 (9), pp. 1531-1542.

Original recibido: Enero de 1991.

Original aceptado: Julio de 1991.

Características climáticas y ambientales durante el Holoceno en Almizaraque. Análisis polínico de los sedimentos fluviales de Villaricos (Almería). (*)

Por B. MARISCAL (**)

RESUMEN

Se estudia el contenido polínico en el yacimiento de Almirazaque (Almería), perteneciente al Subboreal (Holoceno).

El trabajo enfoca el estudio paleopolínico a través de los espectros polínicos obtenidos. Las asociaciones de palinormos, así como las secuencias reflejadas en los palinogramas, indican las fluctuaciones de los diferentes taxones vegetales y las condiciones climáticas.

Palabras clave: Polen, Holoceno, Paleoclimatología.

ABSTRACT

The pollen content from the Subboreal (Holocene) materials in the Almizaraque (Almería) deposits have been studied. The work approaches the paleopolynological study through the content of the pollen spectrum obtained, the associations between palynomorphs and the sequences reflected in the palynographs would show the fluctuations of the different vegetal taxons and climate conditions.

Key words: Pollen, Holocene and Paleoclimatology.

INTRODUCCION

Los análisis polínicos de Villaricos muestran los espectros polínicos de unos sedimentos relacionados con el poblado de Almirazaque de la Edad del Cobre, Subboreal (DELIBES, 1986), pertenecientes a un ambiente fluvial-litoral costero. La formación y características de los aportes sedimentarios influyen en el grado de representatividad de las fitoasociaciones presentes durante la génesis de los mismos.

En la interpretación de los conjuntos polínicos no se puede prescindir del carácter dinámico de

los procesos de sedimentación en la zona costera, lo cual origina espectros polínicos influenciados por el régimen fluvial y litoral, esto sucede en este yacimiento, ya que se ha estudiado el contenido polínico de dos enclaves próximos entre sí, obteniéndose diversas fitoasociaciones afectadas por la presencia de corrientes de agua, áreas lacustres y zonas de elevada salinidad.

En los sondeos efectuados en la zona A se obtiene un espectro polínico que está compuesto por especies arbóreas relacionadas con formaciones boscosas de tipo mediterráneo, plantas xerofitas y herbáceas de praderas secas junto con árboles indicadores de áreas húmedas, próximos a corrientes fluviales y vegetación higrofitica.

En los sondeos efectuados en la zona B se ob-

tiene un espectro, muy representativo y abundante, de plantas acuáticas relacionadas con el régimen fluvial, vegetación higrofitica que crece en zonas encharcadas, acequias y canales, junto con poblaciones de vegetación halófila costera, propia de lugares salinos permanentemente húmedos, que sufren encharcamientos frecuentes por la acción hidrodinámica del mar y forman microcomunidades de saladares o áreas salinas que no están sometidas a inundaciones frecuentes, sino todo lo contrario.

De lo anterior se deduce que el clima sería cálido y seco, típico de la región mediterránea, con períodos de abundantes lluvias estacionales y precipitaciones ocultas, condensación por niebla, principalmente, y elevada humedad ambiental.

SITUACION Y EMPLAZAMIENTO DE LOS SONDEOS

La toma de muestras se ha efectuado en Almizaraque, Villaricos (Cuevas de Almanzora), en la provincia de Almería, en los márgenes de la desembocadura del río Almanzora.

La altitud de la zona es de escasos metros sobre el nivel del mar.

Las coordenadas del emplazamiento de los sondeos son:

Lat. 37° 14' 41" N
Long. 01° 47' 11" O

Los sondeos se han realizado en dos enclaves próximos entre sí.

En la zona A se han extraído cinco muestras numeradas del 30 al 34, ambas inclusive. Tabla I y gráficos 1 y 2.

En la zona B se han sacado dos muestras, números 35 y 36. Gráficos 3 y 4.

Los depósitos cuaternarios de esta zona están constituidos por gravas, arenas y limos, IGME, 1.015, Garrucha; los limos muestreados son de diferentes tonalidades.

ANALISIS POLINICO

Se ha seguido el método de separación por den-

sidades para muestras arqueológicas, análisis polínico de IMOGENE DOHER, I. (1980) y de SUE FISH (1985), tratamiento químico para la extracción de palinormos.

Las muestras fueron teñidas con safranina-glicerina.

Se ha utilizado un microscopio óptico $\times 500$ y $\times 1.000$ con aceite immersioneel, se ha estudiado las láminas delgadas con pólenes móviles y sellados correspondientes de cada nivel. Se ha realizado la identificación y recuento de los granos de polen de las especies arbóreas y no arbóreas pertenecientes a los diferentes niveles muestreados.

Los pólenes fueron clasificados, principalmente, por las claves de MOORE y WEBB (1978), REX SAWYER (1981), con asistencia adicional de las fotos de ERDTMAN (1961-1963), FAEGRI e IVERSEN (1975), Atlas Polínico de Andalucía Occidental (1987), y propia Palinoteca, las reconstrucciones paleoclimáticas según MARISCAL, B. (1986) y FONT, I. (1988).

Los porcentajes de las familias botánicas, concentradas en los sedimentos de los diferentes niveles, están incluidos en la tabla I y gráficos 1, 2, 3 y 4.

ANALISIS POLINICO CORTE ZONA A

En Villaricos las muestras correspondientes al corte zona A son un ejemplo de la variabilidad del medio en cuanto al contenido polínico, ya que el espectro correspondiente está formado por diferentes comunidades vegetales (tabla I, gráficos 1 y 2).

El contenido de pólenes arbóreas, Salicáceas, Coníferas y Cupresáceas, en la base del perfil es de 2,65 por 100, y va aumentando hasta un 27,42 por 100 en el nivel 32. Las Gramíneas, características de praderas secas, se encuentran representadas en el palinograma por unos porcentajes del 4,42 por 100 al 12,90 por 100. Las comunidades vegetales de praderas húmedas, Liliáceas y Ninfáceas aparecen en la parte superior del palinograma, en el nivel 33, de forma puntual, con un porcentaje del 15,58 por 100. Las plantas xerofitas o de pastizales xéricos pre-

TABLA 1

Análisis polínico de los sedimentos del yacimiento de Almizaraque. Villaricos (Almería)

TAXONES	Muestras Zona A (núm. de pólenes)				
	30	31	32	33	34
Asclepiaceae	53	55	11	42	Estéril
Caryophyllaceae	16	11	0	0	Estéril
Conifereae	0	6	0	3	Estéril
Cupresaceae	0	0	17	0	Estéril
Gramineae	5	13	8	6	Estéril
Liliaceae	0	0	0	5	Estéril
Moraceae	0	0	5	2	Estéril
Nymphaeae	0	0	0	7	Estéril
Papilionaceae	0	7	0	0	Estéril
Plantaginaceae	7	6	0	0	Estéril
Salicaceae	3	0	0	0	Estéril
Urticaceae	22	0	16	3	Estéril
Varia	7	18	5	9	Estéril
TOTAL POLENES	113	116	62	77	Estéril
TOTAL P. ARBOREOS	3	6	17	3	

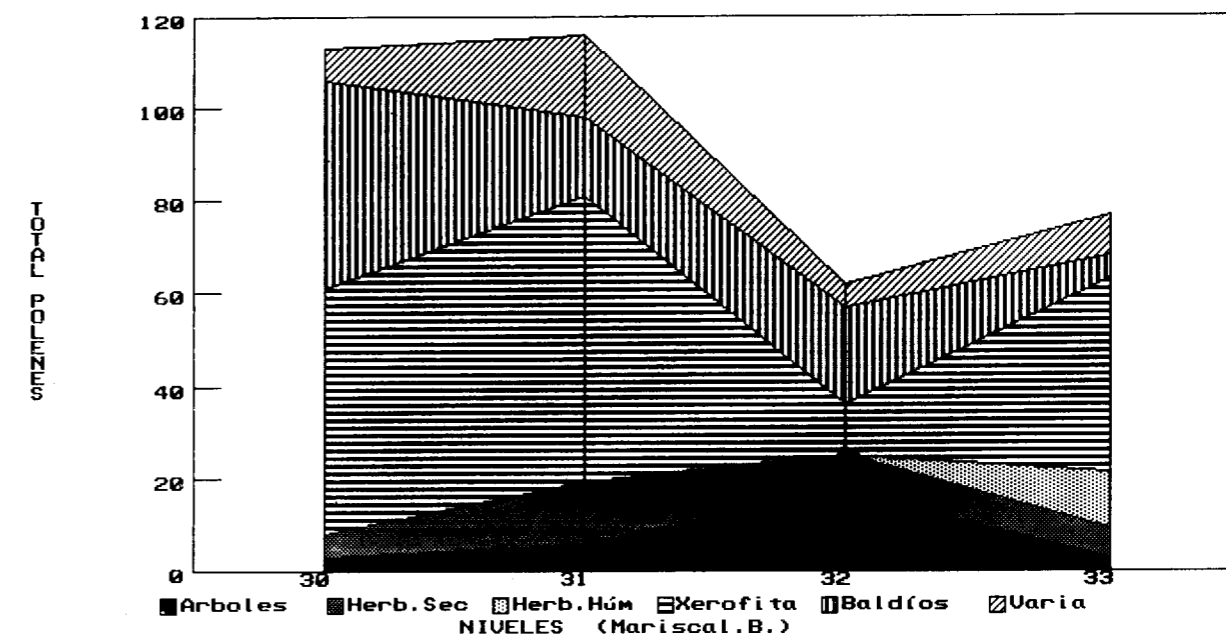
TAXONES	Muestras Zona A (porcentajes)				
	30	31	32	33	34
Asclepiaceae	46,90	47,41	17,74	54,55	Estéril
Caryophyllaceae	14,16	9,48	0,00	0,00	Estéril
Conifereae	0,00	5,17	0,00	3,90	Estéril
Cupresaceae	0,00	0,00	27,42	0,00	Estéril
Gramineae	4,42	11,21	12,90	7,79	Estéril
Liliaceae	0,00	0,00	0,00	6,49	Estéril
Moraceae	0,00	0,00	8,06	2,60	Estéril
Nymphaeae	0,00	0,00	0,00	9,09	Estéril
Papilionaceae	0,00	6,03	0,00	0,00	Estéril
Plantaginaceae	6,19	5,17	0,00	0,00	Estéril
Salicaceae	2,65	0,00	0,00	0,00	Estéril
Urticaceae	19,47	0,00	25,81	3,90	Estéril
Varia	6,19	15,52	8,06	11,69	Estéril
TOTAL (%)	100	100	100	100	Estéril
TOTAL P. ARBOREOS (%)	2,65	5,17	27,42	3,90	

GRAFICO 1

Análisis polínico de los sedimentos del yacimiento de Almizaraque. Villaricos (Almería)

	Muestras Zona A (núm. de pólenes)				
	30	31	32	33	34
Arboles	3	6	17	3	Estéril
Herbáceas Secas	5	13	8	6	Estéril
Herbáceas Húmedas	0	0	0	12	Estéril
Xerofitas	53	62	11	42	Estéril
Baldíos	45	17	21	5	Estéril
Varia	7	18	5	9	Estéril
TOTAL	113	116	62	77	Estéril

VILLARICOS Zona A (Almería)



sentan elevados porcentajes en todos los niveles, excepto en el 32, con un 17,74 por 100; en los restantes niveles los porcentajes ascienden al 50 por 100 del contenido polínico, superando esta cantidad los niveles 31 y 33. Las plantas indicadoras de terrenos baldíos, Urticáceas y Plantagináceas oscilan entre un 25 por 100 en la base del corte y un 3,90 por 100 en el nivel 33. Varia presenta valores homogéneos en todo el perfil.

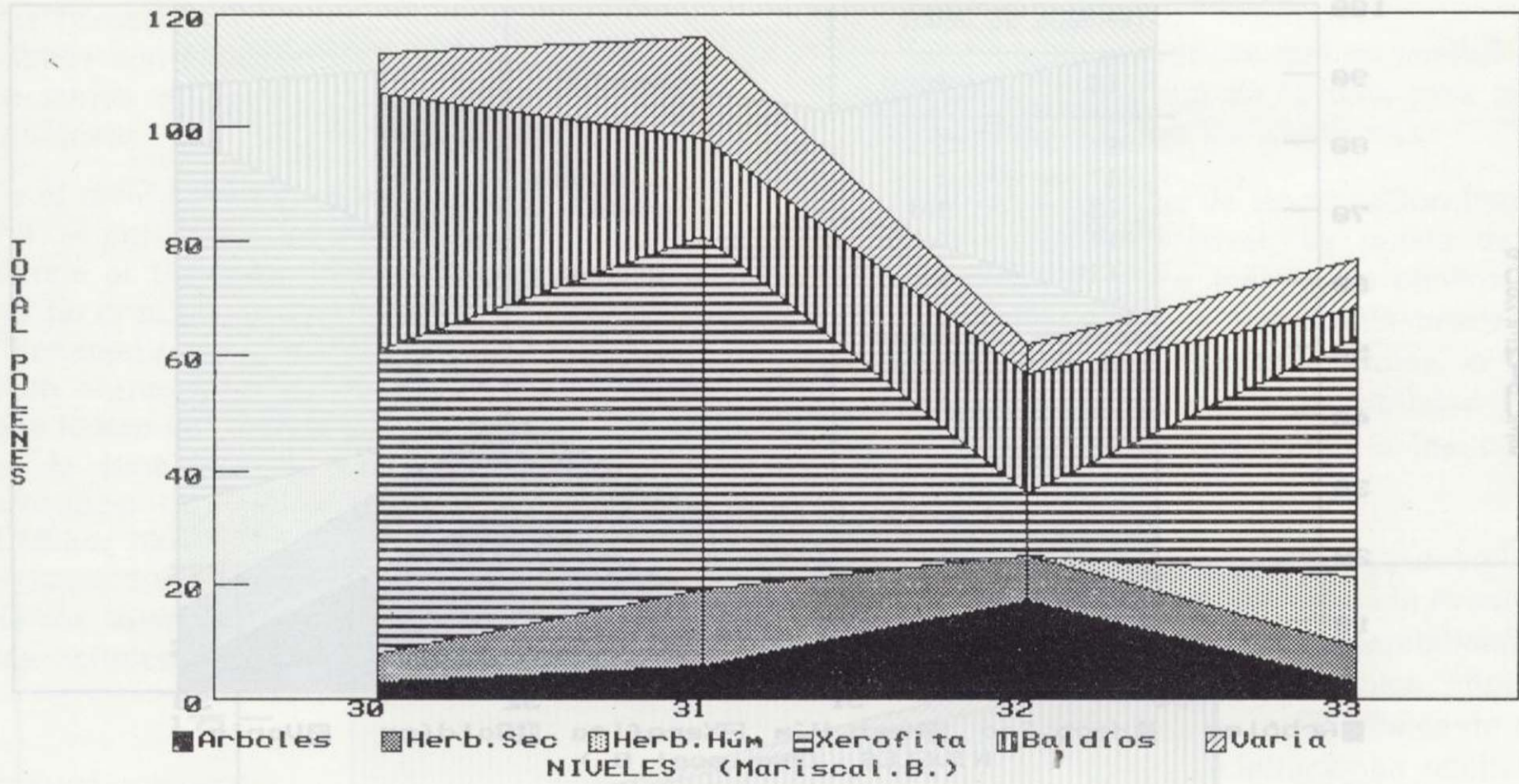
Según el contenido polínico, teniendo en cuenta los índices de representatividad del polen y las características geomorfológicas de un medio dinámico, se supone que existían bosques en lugares próximos, que podrían estar formados por agrupaciones arbóreas compuestas por diferentes clases de árboles, de los cuales sólo tenemos el registro de los pólenes de Coníferas y Cupresáceas. La presencia de Salicáceas indica la existencia de áreas o corredores de riber-

GRAFICO 1

Análisis polínico de los sedimentos del yacimiento de Almizaraque. Villaricos (Almería)

	Muestras Zona A (núm. de pólenes)				
	30	31	32	33	34
Arboles	3	6	17	3	Estéril
Herbáceas Secas	5	13	8	6	Estéril
Herbáceas Húmedas	0	0	0	12	Estéril
Xerofitas	53	62	11	42	Estéril
Baldíos	45	17	21	5	Estéril
Varia	7	18	5	9	Estéril
TOTAL	113	116	62	77	Estéril

VILLARICOS Zona A (Almería)



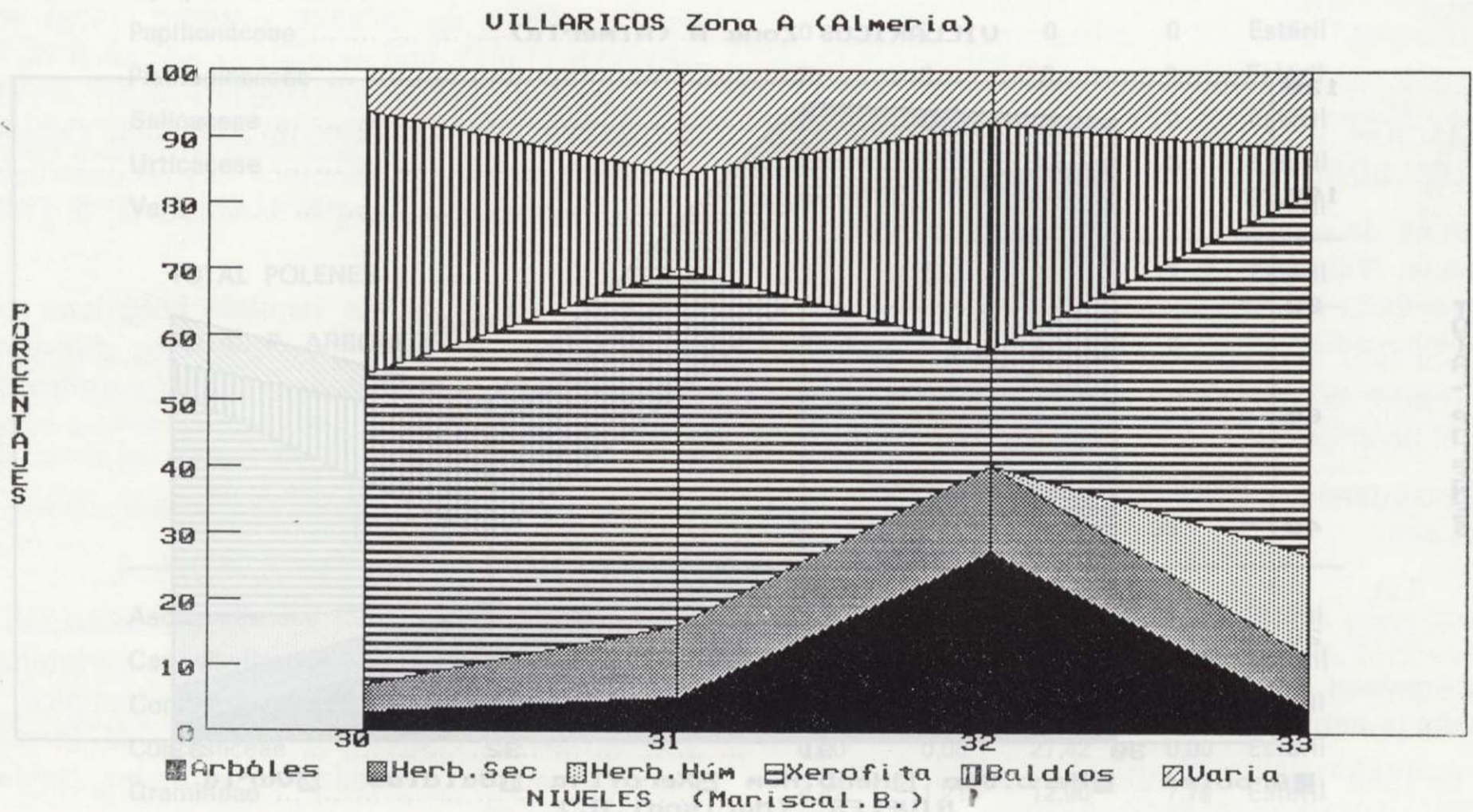
sentan elevados porcentajes en todos los niveles, excepto en el 32, con un 17,74 por 100; en los restantes niveles los porcentajes ascienden al 50 por 100 del contenido polínico, superando esta cantidad los niveles 31 y 33. Las plantas indicadoras de terrenos baldíos, Urticáceas y Plantagináceas oscilan entre un 25 por 100 en la base del corte y un 3,90 por 100 en el nivel 33. Varia presenta valores homogéneos en todo el perfil.

Según el contenido polínico, teniendo en cuenta los índices de representatividad del polen y las características geomorfológicas de un medio dinámico, se supone que existían bosques en lugares próximos, que podrían estar formados por agrupaciones arbóreas compuestas por diferentes clases de árboles, de los cuales sólo tenemos el registro de los pólenes de Coníferas y Cupresáceas. La presencia de Salicáceas indica la existencia de áreas o corredores de ribe-

GRAFICO 2

Análisis polínico de los sedimentos del yacimiento de Almizaraque. Villaricos (Almería)

	Muestras Zona A (porcentajes)				
	30	31	32	33	34
Arboles	2,65	5,17	27,42	3,90	Estéril
Herbáceas Secas	4,42	11,21	12,90	7,79	Estéril
Herbáceas Húmedas	0,00	0,00	0,00	15,58	Estéril
Xerofitas	46,90	53,45	17,74	54,55	Estéril
Baldíos	39,82	14,66	33,87	6,49	Estéril
Varia	6,19	15,52	8,06	11,69	Estéril
TOTAL (%)	100	100	100	100	Estéril



ras por donde transcurren ríos, canales o acequias, así como Liliáceas y Ninfáceas, indican zonas en las que se producen desbordamientos de agua periódicamente. Pero en la zona predominan las comunidades vegetales indicadoras de sequedad e incluso aridez ambiental, praderas de Gramíneas, plantas xerofitas como Asclepiáceas y formaciones correspondientes a terrenos baldíos como Urticáceas y Plantagináceas. El clima era, por tanto, caluroso y seco, pero sometido a lluvias de carácter torrencial, con rias

das e inundaciones, resultando zonas encharcadas que modificaban las condiciones generales de semiaridez, introduciendo una ligera fluctuación climática, lo cual favorecía que esta zona tuviera más lluvias y, por su proximidad al mar, una humedad ambiental apreciable.

ANALISIS POLINICO CORTE ZONA B

Las muestras estudiadas presentan cientos de

GRAFICO 3

Análisis polínico de los sedimentos del yacimiento de Almirazaque. Villaricos (Almería)

TAXONES	Muestras Zona B (núm. de pólenes)	
	35	36
Asclepediaceae	0	14
Conifereae	0	12
Chenopodiaceae	0	123
Gramineae	5	11
Liliaceae	6	8
Nymphaceae	135	27
Varia	3	9
TOTAL POLENES (%)	149	204

TAXONES	Muestras Zona B (núm. de pólenes)	
	35	36
Arboles	0	12
Herbáceas Secas	5	11
Herbáceas Húmedas	141	35
Xerofitas	0	14
Herbáceas Marisma	0	123
Varia	3	9
TOTAL POLENES (%)	149	204

VILLARICOS Zona B (Almería)

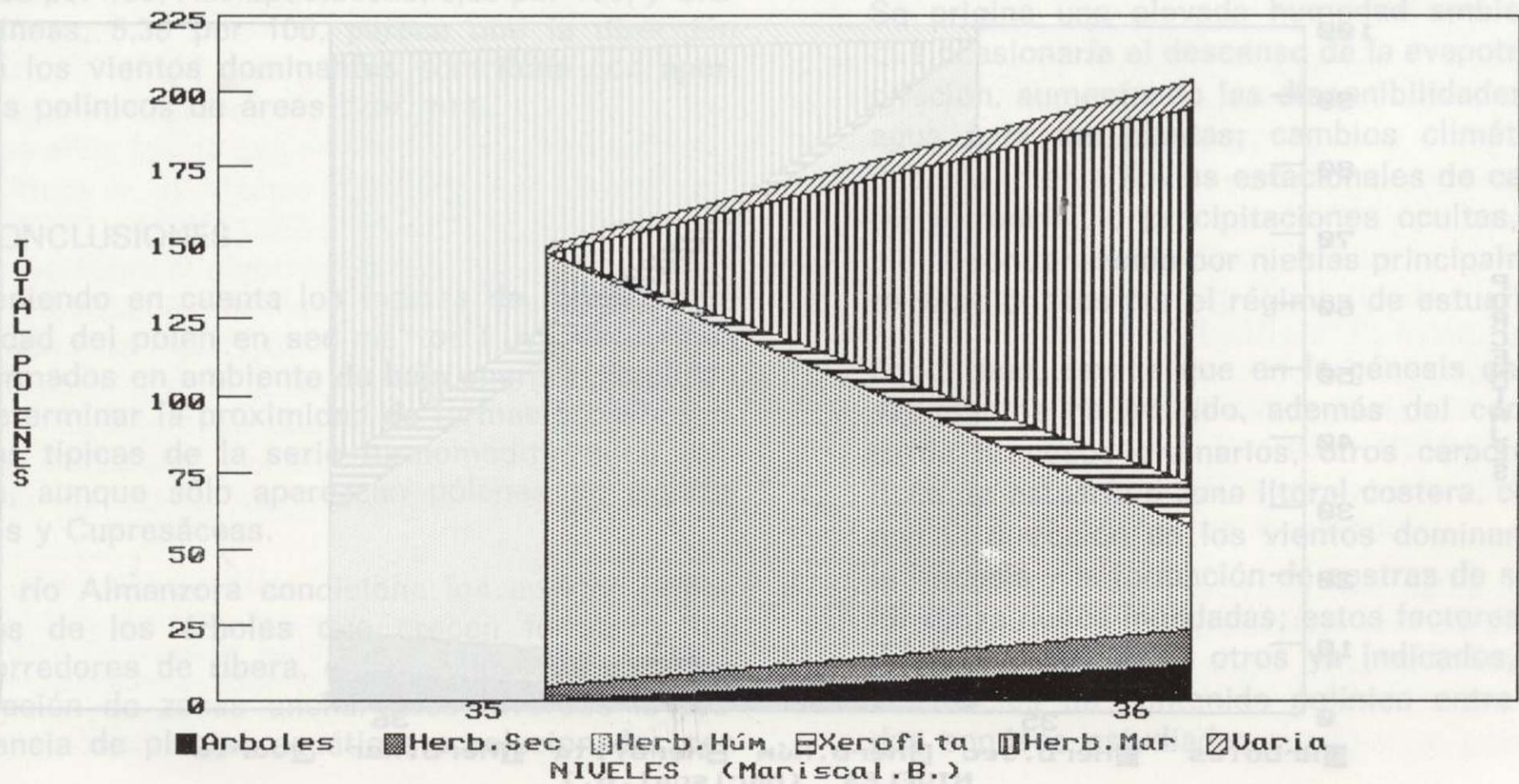


GRAFICO 4

Análisis polínico de los sedimentos del yacimiento de Almirazaque. Villaricos (Almería)

TAXONES	Muestras Zona B (porcentajes)	
	35	36
Asclepiaceae	0,00	6,86
Conifereae	0,00	5,88
Chenopodiaceae	0,00	60,29
Gramineae	3,36	5,39
Liliaceae	4,03	3,92
Nymphaeaceae	90,60	13,24
Varia	2,01	4,41
TOTAL POLENES (%)	100	100

TAXONES	Muestras Zona B (porcentajes)	
	35	36
Arboles	0,00	5,88
Herbáceas Secas	3,36	5,39
Herbáceas Húmedas	94,63	17,16
Xerofitas	0,00	6,86
Herbáceas Marisma	0,00	60,29
Varia	2,01	4,41
TOTAL POLENES (%)	100	100

VILLARICOS Zona B (Almería)

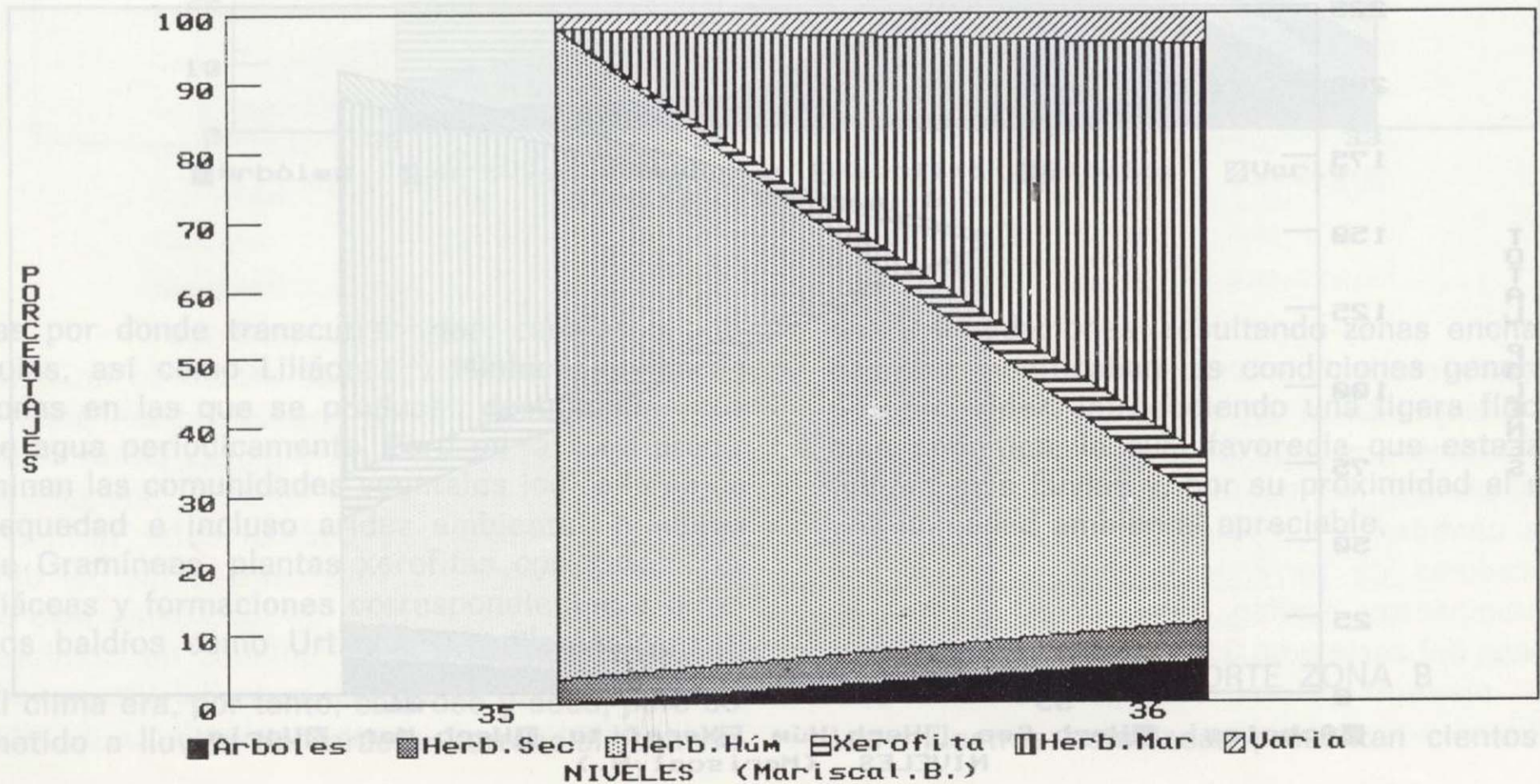


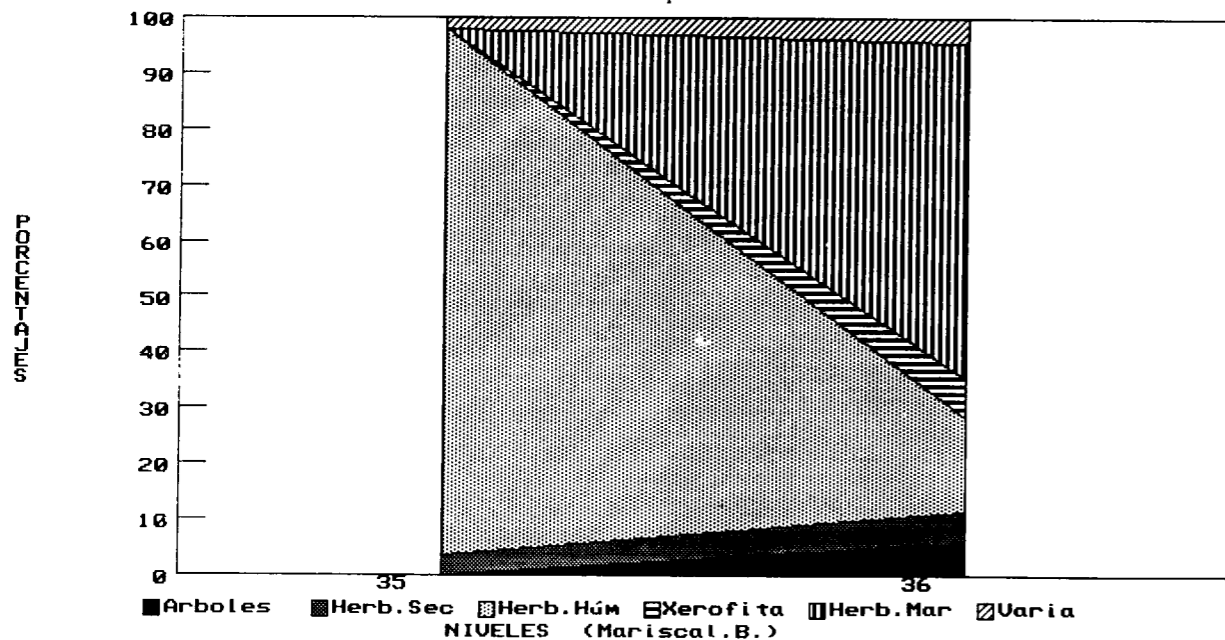
GRAFICO 4

Análisis polínico de los sedimentos del yacimiento de Almirazaque. Villaricos (Almería)

TAXONES	Muestras Zona B (porcentajes)	
	35	36
Asclepediaceae	0,00	6,86
Coniferaeae	0,00	5,88
Chenopodiaceae	0,00	60,29
Gramineae	3,36	5,39
Liliaceae	4,03	3,92
Nymphaceae	90,60	13,24
Varia	2,01	4,41
TOTAL POLENES (%)	100	100

TAXONES	Muestras Zona B (porcentajes)	
	35	36
Arboles	0,00	5,88
Herbáceas Secas	3,36	5,39
Herbáceas Húmedas	94,63	17,16
Xerofitas	0,00	6,86
Herbáceas Marisma	0,00	60,29
Varia	2,01	4,41
TOTAL POLENES (%)	100	100

VILLARICOS Zona B (Almería)



granos de polen de especies semiacuáticas o higrofitas, pero el número de familias botánicas es muy reducido, lo que indica que los sedimentos analizados corresponden a un proceso rápido y puntual en su formación. También influye el que en zonas lacustres el contenido polínico tiene mayor dependencia de los índices de dispersión del polen (JACKSON, S. T., 1990).

La formación de estos sedimentos fue originada por los aportes de tipo fluvial, que tuvieron lugar en momentos en los que el cauce del río Almanzora debía aumentar considerablemente.

En el nivel de base, muestra núm. 35, gráficos 3 y 4, el porcentaje de plantas relacionadas con el régimen hídrico es del 94,63 por 100, que corresponde a comunidades que crecen próximas a aguas tranquilas o de corriente lenta, en prados húmedos, acequias y canales, plantas cuyo hábitat son zonas encharcadas como las pertenecientes a las familias botánicas Liliáceas y Ninfáceas.

En el nivel superior, muestra núm. 36, gráficos 3 y 4, el porcentaje de plantas semiacuáticas desciende al 17,16 por 100, apareciendo en este nivel un gran número de pólenes de *Atriplex*, s. p., Chenopodiácea que crece en marismas saladas, y en arenas y gravillas próximas a la costa, lo que indica una mayor influencia mareal o eólica en la formación de estos sedimentos. Por la presencia de Coníferas con un porcentaje del 5,88 por 100, Asclepediáceas, 6,86 por 100, y Gramíneas, 5,39 por 100, parece que la dirección de los vientos dominantes contribuía con aportes polínicos de áreas próximas.

CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta los índices de representatividad del polen en sedimentos fluvio-estuarinos formados en ambiente de baja energía, se puede determinar la proximidad de formaciones boscosas típicas de la serie termomediterránea cálida, aunque sólo aparezcan pólenes de Coníferas y Cupresáceas.

El río Almanzora condiciona los aportes polínicos de los árboles que crecen formando los corredores de ribera, como Salicáceas, y la formación de zonas encharcadas favorece la presencia de plantas acuáticas o relacionadas con

corrientes lentas, acequias, etc., como Ninfáceas y Liliáceas.

No obstante, la característica general de la zona es de semi-aridez, por la presencia de plantas xerofitas y/o halofitas, como Papilionáceas y Asclepediáceas, y de ausencia antrópica por la presencia de los pólenes de las plantas características de zonas baldías, como Urticáceas, Moráceas, Cariofiláceas y Plantagináceas.

La incidencia de un ambiente litoral costero influye en el contenido polínico por la presencia considerable de *Atriplex*, s. p., Chenopodiácea que crece en marismas saladas, en arenas y gravillas próximas a la costa preferentemente, aunque también pueden presentarse otras especies en ambientes secos y esteparios.

Las condiciones climáticas que se pueden deducir del estudio polínico de la zona para el Subboreal (Holoceno) son los siguientes:

- Dentro de un clima de tipo mediterráneo, con acusada sequía estival, se puede detectar un aumento de los índices de pluviosidad o una fluctuación que indica una ligera variación de las condiciones generales, si se tiene en cuenta la notable sensibilidad de una gran parte de la vegetación a los cambios climáticos.
- Se origina una elevada humedad ambiental que ocasionaría el descenso de la evapotranspiración, aumentando las disponibilidades de agua para las plantas; cambios climáticos debidos, bien a lluvias estacionales de carácter torrencial, o precipitaciones ocultas, como la condensación por nieblas principalmente, ocasionadas por el régimen de estuario.
- Por último, parece que en la génesis de los sedimentos ha influido, además del conjunto de procesos ordinarios, otros característicos de estuario o zona litoral costera, como son la dirección de los vientos dominantes, la maresía y la formación de costras de sales en zonas nunca inundadas; estos factores podrían motivar, entre otros ya indicados, las diferencias de contenido polínico entre los dos sondeos estudiados.

REFERENCIAS

- ERDTMAN, G. (1971): *Pollen Morphology and Plant Taxonomy*. Hafner Publishing Co., New York, 450 pp.
- DELIBES, G.; FERNANDEZ MIRANDA, M.; FERNANDEZ POSSE, M. D., y MARTIN MORALES, C. (1986): *El poblado de Almizaraque*. Homenaje a Luis Siret (1934-1984). Consejería de Cultura de la Junta de Andalucía, 167-171.
- FAEGRI, K., and IVERSEN, J. (1975): *Text book of pollen Analysis*. Munksgaard. Copenhagen.
- FONT TULLOT, I. (1988): *Cambios climáticos y sus causas*. Instituto Nacional de Meteorología. Ministerio de Transportes, Turismo y Comunicaciones. Madrid, 297 pp.
- JACKSON, S. T. (1990): *Pollen source area and representation in small lakes of the Northeastern United States*. Review of Paleobotany and Palynology, vol. 63:53-76.
- HUNTLEY, B. (1990): *Studying global change: the contribution of Quaternary palynology, Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology (Global and planetary change)*, 82, pp. 53-61. Elsevier Science Publishers B. V. Amsterdam.

IGME 1.015: *Mapa Geológico de España, escala 1:50.000. Garrucha*.

IMOGENE DOER, L. (1980): *Palynomorph Preparation Procedures*. U. S. Geological Survey.

MARISCAL, B. (1986): *Reconstrucción de la Paleoflora y de la Paleoclimatología durante el Holoceno. Quaternary Climate in Western Mediterranean*. Symposium on Climate Fluctuations during the Quaternary. Madrid, 205-220.

MOORE, P. D. & WELB, J. A. (1978): *An Illustrated Guide to Pollen Analysis*. Hodder & Stongerton. London, 133 pp.

SUE FISH (1985): *Density separation for archeological samples*. Geological Survey Circular 830.

REX SAWYER (1981): *Pollen identification*. University College, Cardiff Press, 110 pp.

VADES, B.; DIEZ, M. J., y FERNANDEZ, I. (1987): *Atlas Polínico de Andalucía Occidental*. Instituto de Desarrollo Regional núm. 43. Universidad de Sevilla. Diputación de Cádiz, 450 pp.

Original recibido: Agosto de 1991.

Original aceptado: Septiembre de 1991.

ESTUDIO DE MINERALES Y ROCAS

El metamorfismo de bajo grado en el Paleozoico del sector central de la Cordillera Ibérica.

Por A. APARICIO (1), J. M. BRELL (2), R. GARCIA (1), J. TENA (3) y J. GOMEZ (3)

RESUMEN

Se describe el metamorfismo de bajo grado en sus aspectos paragenéticos, intensidad y condiciones de las rocas paleozoicas del sector central de la Cordillera Ibérica.

Palabras clave: Metamorfismo, Bajo grado, Hercínico, Cordillera Ibérica.

ABSTRACT

The low and very low grade metamorphism in paleozoic rocks (Sistema Ibérico) are described. The paragenesis and conditions of this metamorphism are determined.

Key words: Metamorphism, Low grade, Hercynic, Cordillera Ibérica.

INTRODUCCION

La Cordillera Ibérica es una alineación montañosa en la que predominan los materiales mesozoicos y terciarios. Sin embargo, en su parte central (provincia de Teruel y zona norte de la provincia de Guadalajara) y en su parte nororiental (provincias de Teruel y Zaragoza) afloran en una dirección NO-SE una serie de retazos paleozoicos que constituyen su núcleo (fig. 1). De entre todos ellos los de mayor extensión son el Macizo de Ateca y el Macizo de Calatayud-Montalbán (CAPOTE y GONZALEZ-LODEIRO, 1983), que son precisamente el objetivo de nuestro estudio. Ambos macizos están separados por la Depresión Terciaria de Calatayud-Teruel, que sirve de divisoria para la tradicional subdivisión longitudinal de la cordillera en dos sectores: el oriental, o rama aragonesa, y el occidental, o rama castellana. El macizo de Ateca queda al suroeste de la

cuenca terciaria y forma parte, por tanto, de la rama castellana; el Macizo de Calatayud-Montalbán queda al noroeste y es parte integrante de la rama aragonesa.

Desde el punto de vista estratigráfico, en el Macizo de Ateca predominan los materiales del Paleozoico Inferior, desde el Cámbrico Basal, representado por la Formación Cuarcita de Bámbola, hasta el Ordovícico (parte inferior de la Formación Cuarcita Armórica). Falta el resto de la serie paleozoica. El Macizo de Calatayud-Montalbán, por el contrario, se caracteriza por poseer una serie estratigráfica paleozoica muy completa, sin apenas lagunas estratigráficas desde el Precámbrico (?) hasta el Carbonífero. El Paleozoico postorogénico (Pérmico) ha sido identificado en ambos macizos, aunque en afloramientos muy reducidos y con potencias limitadas (REZNOS y SAUQUILLO DEL ALCAZAR en la rama castellana y FOMBUENA en la rama aragonesa).

La estratigrafía de los materiales de estos macizos paleozoicos ha sido descrita por numerosos autores, ya desde el siglo pasado. Las primeras síntesis realmente importantes se deben a LOTZE (1929) y MELENDEZ (1944). Con poste-

(1) Dpto. Geología Museo Nacional Ciencias Naturales CSIC. José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid.

(2) Dpto. Estratigrafía. Instituto Geología Económica CSIC. Univ. Complutense. 28040 Madrid.

(3) Area Petrología y Geoquímica. Dpto. Geología. Univ. Zaragoza. 5009 Zaragoza.

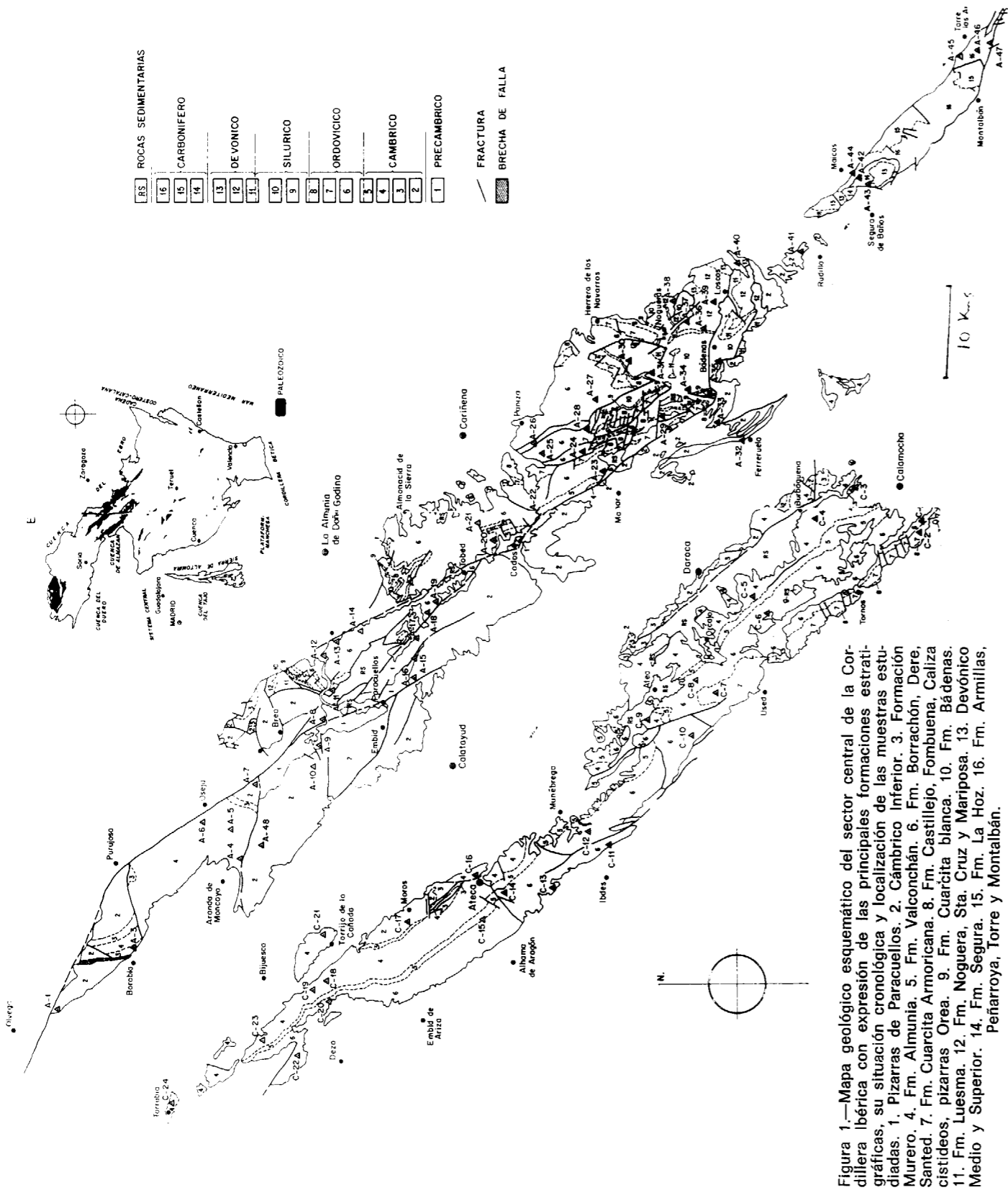


Figura 1.—Mapa geológico esquemático del sector central de la Cordillera Ibérica con expresión de las principales formaciones estratigráficas, su situación cronológica y localización de las muestras estudiadas. 1. Pizarras de Paracuellos. 2. Cámbrico Inferior. 3. Formación Murero. 4. Fm. Almunia. 5. Fm. Valconchán. 6. Fm. Borrachón, Dere, Santed. 7. Fm. Cuarcita Armoricana. 8. Fm. Castillejo, Fombuena, Caliza cistídeos, pizarras Orea. 9. Fm. Cuarcita blanca. 10. Fm. Bádernas. 11. Fm. Luesma. 12. Fm. Noguera, Sta. Cruz y Mariposa. 13. Devónico Medio y Superior. 14. Fm. Segura. 15. Fm. La Hoz. 16. Fm. Armillas, Peñarroya, Torre y Montalbán.

rioridad se realizan numerosos estudios parciales entre los que destacan, en el área involucrada en este trabajo, los de BARTSCH (1966) en la Sierra de la Virgen, ALIAGA (1968) en las Sierras de Vicort y Algairén, CARLS (1965) en la Sierra de Herrera y la Depresión Axial del Cámaras, QUARCH (1975) en el Anticlinal de Montalbán, SCHMITZ (1971) al norte de Ateca, JOSOPAIT (1971) entre Ateca y Daroca, y SCHEUPLEIN (1970) entre Daroca y Calamocha. La nomenclatura estratigráfica actualmente en uso en este área es obra de numerosos autores, aunque las contribuciones principales se deben a LIÑAN y TEJERO (1988) para el Precámbrico (?) del Grupo Paracuellos, LOTZE (1929, 1958, 1961) para el Cámbrico Inferior y Medio, WOLF (1980) para el Cámbrico Superior - Ordovícico Inferior, VILLAS (1983) para el Ordovícico Superior - Silúrico, CARLS y GANDL (1967) para el Silúrico - Devónico Inferior, CARLS y LAGES (1983) para el Devónico Medio y Superior, y QUARCH (1975) para el Carbonífero.

La estructura y deformación de este paleozoico ha sido descrita recientemente por VILCHEZ (1984), TEJERO (1987) y TORRES (1989). A una escala mayor, para el conjunto de la Cordillera Ibérica, destacan las síntesis tectónicas clásicas de LOTZE (1929), JULIVERT (1954) y JULIVERT et al. (1974), y en los últimos años, la de CAPOTE y GONZALEZ-LODEIRO (1983). La relación estructural del Paleozoico de la Cordillera Ibérica y el del Macizo Hercínico ha sido tratada por LOTZE (1954), JULIVERT et al. (1974) y GOZALO y LIÑAN (1988).

En cuanto al estudio del metamorfismo regional de los materiales paleozoicos, son muy escasos los trabajos con los que se cuenta en la zona. Destaca el de FERNANDEZ-NIETO et al. (1985) en el Cámbrico Medio - Tremadoc de los alrededores de Calamocha (Macizo de Ateca). A un nivel más puntual, MARTIN GUILLEN et al. (1987) identifican un interestratificado tipo corrensita en el Precámbrico del Grupo Paracuellos (Macizo de Calatayud-Montalbán).

No existen estudios petrológicos que sinteticen las características de las rocas sedimentarias del paleozoico de toda la Cordillera, y sólo se han analizado puntualmente zonas restringidas en el Cámbrico y el Silúrico de las Sierras de Vicort y Algairén (NAVAS, 1986; NAVAS y TENA, 1987; MATEO, 1987) y en el Devónico de la Depresión

del Cámaras (BESCOS, 1988; BESCOS et al., 1989).

Sin embargo, las características de los procesos metamórficos que afectan a este Paleozoico no han sido estudiados hasta ahora en su aspecto global, a pesar de la importancia que tienen en la evolución de este sector del Macizo Hespérico. En este sentido, la baja intensidad del metamorfismo que afecta al Paleozoico, junto con la monotonía litológica que le caracteriza, pueden explicar la ausencia de este tipo de datos.

No obstante, en áreas relativamente próximas, como la Sierra de la Demanda, e incluso en otras zonas del sector central de la rama castellana algo más meridionales que las consideradas en este trabajo, ya se han publicado algunos datos previos sobre la intensidad del metamorfismo. APARICIO et al. (1988) analizan en términos metamórficos diferentes afloramientos paleozoicos de las provincias de Teruel y Guadalajara en una sucesión estratigráfica que abarca el Ordovícico-Silúrico. Igualmente APARICIO et al. (1991) describen el metamorfismo de los materiales paleozoicos (esencialmente cámbricos) de la Sierra de la Demanda.

METODOS

En el sector central de la Cordillera Ibérica el estudio del metamorfismo se realizó a partir de la selección de un número significativo de muestras, tanto en cuanto a los niveles estratigráficos representados, como a la extensión superficial que definen, tratándose de determinar las características del metamorfismo en los diferentes niveles y su variación espacial. El principal inconveniente para ello surge de las propias características litológicas de las rocas constituyentes, en donde las composiciones cuarcíticas predominan sobre las pelíticas. Las muestras seleccionadas corresponden siempre a metapelitas con un alto porcentaje de filosilicatos (superior al 60 por 100) y se han eliminado aquellas con contenidos en cuarzo y carbonatos relativamente elevados. Esta situación ha obligado a que algunos niveles estratigráficos estén poco o nada representados.

El estudio de las paragénesis se hizo en base a microscopía óptica y difractogramas obtenidos

en un espectrómetro PHILIPS PW 1130 con una unidad de control PW 1710 según la metodología y elaboración descrita en APARICIO et al. (1988).

Un esquema de la situación de las muestras obtenidas, así como de la distribución y localización de los diferentes niveles estratigráficos, se puede observar en la figura 1. Para ello se han tenido en cuenta, además de la bibliografía existente, toda la información cartográfica hasta ahora publicada por el ITGE (Hojas geológicas 1/50.000 números 351 - Olvega, 352 - Tabuena, 381 - Illueca, 409 - Calatayud, 410 - La Almunia, 437 - Ateca, 438 - Paniza, 464 - Used, 465 - Daroca, 491 - Calamocha, 492 - Segura de los Baños, 493 - Oliete, 518 - Montalbán, y Hojas geológicas 1/200.000 números 31 - Soria, 32 - Zaragoza y 40 - Daroca.

Para una mejor comprensión de la situación estratigráfica se ha preferido referenciar la estratigrafía en función de las formaciones más características del sector nominadas por los diferentes autores que las estudiaron, modificadas en parte en este trabajo. Estas modificaciones han consistido, fundamentalmente, en la unión ocasional de varias formaciones en una sola, debido a similitudes litológicas en unos casos y a su escasa potencia, que las hace irrepresentables, a pequeña escala.

MINERALOGIA

En la tabla 1 se describe la composición mineralógica de las muestras seleccionadas, la unidad estratigráfica a la que pertenecen, así como los parámetros metamórficos más significativos (Índices de Cristalinidad de la Iilita según KUBLER (1968) y WEAVER (1960)), etc., a partir de los diferentes difractogramas realizados.

Por tratarse en todos los casos de pelitas las observaciones al microscopio son de escasa utilidad en cuanto a la identificación mineralógica, aunque se han podido determinar minerales cuya presencia, en cantidades reducidas, no es detectable por Rayos X. En algún caso, como ocurre con los minerales opacos y turmalina, no tienen interés para el estudio del metamorfismo, pero en otros, como ocurre con la biotita, su presencia suele ser determinante en la evaluación del proceso metamórfico. Aunque muy escasa (a ve-

ces tan sólo en cristales pequeños y aislados), la biotita ha podido ser localizada en algunas muestras desde el Precámbrico (?) y Cámbrico hasta el Devónico; tan sólo el Carbonífero no la incluye.

Entre los feldespatos, muy abundantes en las samitas de toda la Ibérica, la plagioclasa es normalmente visible (ópticamente) en forma de pequeños cristales de composición albitica, mientras que el feldespato potásico, no se ha determinado su presencia ópticamente, quizá por su difícil distinción del cuarzo. Ambos minerales han sido considerados de neoformación, al presentarse incluidos en rocas donde se han superado ampliamente las condiciones físicas apropiadas para su desaparición como minerales detríticos.

La clorita se presenta como pequeños cristales o como porfiroblastos de tamaño reducido.

La existencia de carbonatos sólo se ha determinado en tres muestras (A-5, A-38 y A-40), pertenecientes al Devónico y Carbonífero, y siempre en muy pequeña cantidad.

INTENSIDAD DEL METAMORFISMO

Una primera evaluación de esta intensidad se ha obtenido a partir de la proyección de los índices de KUBLER según el diagrama de ESQUEVIN (1969) (fig. 2), con la delimitación de los campos de epizona, anquizona y diagénesis. En niveles epizonales las muestras corresponden en su mayor parte a rocas del Cámbrico, tanto en la rama occidental (castellana) de la Cordillera (donde son más extensos los afloramientos del Cámbrico), como en la oriental (aragonesa); algunas muestras del Ordovícico, fundamentalmente de la rama oriental, se sitúan también en la epizona.

El mayor número de muestras se localizan en la anquizona, donde aparecen mayoritariamente proyectadas las rocas ordovícicas y cámbricas. En el campo de la diagénesis se sitúan principalmente muestras del Silúrico - Devónico - Carbonífero, junto a muestras aisladas del Ordovícico del sector occidental. Dentro del campo diagénético resulta especialmente llamativo que las muestras del Carbonífero manifiestan, en conjunto, menor índice de KUBLER que las muestras del Silúrico y Devónico, siendo precisamente dos

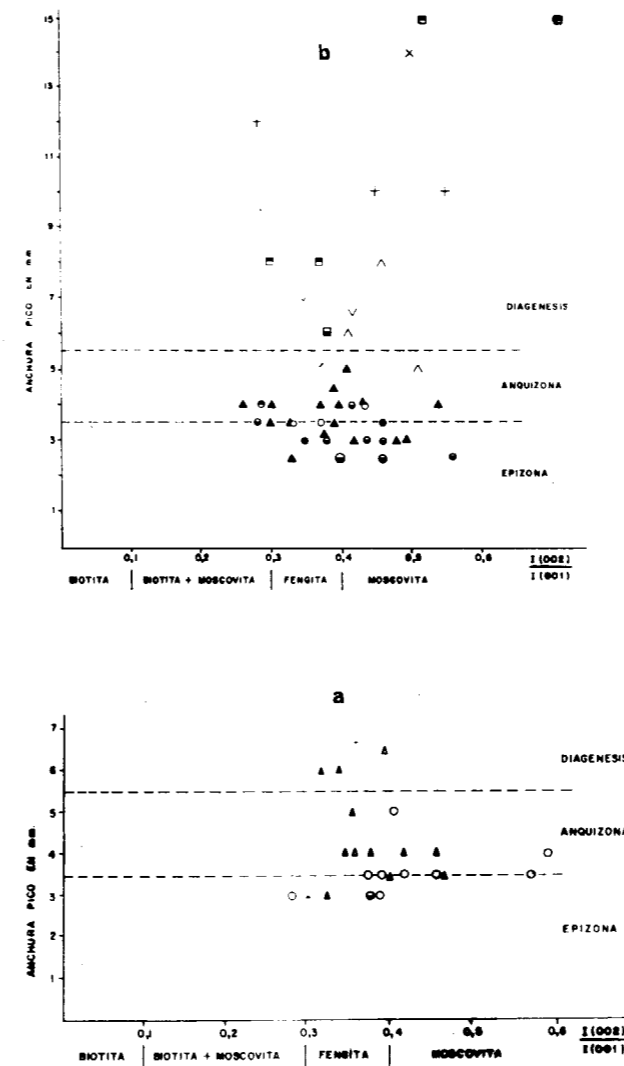


Figura 2.—Diagrama de ESQUEVIN con la proyección de las muestras estudiadas. a) Rama occidental (castellana). b) Rama oriental (aragonesa). Simbología: Cámbrico (Fm. 2, ● Fm. 3, ○ Fm. 4, ○); Ordovícico (Fm. 6, ▲ Fm. 7, △); Silúrico (Fm. 9, ■ Fm. 10, ■); Devónico (Fm. 12, + Fm. 13, ×); Carbonífero (Fm. 14, V Fm. 16, △).

muestras del Silúrico (A-34 y A-35) y una del Devónico (A-36) las que alcanzan los valores más altos de todo el conjunto.

Si nos referimos a los valores medios del índice de cristalinidad de la Iilita (KUBLER) para cada nivel estratigráfico (tabla 2), se observa un progresivo crecimiento de su valor desde el Cámbrico al Ordovícico, con un fuerte salto del Or-

dovícico al Silúrico y Devónico, para descender bruscamente en el Carbonífero, situándose en valores similares al Silúrico Inferior.

Entre el Precámbrico y el Cámbrico se aprecia también una pequeña inversión en sus valores, aunque se debe tener en cuenta la pequeña extensión del afloramiento precámbrico (Pizarras de Paracuellos) y el limitado número de muestras analizadas (A-9 y A-15).

El parámetro 060 varía de 1,498 a 1,507, encontrándose valores inferiores a 1,500 (que caracterizan la anquizona) en las muestras devónicas, aunque en el resto de las unidades no se ha podido apreciar el crecimiento característico de este valor con la intensidad del metamorfismo (PADAN et al., 1982). Tan sólo en una muestra (A-10) se alcanzan valores superiores a 1,510, que expresarían la entrada en la zona de la biotita (WEAVER, 1984). En este sentido, los valores medios más bajos del politipo 2 M₁ de la mica se sitúan en el Devónico, volviendo a crecer en el Carbonífero. Aunque WEAVER (1984) indica un aumento del parámetro 004/002 con la intensidad del metamorfismo, en las rocas aquí estudiadas no ha podido ser comprobado.

CONDICIONES

En la tabla 3 se han representado las asociaciones minerales más significativas de las diferentes unidades estratigráficas. Prácticamente en casi todas ellas se mantiene constante la presencia de Iilita, clorita, feldespatos, interestratificados, caolinita, esmectita y en algunos casos biotita. A partir del Silúrico Superior se sitúa la entrada de pirofilita, que persiste en el Devónico. En el Carbonífero desaparecen clorita, feldespatos, biotita e interestratificados.

Estas asociaciones indican que las condiciones metamórficas de las series inferiores (hasta el Silúrico Superior) debieron ser muy similares: el conjunto clorita+Iilita+caolinita y cuarzo+clorita+mica se sitúa en unas condiciones de 225-320° C y aproximadamente 2 Kb de presión (VELDE, 1964; MAXWELL y HOWER, 1967; RAO, 1977; NOACH et al., 1987). La propia asociación cuarzo+clorita+microclina ocurre para VELDE (1964) a una T ≈ 300° C.

La presencia esporádica de biotita nos situaría,

TABLA 2
Valores medios de los índices de Kubler

Cronoestratigrafía	Formación estratigráfica	Número muestras	Valores medios I. Kubler
Carbonífero	16	4	6.25 ± 1.08
Carbonífero	14	2	6.75 ± 0.28
Devónico	13	1	14 ± 0
Devónico	12	4	12.25 ± 2.86
Silúrico	10	4	11.5 ± 3.5
Silúrico	9	1	6 ±
Ordovícico	7	5	5.2 ± 1.2
Ordovícico	6	27	3.87 ± 0.83
Cámbrico	4	13	3.73 ± 0.60
Cámbrico	3	1	4 ± 0
Cámbrico	2	7	3 ± 0.47
Precámbrico	1	2	3.25 ± 0.5

TABLA 3
Paragénesis de las muestras estudiadas

Cronoestratigrafía	Formación estratigráfica	Paragénesis
Carbonífero	16	Qz+I±K
	14	Qz+I±K
Devónico	13	Qz+I+Cl+I/Cl+I/E+K
	12	Qz+I±Cl±Pl±I/Cl±E±Py±Bi
Silúrico	10	Qz+I+Cl±FK±Cl/V±E±Py±Bi
	9	Qz+I+Cl+Pl+Bi
Ordovícico	7	Qz+I±FK±K±E
	6	Qz+I±Cl±FK±Pl±Cl/V±I/Cl±K±E±Bi
Cámbrico	4	Qz+I±Cl±FK±Pl±I/Cl±I/S±K±E
	3	Qz+I+I/Cl+K
	2	Qz+I±Cl±FK±Pl±I/Cl±Cl/V+K±E±Bi
¿Precámbrico?	1	Qz+I±Cl+Pl±I/Cl±K±Bi

Qz: Cuarzo. I: Iilita. Cl: Clorita. FK: Feldespato potásico. Pl: Plagioclasa. Py: Pirofilita. Bi: Biotita.
K: Caolinita. E: Esmectita. M: Moscovita.
Interestratificados: /.

por otro lado, próximos a su límite inferior de estabilidad (325° C), ya que no se han llegado a superar las condiciones de estabilidad de la clorita (unos 350° C (MCDOWELL y ELDERS, 1980)). Esto coincide con el límite de estabilidad de la caolinita a 2 Kb (VELDE y KORNPROBOST, 1969; VEL-

DE, 1977). Tan sólo en una muestra se localizan interestratificados de I/E, lo que significa también temperaturas próximas a su límite superior de estabilidad, cercanas a los 300° C (HORTON, 1985; WEAVER, 1984).

La presencia de esmectita siempre sería compa-

tible con estas condiciones. REYES y CARDILE (1989) limitan la estabilidad de la esmectita a temperaturas comprendidas entre 40 y 320° C.

A estos factores hay que añadir la coexistencia, en algunos casos, de interestratificados Clorita/Vermiculita en materiales que abarcan desde el Cámbrico al Silúrico Inferior, lo que implica igualmente unas condiciones térmicas que no superan los 350° C (WEAVER, 1984). Nos encontramos, pues, que las condiciones del metamorfismo que afecta a la secuencia estratigráfica desde el Precámbrico al Silúrico Inferior deben situarse en temperaturas ≈ 320° C y presiones próximas a los 2 Kb. En este sentido, FERNANDEZ NIETO et al. (1985) establecen también que el metamorfismo del Paleozoico Inferior en el área de Santed es característico de baja presión, si bien indican unas temperaturas sensiblemente inferiores a las aquí determinadas.

Es a partir del Silúrico Superior cuando se produce la desaparición de la caolinita y la entrada de pirofilita, al mismo tiempo que se sigue manteniendo la existencia esporádica de biotita junto a clorita y feldespatos. Las condiciones de formación de la pirofilita a partir de caolinita están hoy en día bien establecidas (VELDE y KORNPROBOST, 1969; DUNOYER DE SEGONZAC, 1969; FREY, 1970; THOMPSON, 1970; VELDE, 1972, 1977; HAAS y HOLDAWAY, 1973; FREY et al., 1988; NORRIS, 1986; MARUMO, 1989..., etc. En general se admite una T de 300° C como el límite inferior para su crecimiento, con presiones de 1 a 2 Kb.

En esta paragénesis, el conjunto ilita+clorita y la aparición y coexistencia de biotita y pirofilita expresarían unas condiciones térmicas comprendidas entre los 300° y los 320° C.

La formación de pirofilita en la serie Silúrico Superior - Devónico y no en niveles estratigráficos más profundos donde igualmente existe caolinita debe estar producido por un descenso de la presión a valores próximos a 1 Kb, de acuerdo con las condiciones de transformación de caolinita a pirofilita apuntadas por VELDE y KORNPROBOST (1969) en 310° C y 1.050° C bars. Así, tendría una explicación adecuada el descenso en el valor del parámetro 060 a 1.498, que, de acuerdo con SASSI y SCOLARI (1974), indica un descenso de presión.

De esta forma se pueden asignar al tramo Silú-

rico Superior - Devónico unas condiciones de 310 ± 10 y P ≈ 1 Kb.

El Carbonífero, por el contrario, contiene una paragénesis muy restringida, con la coexistencia de cuarzo + ilita ± caolinita, lo que rebaja considerablemente las condiciones. De hecho la desaparición de la asociación ilita+clorita determina una T ≤ 200° C (NOACH et al., 1987), y la formación de ilita a partir de esmectita y la estabilidad del politipo 2 Ml de la mica requiere unas condiciones próximas a 200° C. En el Carbonífero tan sólo una muestra presenta indicios de esmectita, lo que corrobora unas condiciones muy cercanas a su límite superior de estabilidad. Las presiones debieron situarse en valores inferiores a 1 Kb.

DISCUSION

Durante el metamorfismo hercínico que afectó al área paleozoica de la Cordillera Ibérica, dos zonas de máxima intensidad metamórfica (epizonal) se sitúan en los extremos norte y sur de ambas ramas oriental y occidental, si bien en la rama occidental el máximo quedaría enterrado bajo los materiales terciarios que la bordean. Este conjunto de máximos quedaría situado sobre materiales de edad Cámbrica.

Otro máximo de menor intensidad se sitúa sobre las zonas centrales de la Cordillera Ibérica, en áreas ocupadas por el Ordovícico. La mínima intensidad metamórfica se localiza al sur de la rama oriental dentro del Silúrico, Devónico y Carbonífero. Esta situación queda reflejada en la distribución de las isolíneas que marcan los índices de cristalinidad (fig. 3), en donde se observa que las variaciones en la intensidad del metamorfismo se sitúan en la dirección NO-SE (el mismo sentido que marca el eje de la cordillera), con ciertas rupturas de las isolíneas en esta misma dirección, correspondiendo a los accidentes tectónicos que limitan los afloramientos paleozoicos.

La comparación de los resultados obtenidos con los correspondientes a los metamorfismos epizonales y anquizonales de otras áreas metamórficas próximas al eje central de la Cordillera Ibérica, como es la Sierra de la Demanda (APARICIO et al., 1991), nos lleva a considerar que al

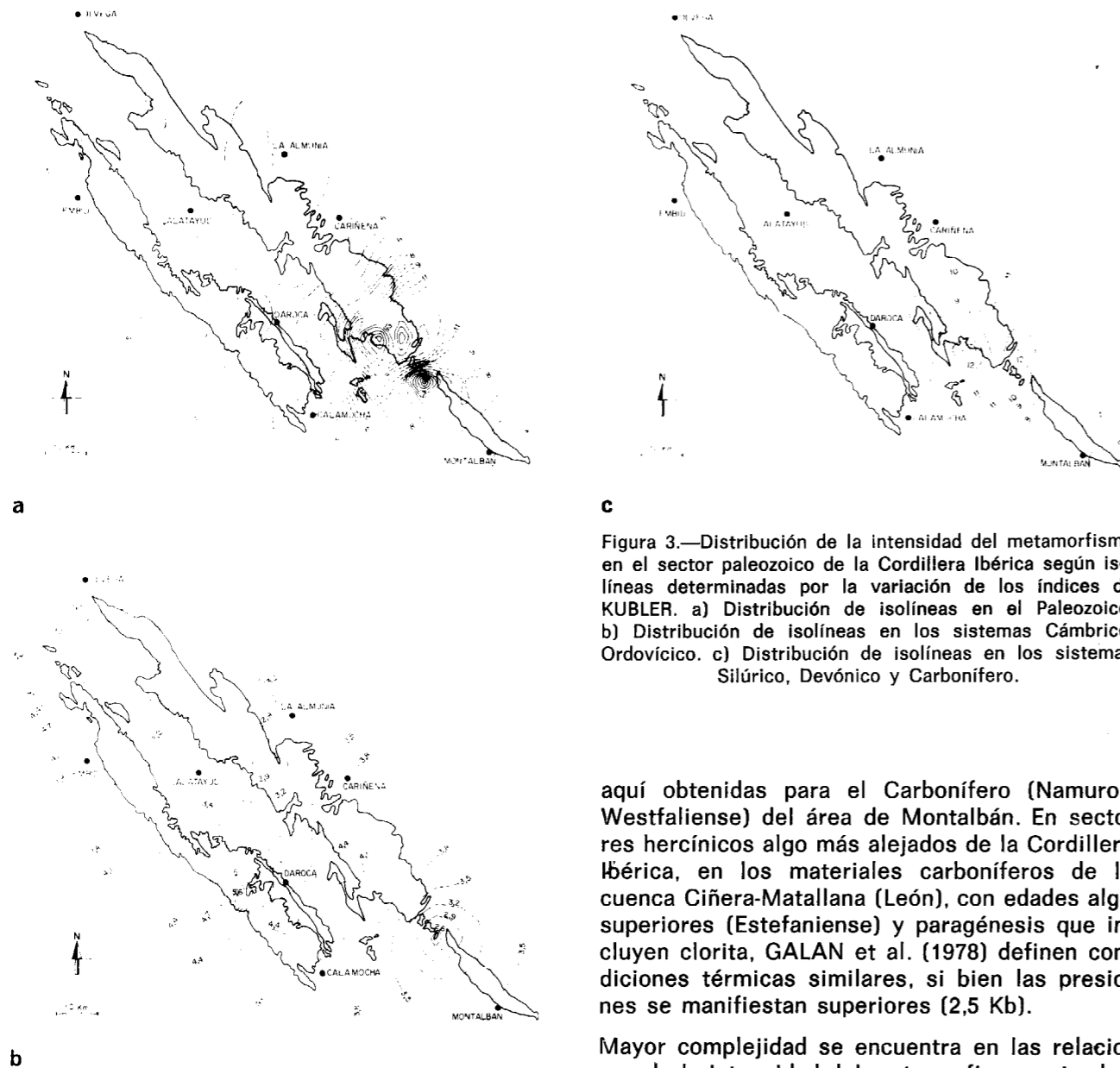


Figura 3.—Distribución de la intensidad del metamorfismo en el sector paleozoico de la Cordillera Ibérica según isóneas determinadas por la variación de los índices de KUBLER. a) Distribución de isóneas en el Paleozoico. b) Distribución de isóneas en los sistemas Cámbrico-Ordovícico. c) Distribución de isóneas en los sistemas Silúrico, Devónico y Carbonífero.

aquí obtenidas para el Carbonífero (Namuro-Westfaliense) del área de Montalbán. En sectores hercínicos algo más alejados de la Cordillera Ibérica, en los materiales carboníferos de la cuenca Ciñera-Matallana (León), con edades algo superiores (Estefaniense) y paragénesis que incluyen clorita, GALAN et al. (1978) definen condiciones térmicas similares, si bien las presiones se manifiestan superiores (2,5 Kb).

Mayor complejidad se encuentra en las relaciones de la intensidad del metamorfismo entre los niveles del Ordovícico. Así, tanto en la Sierra de la Demanda como en las Sierras de Rata (Guadalajara) y Albarracín (Teruel), el Ordovícico presenta las mismas características metamórficas, que a su vez coinciden con las del Cámbrico en la Sierra de la Demanda y la Cordillera Ibérica. Sin embargo, en Sierra Menera (Teruel) el Ordovícico presenta paragénesis sin clorita, reflejando una intensidad metamórfica que se aproxima a la existente en el Carbonífero de Montalbán. En los niveles silúricos de las Sierras de Albarracín (Teruel) y Ventosa (Guadalajara) aparece,

menos el Precámbrico (?) y Cámbrico alcanzan, con unas paragénesis muy similares, unas condiciones idénticas a las aquí determinadas. La ausencia de niveles estratigráficos correspondientes al Ordovícico, Silúrico y Devónico impiden establecer una mayor relación. Por el contrario, en el Carbonífero de la Sierra de la Demanda, al que se asigna una edad Westfaliense, APARICIO et al. (1991) determinan unas condiciones de $t < 175^\circ \text{C}$, es decir, ligeramente inferiores a las

igualmente, pirofilita, manifestando condiciones similares a las del Silúrico del área central de la Cordillera Ibérica.

CONCLUSIONES

No se aprecian variaciones en las características del metamorfismo, ni en las paragénesis, entre el grupo Paracuellos, que algunos autores asignan al Precámbrico, y el Cámbrico.

La única discontinuidad que se aprecia en el grado metamórfico se sitúa entre el Devónico y el Carbonífero.

Se aprecia una anomalía local en la relación entre el Silúrico-Devónico y el Carbonífero en cuanto a los valores de los índices de cristalinidad de la ilita, comprobándose que el Carbonífero presenta unos valores más pequeños (mayor intensidad del metamorfismo) que el Silúrico Superior - Devónico a pesar de que sus paragénesis indican un metamorfismo decreciente.

Una fuerte diferencia se aprecia, igualmente, en la comparación entre la serie metamórfica ordovícica del sector central de la Cordillera Ibérica y los afloramientos de Sierra Menera (sector sur). Por el contrario, el Cámbrico, el Silúrico y el Carbonífero presentan una mayor identidad en términos metamórficos.

Independientemente de que algunas de estas anomalías pueda estar reflejando la no muy exacta ubicación estratigráfica de las formaciones, realizada en función de los datos y bibliografía actualmente existente, es evidente que otras circunstancias pueden estar reflejándose en estos hechos, bien como las apuntadas por APARICIO et al. (1988) respecto a la proximidad de las intrusiones graníticas, bien a posibles inversiones en los procesos metamórficos, o la propia constitución litológica, más o menos permeable y receptiva al proceso metamórfico, o bien otras causas y factores que podrán ser determinados de forma más precisa a medida que avancen los estudios sobre el metamorfismo hercínico de bajo y muy bajo grado en el Macizo Ibérico.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado con la ayuda a la investigación del CSIC número 630/070/27, den-

tro del proyecto «El metamorfismo de bajo grado en el área hercínica española». A C. Sánchez y J. Arroyo por los trabajos de delineación. A A. Viloria, M. Castillejo, A. Fernández y A. Calduch, que realizaron la preparación de las muestras, y M. C. Sendra, la composición del trabajo.

REFERENCIAS

- ALIAGA, A. (1968): *Geologische untersuchungen in den Ostlichen Iberischen ketten nördlich des Rio Jalon (Zaragoza/Spain)*. Diss., 99 pp., Munster.
- APARICIO, A.; BRELL, J. M., y DOVAL, M. (1988): *El metamorfismo de los afloramientos paleozoicos de las Sierras de Rata, Mojón Alto, Albarracín, Menera y Ventosa, en la Cordillera Ibérica (provincias de Guadalajara y Teruel)*. Bol. Geol. Min., 99, 847-854.
- APARICIO, A.; BRELL, J. M., y GUARAS, B. (1991): *El Metamorfismo Hercínico de la Sierra de La Demanda (provincias de Logroño y Burgos)*. Bol. Geol. Min., 102, 240-246.
- BARTSCH, G. (1966): *Geologische untersuchungen in den Ostlichen Iberischen Ketten Zwischen Rio Jalon und der strasse Miedes-Codos-Cariñena (Spanien)*. Inst. Univ. Munster (iné.), 120 pp.
- BESCOS, J. M. (1988): *Estudio petrológico de las rocas fosfáticas y litológicas asociadas del Silúrico-Devónico de la Depresión del Río Cámaras (Zaragoza-Teruel)*. Tesina de Licenciatura. Dep. Geología. Univ. Zaragoza, 105 pp. (Inédita).
- BESCOS, J. M.; SORIANO, J., y TENA, J. M. (1989): *Diferenciación geoquímica durante los procesos de recristalización en apatitos sedimentarios*. III Congr. de Geof. de España, t. I, 23-44.
- CAPOTE, R., y GONZALEZ-LODEIRO, F. (1983): *La estructura hercínica en los afloramientos paleozoicos de la Cordillera Ibérica*. Libro Jubilar J. M. Ríos, t. I, 513-529.
- CARLS, P., y GANDL, I. (1967): *The lower Devonian of the Eastern Iberian Chaines (NE Spain) and the distribution of its Spiriferacea, Acastarinae and Asteropyginae*. Int. Symp. Devonian System., 453-464.
- CARLS, P., y LAGES, R. (1983): *Givetium und Ober-Devon in den Ostlichen Iberischen Ketten (Spanien)*. Z. dt. geol. Ges., 135, 119-142.
- DUNOYER DE SEGONZAC, G. (1969): *Les minéraux argileux dans la diagenese passage au metamorphisme*. Mem. Serv. Carte Geol. D'Alsace et de Lorraine, 29, 320 pp.
- ESQUEVIN, J. (1969): *Influence de la composition chimique des illites sur leur cristallinité*. Bull. Centre Rech. Pau - SNPA, 3, 147-153.
- FERNANDEZ-NIETO, C.; GONZALEZ LOPEZ, J. M., y GONZALEZ MARTINEZ, J. (1985): *El grado de metamorfismo*

de los materiales pelíticos de la zona de Santed (Zaragoza). Bol. Soc. Esp. Min., 8, 347-358.

FREY, M. (1970): *The step from diagenesis to metamorphism in pelitic rocks during Alpine orogenesis*. Sedimentology, 15, 261-279.

FREY, M.; SAUNDERS, J., y SCHWANDER, H. (1988): *The mineralogy and metamorphic geology of low-grade sediments, Northern Range, Trinidad*. Journal of Geological Society, 145, 563-576.

GALAN, E.; APARICIO, A., y VILLEGAS, F. (1978): *El metamorfismo de muy bajo grado (anquimetamorfismo) de la cuenca carbonífera Ciñera-Matallana (provincia de León)*. Est. Geol., 34, 505-510.

GOZALO, E., y LIÑAN, E. (1988): *Los materiales hercínicos de la Cordillera Ibérica en el contexto del Macizo Ibérico*. Est. Geol., 44, 399-404.

HAAS, H., y HOLDAWAY, J. M. (1973): *Equilibrium in the system $Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ involving the stability limits of pyrophyllite and thermodynamic data of Phyllosilicate*. Amer. J. Sci., 273, 449-464.

HORTON, D. G. (1985): *Mixed-Layer illite/smectite as a paleo-temperature indicator in the Amethyst vein system, Creede district, Colorado, USA*. Contr. Min. Petr., 91, 171-179.

JOSOPAIT, V. (1971): *Geologische Untersuchungen in Kambrium und Tremados südlich von Ateca (Westliche Iberische Ketten, NE-Spanien)*. Unreröff. Diss., Münster, 115 pp.

JULIVERT, J. (1954): *Observaciones sobre la tectónica de la depresión de Calatayud*. Arrahond. Rev. Mus. Ciudad de Sabadell, 1-18.

JULIVERT, M.; FONTBOTE, J. M.; RIBEIRO, A., y CONDE, L. (1974): *Mapa tectónico de la Península Ibérica y Baleares*. IGME.

KÜBLER, B. (1968): *Evaluation quantitative du métamorphisme par la cristallinité de l'illite*. Bull. Centre Rech. Pau.—SNPA 2, 385-397.

LIÑAN, E., y TEJERO, R. (1988): *Las formaciones precámbricas del antiforme de Paracuellos (Cadenas Ibéricas)*. Bol. R. Soc. Esp. Hist. Natural (Geología), 84, 39-49.

LOTZE, F. (1929): *Stratigraphie und Tektonik des Keltiberischen Grundgebirges (Spanien)*. Abh. Ges. Wiss. Gött. Math. Phys. Kl., 14 (2), 1-320.

LOTZE, F. (1958): *Zur Stratigraphie des spanischen Kambriums*. Geologie, 7, 727-750.

LOTZE, F. (1961): *Das Kambrium Spaniens. Teil I: Stratigraphie*. Akad. Wiss. Lit. Abh. Math. Naturwiss. Kl., 6, 1-216 (trad. en Mem. Inst. Geol. España, 75, 1-256).

LOTZE, F. (1954): *Estratigrafía y tectónica de las Cadenas Paleozoicas Celtibéricas*. Publicaciones extranjeras geológicas de España, t. 8, 313 pp.

MAPA GEOLOGICO DE ESPAÑA (1982): 1/200.000. Hoja núm. 40. Daroca, 58 pp.

MAPA GEOLOGICO DE ESPAÑA (1980): 1/200.000. Hoja núm. 32. Zaragoza, 33 pp.

MAPA GEOLOGICO DE ESPAÑA (1982): 1/200.000. Hoja núm. 31. Soria, 23 pp.

MAPA GEOLOGICO DE ESPAÑA (1983): 1/50.000. Hoja núm. 465. Daroca, 76 pp.

MAPA GEOLOGICO DE ESPAÑA (1973): 1/50.000. Hoja núm. 351. Olvega, 23 pp.

MAPA GEOLOGICO DE ESPAÑA (1979): 1/50.000. Hoja núm. 518. Montalbán, 31 pp.

MAPA GEOLOGICO DE ESPAÑA (1977): 1/50.000. Hoja núm. 492. Segura de los Baños, 26 pp.

MAPA GEOLOGICO DE ESPAÑA (1980): 1/50.000. Hoja núm. 352. Tabuena, 37 pp.

MAPA GEOLOGICO DE ESPAÑA (1977): 1/50.000. Hoja núm. 493. Ollete, 44 pp.

MAPA GEOLOGICO DE ESPAÑA (1982): 1/50.000. Hoja núm. 438. Paniza, 80 pp.

MAPA GEOLOGICO DE ESPAÑA (1981): 1/50.000. Hoja núm. 381. Illueca, 39 pp.

MAPA GEOLOGICO DE ESPAÑA (1981): 1/50.000. Hoja núm. 409. Calatayud, 44 pp.

MAPA GEOLOGICO DE ESPAÑA (1983): 1/50.000. Hoja núm. 464. Used.

MAPA GEOLOGICO DE ESPAÑA (1983): 1/50.000. Hoja núm. 437. Ateca, 67 pp.

MAPA GEOLOGICO DE ESPAÑA (1980): 1/50.000. Hoja núm. 410. La Almunia de Doña Godina, 40 pp.

MARTIN-GUILLEN, M.; GONZALEZ, J. M., y LOPEZ AGÜAYO, F. (1987): *Caracterización de un interstratificado tipo cörrensita en las pizarras del Precámbrico de las Cadenas Ibéricas (provincia de Zaragoza)*. Bol. Soc. Esp. Miner., 10 (2), 141-148.

MARUMO, K. (1989): *Genesis of kaolin minerals and pyrophyllite in Kuroko deposits of Japan: Implications for the origins of the hydrothermal fluids from mineralogical and stable isotope data*. Geochimica et Cosmochimica Acta, 53, 2915-2924.

MATEO, J. (1987): *Estudio geológico del sector Tobed-Codos-Mainar (Cadenas Ibéricas Orientales)*. Petrología de los materiales paleozoicos. Tesis Licenciatura. Univ. Zaragoza (inédita), 297 pp.

MAXWELL, D. T., y HOWER, J. (1967): *High-grade diagenesis and low-grade metamorphism of illite in the Precambrian Belt Series*. Amer. Min., 52, 843-857.

MCDOWELL, S. D., y ELDERS, W. A. (1980): *Authigenic layer silicate minerals in borehole Elmore 1, Salton Sea geothermal field, California, USA*. Contr. Min. Petr., 74, 293-310.

MELENDEZ, B. (1944): *Contribución al estudio del Paleozoico aragonés*. Trab. Inst. Ciencias Nat. «José Acosta». Serv. Geol., 3, núm. 1, Madrid.

NAVAS, A. M. (1986): *Estudio geológico y petrológico de los materiales paleozoicos aflorantes de un sector de las Sierras de Vicort y Algairén (provincia de Zaragoza)*. Tesis Licenciatura. Univ. Zaragoza (inédita), 358 pp.

NAVAS, A. M., y TENA, J. (1987): *Grado de diagénesis de las rocas pelíticas del Paleozoico en las Sierras de Vicort y Algairén (Cordillera Ibérica)*. Rev. Acad. Ciencias. Zaragoza, 42, 175-181.

NOACH, Y.; GIROIR, G., y GIRARD, J. P. (1987): *Chlorites as indicators of Paleoenvironments*. En: *Geochemistry and mineral formation in the Earth surface. Proceedings of the International meeting «Geochemistry of the Earth Surface and Processes of Mineral formation»*. Granada. Eds. R. Rodríguez y Y. Tardy, CSIC-CNRS, 639-652.

NORRIS, R. J. (1986): *Development of slaty cleavage in a mudstone unit from the Cantabrian Mountains, Northern Spain*. Journal of Structural Geology, 8, 871-878.

PADAN, A.; KISCH, H. J., y SHAGAM, R. (1982): *Use of the lattice parameter b_0 of dioctahedral illite/muscovite for the characterization of P/T gradients of incipient metamorphism*. Contrib. Miner. Petrol., 79, 85-95.

QUARCH, H. (1975): *Stratigraphie und Tektonik des Jungpaleozoikums im Sattel von Montalbán (Ostliche Iberische Ketten, NE-Spanien)*. Geol. Jb., 16, 3-43.

RAO, T. R. (1977): *Distribution of elements between co-existing phengite and chlorite from the greenschist facies of the Tennant Creek area, Central Australia*. Lithos, 10, 103-112.

REYES, A. G., y CARDILE, C. M. (1989): *Characterization of clay scales forming in Philippine geothermal wells*. Geothermics, 18, 429-446.

SASSI, F. P., y SCOLARI, A. (1974): *The b_0 value of the potassic white micas in low-grade metamorphic rocks. An application to the Eastern Alps*. Tschermarks Miner. Petrogr. Mitt., 18, 105-113.

SCHEUPLEIN, R. (1970): *Stratigraphie und tektonik der schichten folge in raum Daroca-Calamocho (Westliche Iberische Ketten NE Spanien)*. Univ. Diss. Wurzburg, 106 pp.

SCHMITZ, U. (1971): *Geologische untersuchungen im Kambrium und Tremadoc der westlichen Iberischen Ketten*.

Nordlich Ateca (Zaragoza), NE Spanien. Univ. Diss. Munster, 132 pp.

TEJERO, R. M. (1987): *Tectónica de los Macizos Paleozoicos al NE de Calatayud. Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica (provincia de Zaragoza)*. Tesis doctoral. Univ. Complutense de Madrid, 320 pp.

THOMPSON, A. B. (1970): *A note on the kaolinite pyrophyllite equilibrium*. Am. J. Sci., 268, 454-458.

TORRES, J. A. (1989): *Estudio geológico, petrológico, geoquímico y de aprovechamiento industrial del magmatismo calcoalcalino, stephano-pérmico, en el anticlinal de Montalbán (provincia de Teruel)*. Memoria de Licenciatura, 2 vols., 528 pp. Inédito. Dep. Geología. Univ. Zaragoza.

VELDE, B. (1964): *Low-grade metamorphism of micas in pelitic rocks*. Carnegie Inst. Wash. year book, 63 (1963-1964), 142-147.

VELDE, B. (1972): *Phase equilibria for dioctahedral expandable phases in sediments and sedimentary rocks*. Proc. Int. Clay Conf., CSIC, Madrid, 235-248.

VELDE, B. (1977): *Clays and clay minerals in natural and synthetic systems*. Developments in Sedimentology, 21. Elsevier Sci. Publishing Co., New York.

VELDE, B., y KORNPROBST, J. (1969): *Stabilité des silicates d'alumine hydratés*. Contrib. Min. Petr., 21, 63-74.

VILCHEZ, J. F. (1984): *Rasgos geológicos y estructurales de la Unidad de Herrera (Cadena Ibérica)*. Tesis Licenciatura. Univ. Zaragoza (inédita), 98 pp.

VILLAS, E. (1983): *Las formaciones del Ordovícico Medio y Superior de las Cadenas Ibéricas y su fauna de braquiópodos*. Est. Geol., 39, 359-377.

WEAVER, C. E. (1960): *Possible uses of clay minerals in search for oil*. Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol., 44, 1505-1518.

WEAVER, C. E. (1984): *Shale-slate metamorphism in southern Appalachians*. Elsevier science publishing Company Inc. New York. Developments in Petrology, 10, 239 pp.

WOLF, R. (1980): *The lower and upper boundary of the ordovician System of some selected regions (Celtiberia, Eastern, Sierra Morena) in Spain. Part I: The lower Ordovician sequence of Celtiberia*. Neves, Jb. Geol. Plaent. Abh. 160, 118-137.

Original recibido: Diciembre de 1990.

Original aceptado: Mayo de 1991.

INFORMACION

150 ANIVERSARIO LUCAS MALLADA (1841-1991)

En este año se conmemora el 150 aniversario del nacimiento de Lucas Mallada, eminente ingeniero de minas, geólogo y humanista.

Con tal motivo, se han preparado una serie de actos en la sede de la E. T. S. de Ingenieros de Minas de Madrid; como más destacados figuran:

Acto conmemorativo e inauguración de la Exposición «150 Aniversario de Lucas Mallada».

Ciclo de conferencias sobre «Historia de la Minería y Geología en España».

I Bienal Española de Ingeniería Geológica y Minera «Ingeniería Geológica y Minera para el desarrollo y la calidad de vida».

El Comité organizador ha sido el siguiente:

Presidente:

Ilmo. Sr. D. Enrique García Álvarez

Director General de Minas y de la Construcción

Vocales:

Ilmo. Sr. D. José Ramón Irisarri Yela

Presidente de la Asociación Nacional y Consejo Superior del Colegio de Ingenieros de Minas

Ilmo. Sr. D. Emilio Llorente Gómez

Director General del Instituto Tecnológico GeoMinero de España

Ilmo. Sr. D. Hermenegildo Mansilla Izquierdo

Director de la E. T. S. de Ingenieros de Minas de Madrid

Los actos estuvieron promovidos por los siguientes organismos:

Dirección General de Minas y de la Construcción.

Secretaría General de la Energía y Recursos Minerales.

Ministerio de Industria, Comercio y Turismo.

Consejo Superior de Colegios de Ingenieros de Minas de España.

Instituto Tecnológico GeoMinero de España.

Secretaría General de la Energía y Recursos Minerales.

Ministerio de Industria, Comercio y Turismo.

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas.

Universidad Politécnica de Madrid.

PRESENTACION

Por **Emilio Llorente Gómez**

DIRECTOR GENERAL DEL ITGE

Al estudiar la obra de Lucas Mallada, después de ciento cincuenta años de su nacimiento, se llega a la conclusión de que nos encontramos ante una personalidad que puede definirse, en un sentido amplio, como incansable investigador, tanto en el campo profesional como en el humanista.

Lucas Mallada nace en Huesca en octubre de 1841, y finaliza sus estudios de enseñanza media en Madrid, ingresando posteriormente en la Escuela de Minas, en la que finaliza sus estudios como Ingeniero en el año 1866.

Su relación con eminentes Ingenieros de Minas y Natura-

listas dedicados al estudio y aplicación de la Geología hacen que pocos años después de finalizados sus estudios en la Escuela de Minas, se incorpore, en 1870, a la Comisión del Mapa Geológico, institución en la que desarrolló una fecunda labor, que supo hacer compatible con otras actividades como la de profesor de Paleontología en la Escuela de Minas de Madrid.

La gran extensión de la obra de Lucas Mallada a lo largo de su vida profesional abarca campos tan diversos como la docencia, periodismo socio-político y el humanismo, pero fundamentalmente su mayor labor la desarrolló como ingeniero de minas - geólogo, con trabajos que han contribuido de forma muy eficaz al conocimiento de nuestro suelo y sus yacimientos minerales.

La actividad de Mallada en la Comisión del Mapa Geológico, actual Instituto Tecnológico GeoMinero de España, se desarrolla a lo largo y ancho de toda nuestra geografía, publicando varios trabajos que formaron parte de una importante contribución al Mapa Geológico de España, pero sus obras más importantes, fruto de su constante laboriosidad, fueron el «Catálogo general de las especies fósiles encontradas en España» y la «Explicación del Mapa Geológico de España», en las que se condensa el saber geológico de su tiempo.



Lucas Mallada y Pueyo, eminente ingeniero de minas, geólogo y humanista (1841-1921)

Guiado por su espíritu humanista y su afán de servicio al país, Lucas Mallada alterna su gran actividad geológica con otra no menos fecunda, que se pone de manifiesto en sus escritos y publicaciones, donde hace un análisis profundo de los problemas socio-políticos de su época, «Los males de la Patria», destacando dos capítulos: causas físicas de la pobreza de nuestro suelo, el atraso de la industria y el comercio y los defectos de carácter nacional; «La futura revolución española»; «Las cartas aragonesas», y su colaboración en el diario «El Progreso», demuestran la gran preocupación por temas distintos a su profesión, aunque fundados en sus conocimientos científicos. El mismo Mallada diría, en su conferencia sobre Reformas Urbanas de Madrid, pronunciada en el Instituto de Ingenieros Civiles, en 1907: «Una debilidad harto común en todos los mortales es la de aficionarse, con ardor, por cambiar de postura, a un asunto que es muy diferente de los que tiene que ver con sus ocupaciones habituales.»

Con este acto conmemorativo, dedicado a la memoria de Lucas Mallada, queremos rendir merecido tributo a un hombre cuyo gran prestigio es ampliamente conocido entre los profesionales de la minería y geología, pero, tal vez, no lo suficiente por el resto de los españoles, sobre todo si se tiene en cuenta que estamos ante quien fuera una personalidad de gran relevancia.

150 ANIVERSARIO DE LUCAS MALLADA

Por **Enrique García Álvarez**

DIRECTOR GENERAL DE MINAS Y DE LA CONSTRUCCION

La efemérides que hoy nos reúne, el 150 Aniversario del nacimiento de Lucas Mallada, es una oportunidad para recordar las aportaciones científicas y tecnológicas de este eminente ingeniero de minas-geólogo. En el campo de las Ciencias Geológicas, sus trabajos sobre la Paleontología española, materializados en la Sinopsis y el Catálogo de especies fósiles que se han encontrado en España, supusieron un hito fundamental para el desarrollo de esta Ciencia en nuestro país. Otro tanto puede decirse respecto a la Estratigrafía, a través de las aportaciones de su monumental «Explicación del Mapa Geológico de España».

Asimismo, sus trabajos cartográficos dieron a conocer la geología de siete provincias españolas, y un valioso con-

junto de datos sobre el medio físico, y aspectos científico-técnicos relacionados con su riqueza minera y las aguas subterráneas. En el campo de la Ingeniería Geológica, su aportación a la exploración y evaluación de nuestros recursos mineros, carboníferos y metálicos, ha sido de primera magnitud, tanto por el enorme caudal de datos y yacimientos estudiados, como por la calidad y precisión de los mismos. En definitiva, Mallada es, probablemente, la principal figura española en el campo de las Ciencias Geológicas y la Ingeniería Geológica de Exploración y Evaluación Minera.

Pero esta efemérides es, también, una oportunidad para recordar algunos elementos del ambiente que dio origen

listas dedicados al estudio y aplicación de la Geología hacen que pocos años después de finalizados sus estudios en la Escuela de Minas, se incorpore, en 1870, a la Comisión del Mapa Geológico, institución en la que desarrolló una fecunda labor, que supo hacer compatible con otras actividades como la de profesor de Paleontología en la Escuela de Minas de Madrid.

La gran extensión de la obra de Lucas Mallada a lo largo de su vida profesional abarca campos tan diversos como la docencia, periodismo socio-político y el humanismo, pero fundamentalmente su mayor labor la desarrolló como ingeniero de minas - geólogo, con trabajos que han contribuido de forma muy eficaz al conocimiento de nuestro suelo y sus yacimientos minerales.

La actividad de Mallada en la Comisión del Mapa Geológico, actual Instituto Tecnológico GeoMinero de España, se desarrolla a lo largo y ancho de toda nuestra geografía, publicando varios trabajos que formaron parte de una importante contribución al Mapa Geológico de España, pero sus obras más importantes, fruto de su constante laboriosidad, fueron el «Catálogo general de las especies fósiles encontradas en España» y la «Explicación del Mapa Geológico de España», en las que se condensa el saber geológico de su tiempo.



Lucas Mallada y Pueyo, eminente ingeniero de minas, geólogo y humanista (1841-1921)

Guiado por su espíritu humanista y su afán de servicio al país, Lucas Mallada alterna su gran actividad geológica con otra no menos fecunda, que se pone de manifiesto en sus escritos y publicaciones, donde hace un análisis profundo de los problemas socio-políticos de su época, «Los males de la Patria», destacando dos capítulos: causas físicas de la pobreza de nuestro suelo, el atraso de la industria y el comercio y los defectos de carácter nacional; «La futura revolución española»; «Las cartas aragonesas», y su colaboración en el diario «El Progreso», demuestran la gran preocupación por temas distintos a su profesión, aunque fundados en sus conocimientos científicos. El mismo Mallada diría, en su conferencia sobre Reformas Urbanas de Madrid, pronunciada en el Instituto de Ingenieros Civiles, en 1907: «Una debilidad harto común en todos los mortales es la de aficionarse, con ardor, por cambiar de postura, a un asunto que es muy diferente de los que tiene que ver con sus ocupaciones habituales.»

Con este acto conmemorativo, dedicado a la memoria de Lucas Mallada, queremos rendir merecido tributo a un hombre cuyo gran prestigio es ampliamente conocido entre los profesionales de la minería y geología, pero, tal vez, no lo suficiente por el resto de los españoles, sobre todo si se tiene en cuenta que estamos ante quien fuera una personalidad de gran relevancia.

150 ANIVERSARIO DE LUCAS MALLADA

Por **Enrique García Álvarez**

DIRECTOR GENERAL DE MINAS Y DE LA CONSTRUCCION

La efemérides que hoy nos reúne, el 150 Aniversario del nacimiento de Lucas Mallada, es una oportunidad para recordar las aportaciones científicas y tecnológicas de este eminente ingeniero de minas-geólogo. En el campo de las Ciencias Geológicas, sus trabajos sobre la Paleontología española, materializados en la Sinopsis y el Catálogo de especies fósiles que se han encontrado en España, supusieron un hito fundamental para el desarrollo de esta Ciencia en nuestro país. Otro tanto puede decirse respecto a la Estratigrafía, a través de las aportaciones de su monumental «Explicación del Mapa Geológico de España».

Asimismo, sus trabajos cartográficos dieron a conocer la geología de siete provincias españolas, y un valioso con-

junto de datos sobre el medio físico, y aspectos científico-técnicos relacionados con su riqueza minera y las aguas subterráneas. En el campo de la Ingeniería Geológica, su aportación a la exploración y evaluación de nuestros recursos mineros, carboníferos y metálicos, ha sido de primera magnitud, tanto por el enorme caudal de datos y yacimientos estudiados, como por la calidad y precisión de los mismos. En definitiva, Mallada es, probablemente, la principal figura española en el campo de las Ciencias Geológicas y la Ingeniería Geológica de Exploración y Evaluación Minera.

Pero esta efemérides es, también, una oportunidad para recordar algunos elementos del ambiente que dio origen

a la figura de Mallada, y sin cuyo conocimiento no sería posible su comprensión.

Me estoy refiriendo, ante todo, a la tradición de la cual Mallada es heredero. Mallada fue precedido por varias generaciones de ingenieros geólogos que realizaron aportaciones fundamentales a las Ciencias Geológicas y la Ingeniería Geológica en nuestro país. Es necesario recordar aquí a figuras como Andrés del Río, Schultz, Casiano de Prado o Joaquín Ezquerro del Bayo, que brillan con luz propia en la Historia de la Ciencia y la Técnica españolas.

Pero no es posible entender la figura de Mallada, ni la Comisión del Mapa Geológico, antecesora del actual Instituto Tecnológico GeoMinero de España sin analizar, siquiera sea de forma somera, la minería española del siglo XIX y su papel. Este sector industrial, dotado de una gran pujanza, representó en el siglo pasado casi un 30 por 100 de nuestras exportaciones, y supuso el comienzo del desarrollo industrial en diversas regiones. Cabe recordar a este respecto su papel en la industrialización del País Vasco o Asturias, y en la comunicación por ferrocarril de no pocas zonas.

Por otra parte, la minería impulsó la constitución de la Comisión del Mapa Geológico en 1849, orientado desde sus comienzos tanto al conocimiento geológico de España

LA APORTACION CIENTIFICA Y TECNOLOGICA DE LUCAS MALLADA

Por Francisco Javier Ayala Carcedo

JEFE DEL AREA DE INGENIERIA GEOAMBIENTAL DEL ITGE

La aproximación objetiva a las obras científicas y tecnológicas del pasado, presenta algunos problemas de método que conviene poner de relieve. Ante todo, la vinculación orgánica de Ciencia y Tecnología al Sistema Social en el que se desarrollan y del que forman parte. Por otro lado, el difícil problema de la valoración de las aportaciones, ya que se sitúan en la corriente viva del conocimiento y, en general, están destinadas, en contraste con las artísticas, a ser superadas con el tiempo, por lo que su valor es siempre relativo al momento histórico.

Hechas estas puntualizaciones, pasaré a la exposición y el análisis de las aportaciones científicas y tecnológicas de Lucas Mallada, eminente ingeniero geólogo, en ocasión del 150 Aniversario de su nacimiento.

ANTECEDENTES Y AMBIENTE

El desarrollo de la Geología en España comienza en la segunda mitad del siglo XVIII. Cuando Alexander von Humboldt visita Méjico en 1803, el ingeniero de minas Andrés del Río, descubridor del vanadio y director del Colegio de Minería, está ya redactando de hecho un texto sobre Geognosia, al cual contribuirá el propio Humboldt. Fausto de Elhuyar, descubridor, con su hermano, del wolframio, en su papel de máxima autoridad minera, enviará sistemáticamente, para su formación geológica en la Escuela de Minas alemana de Freiberg, a decenas de ingenieros de minas

como al desarrollo tecnológico en los campos de los recursos mineros y el agua subterránea. Sin la existencia de la Comisión, la figura de Mallada no hubiera existido en su dimensión profesional. En su larga andadura, la Comisión ha prestado servicios inapreciables al país y ha ido adaptándose a las nuevas necesidades que surgían, como las relaciones con el medio ambiente o la tecnología y seguridad minera, impulsando su dimensión tecnológica de forma acorde con su vinculación a la Industria y la Energía. Hoy, tras el lanzamiento del programa de cartografía geológica a escala 1/50.000, potenciado decisivamente por el Plan Nacional de Minería de 1970, estamos a punto de completar las 1.130 Hojas de que se compone, y dar cumplimiento así a una de las aspiraciones de Mallada.

Gracias a sus trabajos y los de otros profesionales que, como él, trabajaron en condiciones mucho más difíciles que las actuales, hemos podido llegar hoy a un nivel científico y tecnológico del ITGE que es plenamente homologable al de los mejores Servicios Geológicos y Mineros internacionales. Creo que este reconocimiento a la labor de Mallada es de justicia, y razón sobrada para este acto conmemorativo.

Muchas gracias.

que posteriormente realizarán trabajos sistemáticos en nuestro país, casi cien años antes de que la Junta de Ampliación de Estudios de la Institución Libre de Enseñanza hiciera una labor similar a nivel general.

Cuando Mallada ingresa en la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales en 1895, sabedor de su *deuda con el pasado* y de su propio papel, dedica su discurso a los «Progresos de la Geología en España en el siglo XIX».

Previamente a Mallada, que comienza sus trabajos en 1866, tras finalizar sus estudios en la Escuela de Minas de Madrid, de la cual sería catedrático de Paleontología entre 1879 y 1892, los ingenieros de minas-geólogos Joaquín Ezquerro del Bayo y Amalio Maestre, han publicado los primeros mapas geológicos de España, el primero en 1850 y el segundo en 1863.

En 1864, los geólogos franceses Verneuil y Collomb publicarán otro.

Previamente también, otros eminentes ingenieros geólogos, como Guillermo Schultz o Casiano de Prado, han realizado excelentes y meritorios trabajos en buena parte del territorio, tanto en cartografía geológica como en Ingeniería Geológica en los campos de los recursos mineros y el agua subterránea.

Del nivel relativo al que estos hombres llevaron estas parcelas del saber, puede darnos idea el hecho de que en

1847, al crearse la Real Academia de Ciencias, de los trece académicos fundadores, tres, Ezquerro del Bayo, Amar de la Torre y Luxán, son ingenieros de minas-geólogos.

Por otra parte, en 1849, Isabel II ha creado la Comisión de la Carta Geológica del Reino, que, transformada en Comisión del Mapa Geológico en 1870, será la institución clave en el trabajo de Mallada y artífice del primer Mapa Geológico Sistemático de España a escala 1:400.000. Los objetivos institucionales que le son marcados, como recoge el Decreto Fundacional, buscan, aparte de los propiamente científicos concretados en la elaboración del Mapa, los tecnológicos, orientados, como dirá el Decreto, a «una aplicación práctica dirigida a fomentar entre nosotros todas las ramas que puedan influir en la riqueza y la prosperidad de la Monarquía». Esta orientación conecta directamente con el impulso a la Ingeniería Geológica, especialmente en sus ramas relacionadas con la exploración minera y el agua subterránea. En este sentido, la vinculación de los progresos de la Geología y la Ingeniería Geológica al de la Minería, son evidentes ayer y hoy. No puede olvidarse en este sentido el importante papel de la Minería en la época clave del trabajo de Mallada, el último tercio del siglo XIX. La Minería española, con un régimen administrativo liberal, contribuye, con casi un 30 por 100, al conjunto de nuestras exportaciones. A través del sistema fiscal, y en condiciones de relación real de intercambio básicamente ventajosas para España hasta 1880, como ha demostrado el profesor Prados de la Escosura, serán un elemento importante para el lento proceso de despegue industrial y de desarrollo de nuestro país. No es de extrañar, por tanto, el interés del Estado en promover el conocimiento de nuestro subsuelo.

El ambiente político que presencia el trabajo de Mallada cambia profundamente a sus treinta y tres años, cuando, tras el sexenio abierto por la Revolución de Septiembre de 1868, la Restauración de 1874 instaura una nueva época de paz civil y de lento cambio sociopolítico. Este período desembocará, por la limitada capacidad de evolución del Estado para asumir estos cambios, en el golpe de Estado del general Primo de Rivera en 1923, dos años después de la muerte de Mallada. Este ambiente, probablemente, influyó en la actitud regeneracionista de don Lucas.

MALLADA Y LA GEOLOGIA

La época de Mallada presencia la acción de una *pléyade de profesionales de primer orden*. Entre los ingenieros de minas-geólogos, tenemos figuras como Cortázar, Vidal, Thos y Codina, Gonzalo y Tarín, Adán de Yarza, Adaro, Sánchez Lozano y Puig y Larraz; entre los naturalistas geólogos, MacPherson, Vilanova y el sacerdote Jaime Almera, que tan valiosos trabajos realizara en Cataluña en el campo cartográfico, y autor también de un libro donde intentaría, con poco éxito, compatibilizar la Geología de su tiempo y el Génesis bíblico, en un intento de contrarrestar la progresiva influencia en España del evolucionismo.

En su discurso de ingreso en la Academia de Ciencias, nos ha transmitido Mallada el ambiente de aquel magnífico cuarto final del XIX vivido desde la Comisión: «¡Qué

movimiento, qué hervor en aquel período de vertiginosa actividad, gracias al incansable celo, a la sabia dirección de Fernández de Castro!... Todas nuestras montañas, todos nuestros valles, todos nuestros ríos y arroyos, todas nuestras llanuras se cruzaban sin sosiego ni descanso...»

Estos hombres tuvieron un reto que cumplir, la realización del Mapa Geológico de España, encontraron un gran organizador, Manuel Fernández de Castro, y el apoyo público dado por hombres como el ingeniero de caminos y futuro Premio Nobel, Echeagaray, en un contexto político pacífico tras la Restauración. El resultado fue el Mapa de 1889, primer Mapa realmente sistemático de España. A pesar del retraso español en la publicación de mapas nacionales frente a los primeros sistemáticos ingleses (1815), franceses (1823) y alemanes (1832), debido al enorme atraso científico y económico durante el reinado de Fernando VII, España recupera con este Mapa un nivel homologable al de los que se están publicando entonces en otros países, producidos por los Servicios Geológico-Mineros que se crean en Europa entre 1835, en el Reino Unido, y 1867, en Francia. Este es el resultado de la creación del Servicio Geológico-Minero español, que con unos efectivos modestos y vida administrativa precaria, engancha a nuestro país con Europa. Mallada pudo decir, justamente, en 1895: «¿Hay otro ramo del saber humano que en tan corto tiempo haya progresado tanto en España?»

Mallada sugiere a Fernández de Castro, ingeniero director de la Comisión y autor del primer Mapa Geológico de Cuba, que la cartografía, de acuerdo con el Derecho Fundacional de la Comisión, comience por las provincias de interés minero, en las que antes comenzará a rendir sus frutos, y que se cree un Boletín donde se dé cuenta de los progresos que vayan produciéndose. Fruto de esta última sugerencia será el hoy BOLETIN GEOLOGICO Y MINERO DEL ITGE, que aparece en 1874.

La labor de Mallada es extraordinaria por su volumen y calidad. Es el realizador de los *Mapas y Memorias provinciales* de Huesca (1877), Cáceres (1876), Córdoba (1880), Navarra (1882), Jaén (1884), Tarragona (1890) y Toledo (1912), esta última con E. Dupuy de Lôme. Para valorar su espléndida labor debe tenerse presente la dificultad de comunicaciones de la época, a menudo sólo con caminos de herradura y carreteros, la falta de albergues, lo precario de las bases topográficas y la incompreensión casi general hacia su labor científica, fruto del analfabetismo, del orden del 75 por 100 del país, y aún muy superior en las comarcas agrarias, y del caciquismo.

Destaca el minucioso y abundante trabajo de campo, al cual Mallada y sus compañeros dan un valor fundamental en contraste con cierta tendencia desvalorizadora que parece estarse instalando en la actualidad. Sorprende al observar el Mapa de 1889, y ello es prueba del espléndido trabajo de campo, cómo en el Mapa está captada la geología del país con notable precisión, poco modificada por los mapas posteriores de escala comparable.

Sin embargo, el trabajo de Mallada no para ahí, ni mucho menos. Simultáneamente, y en sucesivas entregas en 1875, 1880, 1884, 1885 y 1887, realiza la «*Sinopsis de las especies fósiles que se han encontrado en España*», que llena 804 páginas. En 1892, como coronación de la Sinopsis, publica

el «Catálogo general de las especies fósiles encontradas en España», donde se relacionan 4.058 especies, coleccionadas en buena parte por los Distritos Mineros y la Comisión.

Sólo una obra como esta hubiera bastado para colocarle en un lugar privilegiado de la Geología española, como uno de los *principales artifices de la Paleontología española*. Pues bien, don Lucas, en sucesivas entregas en 1895, 1896, 1899, 1902, 1904, 1907 y 1911 realiza la monumental «Explicación del Mapa Geológico de España», complemento necesario del Mapa de 1889, y en buena medida síntesis del saber geológico de su tiempo. La Explicación ocupa 3.740 páginas, y fue un gran éxito editorial en su época. Al igual que la Sinopsis, está ordenada cronológicamente por Periodos Geológicos. Su valor se ve realzado por el hecho de que contiene, en las sucesivas introducciones, un verdadero tratado de la *Estratigrafía e Historia Geológica* en su época, además de otras aportaciones que veremos en el apartado siguiente. Sinopsis y Explicación fueron la más valiosa herramienta de trabajo en Geología durante décadas. Así lo entenderán los geólogos extranjeros que trabajaron en España en los años 20 y 30, cuyo trabajo se basó en parte en la reordenación cartográfica del Mapa de 1889, como me ha sugerido el profesor Truyos. Nunca en nuestro país se ha vuelto a realizar un trabajo individual tan colosal en Geología. Con él se cierra una época: Mallada es el último geólogo con un conocimiento global y enciclopédico del saber geológico de su tiempo en España.

En la realización de estos trabajos se aprecian la tenacidad y capacidad de trabajo de Mallada, que trabaja doce años en la Sinopsis y dieciséis en la Memoria Explicativa, simultáneamente a otros trabajos.

MALLADA, LA GEOLOGIA APLICADA Y LA INGENIERIA GEOLOGICA

El desarrollo de la Geología Aplicada y la Ingeniería Geológica no es, ni mucho menos, cosa de las últimas décadas. Basta pensar en la misión científico-aplicada y tecnológica encomendada a la Comisión por el Decreto Fundamental de 1849, materializada en múltiples trabajos sin solución de continuidad hasta hoy. En España *el desarrollo de estas disciplinas, necesario para la actividad productiva aun en ausencia de una Ciencia totalmente formalizada, fue obra en buena medida de los ingenieros de minas y caminos desde comienzos del XIX, y de naturalistas-geólogos como Vilanova para la Hidrogeología y la Tecnología Hidrogeológica.*

La preocupación por las aplicaciones, necesaria en los ingenieros, llevó al desarrollo de la Geología Aplicada (a los yacimientos mineros, al agua subterránea, a las obras civiles y mineras) y, paralelamente, a la Ingeniería Geológica de Evaluación y Exploración Minera, Hidrogeológica y Geotécnica, a niveles progresivamente más perfeccionados y, en consonancia con su época, incluso previamente al desarrollo científico completo, tal y como la Historia de la Tecnología registra para múltiples campos.

Mallada tiene en esto ilustres precedentes: Ezquerro del Bayo, Schultz y Casiano de Prado entre los ingenieros de minas; Inchaurrendieta, entre los de caminos, y Vilanova, entre los naturalistas.

Su aportación a la *Geología Aplicada* es, principalmente, en la *Geología de Yacimientos*, y especialmente en la *Meta-logenia y la Geología del Carbón*. La «Explicación» contiene, como ha señalado Alastrué, casi 400 páginas dedicadas al tema, que constituyen un verdadero tratado de Criaderos, con multitud de ejemplos españoles. Su aportación a la Hidrogeología se condensa en un trabajo presentado al Congreso Nacional de Minería de Murcia, en 1900.

Sus trabajos en *Ingeniería de Exploración y Evaluación Minera* son, principalmente, en *cuencas carboníferas*, evaluando tecnológica y económicamente los yacimientos y explotaciones sobre un concienzudo trabajo geológico. Sucesivamente estudia las cuencas de Bélmez (1876), Ciñera-Matallana (1887), Valderrueda y Guardo (1892), Sabero (1900) y Gualdarbo (1913), pero no faltan trabajos sobre hierro (1899), wolframio (1908) y petróleo y azufre (1909). Por otra parte, la aportación al análisis geológico, tecnológico y económico de los yacimientos metálicos españoles que se halla en sus 90 artículos sobre el tema publicados en el diario *El Progreso*, de Madrid, entre 1881 y 1883, forman un conjunto de casi 400 páginas, probablemente sin paralelo individual en todo el siglo XIX en España, en el campo de la divulgación científico-técnica.

En cuanto a la *Tecnología Hidrogeológica*, su mejor trabajo, realizado con su amigo y compañero Vidal, es el relativo al abastecimiento de aguas potables a Cartagena, de 140 páginas, verdadero modelo de proyecto de ingeniería, que sirvió para resolver el problema de abastecimiento de esta ciudad. Mallada sigue en este campo, lo que fue línea permanente de trabajo de la Comisión del Mapa Geológico desde sus comienzos, a menudo insuficientemente valorada, y que resolvió muchos problemas sociales en su tiempo.

En el campo de lo que hoy llamaríamos *Ingeniería Geotécnica*, no podemos olvidar que don Lucas fue el autor del proyecto del Ferrocarril de La Robla a Bilbao, que impulsaría de forma decisiva las cuencas carboníferas leonesas y palentinas. En él tuvo que evaluar geotécnicamente el trazado. También estudió los terrenos para el pantano de Alhama de Almería, en 1906.

Difícilmente la cadena sinérgica Geología Básica - Geología Aplicada - Ingeniería Geológica habrá hallado un exponente más cualificado en nuestro país. Mallada es en esto un ejemplo excelente de lo que ha sido una constante en la historia del Servicio Geológico-Minero español: la convivencia sinérgica y complementaria de las culturas científica y técnica.

MALLADA, GEOGRAFO Y URBANISTA

El genio polifacético de Mallada realizó también algunas aportaciones de interés en otros campos.

Las Memorias provinciales para el Mapa de 1889 com-

prenden siempre un estudio físico amplio en el cual se describen y analizan los aspectos físico-geográficos y geográfico-económicos. En este sentido, fueron ya, desde sus comienzos, elemento básico de referencia para los estudios geográficos. La realización del Mapa de 1889 fue también una obra colectiva de descubrimiento geográfico sistemático de España, una aspiración hondamente sentida por los ilustrados del XVIII.

Mallada, con su talento para la síntesis, va, sin embargo, más allá. Su preocupación por el «problema de España» encuentra, en los años pasados por razones de trabajo en la España profunda, a la cual no llega a menudo el ferrocarril, motivos de reflexión abundantes. Su formación científica y tecnológica le orienta a buscar explicaciones científicas materiales y concretas a la pobreza y el atraso en que viven gran parte de los campesinos, con una óptica un tanto determinista acorde con las concepciones geográficas en boga al estilo de las explicaciones del alemán Ratzel, contemporáneo de Mallada, en contraste con la búsqueda de explicaciones morales o psicológicas que casi veinte años más tarde emprenderá la Generación de 1898. Es así como prepara «*Causas físicas y naturales de la pobreza de nuestro suelo*», conferencia pronunciada en la Sociedad Geográfica en torno al problema de la emigración (que supondría la salida a ultramar de casi tres millones de españoles hasta 1914), y publicada también en el Boletín de la Institución Libre de Enseñanza. Mallada, lúcidamente, pone el dedo en la llaga identificando los factores físicos que limitan la productividad agraria de nuestro suelo y son causa de la emigración: la escasez, irregularidad y mala distribución geográfica de las lluvias, las heladas tardías, fruto de la altitud de la Meseta, y la erosión del suelo producida por la agresividad climática y la deforestación para roturación o pastos, fruto, a su vez, de la baja productividad agraria y el aumento de población. Esta contribución de Mallada sería incorporada por los regeneracionistas y los pensadores económicos y geógrafos posteriores.

La preocupación cívica de Mallada le llevó también a proponer una nueva División Territorial de la Nación, agrupando provincias con el objetivo de economizar recursos a la Hacienda Pública, siempre en permanentes dificultades, y con una visión descentralizadora. Asimismo, diseñó y publicó soluciones bien argumentadas para el casco viejo de Madrid y una Gran Vía barata, con la idea de aminorar los problemas urbanísticos que ya se planteaban a fines de los 80 del siglo pasado, ideas que no fueron tenidas en cuenta por el Ayuntamiento. Mallada, con su tenacidad, volvió a la carga varias veces para exponer lo que pensaba. En esta labor fue precedido por el ilustre ingeniero de Caminos Ildefonso Cerdá, autor del Plan de Barcelona.

EL SIGNIFICADO CIENTIFICO, TECNOLÓGICO Y HUMANO DE MALLADA

Llegados a este punto del camino, es necesario realizar un alto para, con una visión panorámica, pasar de los hechos a los valores y valorar las aportaciones de Ma-

llada a la Geología Básica y Aplicada, la Ingeniería Geológica y la Geografía.

Pienso que la aportación fundamental de Mallada estribó en su *monumental capacidad de síntesis*, apoyada en su laboriosidad, aún más meritoria, por su salud enfermiza. Mallada organiza el saber de su tiempo en Ciencias Geológicas como la Estratigrafía o la Paleontología, en la Geología e Ingeniería de Yacimientos Mineros y en la Historia Geológica de España. Esta misma capacidad de síntesis es la que aparece también en su contribución a la Geografía de España en las «*Causas físicas y naturales de la pobreza de nuestro suelo*», que incorporaría como capítulo en «*Los males de la Patria*». Mallada, y él lo sabe, como pone de manifiesto su discurso de ingreso en la Real Academia de Ciencias, desempeñó el papel de *arquitecto organizador del saber acumulado* por el trabajo de los ingenieros geólogos y naturalistas del siglo XIX. Nadie, quizá mejor que él, en su triple condición de ingeniero, científico y regeneracionista para cerrar esta etapa en que España, físicamente, como territorio, es traída por primera vez al ser científico de la mano de la razón e incorporada así a la corriente del Progreso, que reclama simultáneamente aplicaciones prácticas, tecnológicas, que mejoren la vida del pueblo.

Junto a esta labor estuvo la concreta, plasmada en estudios mineros y de aguas subterráneas o en Mapas y Memorias provinciales que aún hoy se releen con provecho.

Todas estas valiosas aportaciones en su tiempo, sin embargo, son hoy aparentemente hechos del pasado, con un valor limitado en el presente ante el impetuoso avance del conocimiento en el siglo XX. ¿Qué valor puede tener para nosotros hoy recordar a Lucas Mallada, y, en definitiva, a los ingenieros geólogos y naturalistas del siglo XIX?

Después de todo, se dice, el pasado nunca se repite y, por tanto, podría ser una pregunta inútil o de difícil respuesta.

No resaltaría, ante todo, esa *capacidad de síntesis* antes aludida, más necesaria hoy que nunca en un panorama científico y tecnológico caracterizado por la progresiva parcelación del saber y la especialización a ultranza, por el análisis más que la síntesis, y por la pérdida generalizada de la perspectiva en todos los campos del saber.

Por otra parte, la *tenacidad y laboriosidad* de Mallada, acompañadas de su apertura interdisciplinaria europeísta a nivel científico y tecnológico, son valores que siguen siendo necesarios, al igual que el trabajo codo a codo de científicos e ingenieros. Por último, la *decidida actitud de poner su conocimiento al servicio del progreso de España*, aunados a su talante educador regeneracionista, que no rehúye la difusión de sus conocimientos en conferencias públicas o periódicos, en agudo contraste con actitudes cerradas a la difusión del saber de corte medieval, aún presentes en algún sector científico y académico que olvida su deuda con la Sociedad. *Mallada aún así las facetas científico-técnica y humanista*. Esta actitud creo sigue teniendo vigencia, en la óptica de superar lo que Edgard Snow llamó el problema de las dos culturas.

Mallada, como dijo su biógrafo Eduardo Alastrué, tuvo, ante todo, vida fecunda, productiva, y, como diría Goethe,

fue un hombre, es decir, un combatiente. Un combatiente contra la ignorancia y el atraso, una actitud vital que está en el origen de la Ciencia y la Civilización occidental y que es de desear no llegue a extinguirse.

REFERENCIAS SUCINTAS

ACADEMIA DE CIENCIAS EXACTAS, FISICAS Y NATURALES (1990): *Historia de la Geología en España*. Varios autores. Madrid. Consultar especialmente la contribución de JIMENEZ SALAS, J. A.

ALASTRUE, E. (1983): *La vida fecunda de don Lucas Mallada*. Asociación Nacional de Ingenieros de Minas. Madrid.

ALZUGARAY, J. A. (1989): *Ingenieros Egregios Españoles*. Encuentro Ediciones. Madrid.

CORTAZAR, D. (1921): *Necrología de don Lucas Mallada*. Boletín del Instituto Geológico, t. XLII. Madrid.

FURON, R. (1988): *La Geologie*. In: *La Science Contemporaine. Le XIX siècle*. Presses Universitaires de France. París.

LUCAS MALLADA, ESCRITOR REGENERACIONISTA

Por Javier Tusell Gómez

CATEDRÁTICO DE HISTORIA CONTEMPORÁNEA

En el momento actual cada vez son más numerosos los historiadores que conceden la máxima importancia al término «regeneracionismo» para explicar el ambiente cultural, político y moral colectivo de los españoles durante una amplia etapa de la época contemporánea. De acuerdo con esta interpretación el regeneracionismo no sería sólo una escuela de pensamiento, ni tampoco quedaría reflejado en una serie de escritos, más o menos acertados en sus planteamientos y en sus propuestas, sino más bien toda una etapa, muy amplia, con unas características muy marcadas y con un espíritu del tiempo tan acusado que por ello mismo resulta incluso incomprensible desde una óptica actual. Por eso, sólo en una definición muy estricta se puede reducir el regeneracionismo a la obra de una serie de escritores que habrían sido los precursores de la llamada generación del 98.

Hay que tener en cuenta, ante todo, que el regeneracionismo corresponde a un arco cronológico bastante más amplio de lo que se suele decir. Los primeros libros de escritores habitualmente identificados con el regeneracionismo son muy anteriores al 98: los de Almirall o Mallada se sitúan en los años finales de la década de los ochenta y comienzos de los noventa. Por supuesto, el 98 produjo toda una eclosión de literatura regeneracionista que duró toda la primera década del siglo XX, pero, además, estuvieron en el poder dos políticos, Silvela y Maura, que son habitualmente identificados con el como rea-

INSTITUTO TECNOLÓGICO GEOMINERO DE ESPAÑA (1989): *Primer Centenario del Mapa Geológico de España*. Madrid.

LOPEZ DE AZCONA, J. M., y HERNANDEZ SAMPELAYO, J. (1974): *La Geología y Minería españolas. Notas históricas*. ITGE. Madrid.

MALLADA, L. (1890): *Los males de la Patria*. Edic. en 1969 en Alianza Editorial. Madrid.

MEYER-ABICH, A. (1967): *Alexander von Humboldt*. Rowohlt Taschenbusch Verlag, GmbH, Hamburgo. Trad. en Salvat, 1988.

PRADOS DE LA ESCOSURA, L. (1985): *Las relaciones reales de intercambio entre España y Gran Bretaña durante los siglos XVIII y XIX*. In: *La Nueva Historia Económica de España*. Martín Aceña, P., y Prados de la Escosura, L. Edit. Tecnos. Madrid.

SAENZ RIDRUEJO, F.: *Los Ingenieros de Caminos de la Generación del 98*. Cuardenos de «Cauce 2000», núm. 14. Col. de Ingenieros de Caminos. Madrid.

lidad política. La obra de los escritores regeneracionistas, además, no se agotó en esos momentos, sino que algunos de ellos, como Julio Senador, vio aparecer su producción pasados bastantes años. El fenómeno regeneracionista, entonces, perduraba sobre todo como reflejo influyente en algunos de los escritores más conocidos de la época. Ortega y Gasset, en alguna ocasión, no dudó en pronunciarse en tono displicente sobre Costa, el patriarca del regeneracionismo, al describirle como un búfalo herido que gemía herido, en el barro de los males nacionales, pero siempre afirmó que era él quien más vibraciones de fervor patriótico, alcanzó en la España del cambio de siglo. Pero, sobre todo, en los años veinte el fenómeno regeneracionista tuvo una expresión política que difícilmente puede ser ignorada. No es posible entender la Dictadura de Primo de Rivera sin tener en cuenta el regeneracionismo: es él quien explica esa contradicción fundamental entre un dictador que al mismo tiempo dice querer regresar a una situación liberal depurada de sus efectos.

Otro hombre de la generación de Ortega, Azaña, fue todavía más cruel acerca del costismo regeneracionista en su conocida conferencia sobre «Tres generaciones en el Ateneo», pronunciada cuando ya faltaba poco para la proclamación de la República. No obstante, es necesario tener en cuenta también que una parte considerable del programa llevado a cabo por la coalición de izquierdas que

el propio Azaña presidió en el período 1931-1933 tenía matices regeneracionistas. Durante la campaña para las elecciones constituyentes de 1931 el futuro Presidente de la República habló de la necesidad de «rasgar» los velos de la España oficial, mostrando la verdadera faz del país. Empleando este lenguaje no hacía otra cosa que incidir en uno de los tópicos más caros del regeneracionismo español.

Por tanto, habría que atribuir al regeneracionismo una cronología muy amplia que pasaría por una etapa de incubación en la última década y media del XIX, una floración ceñida a los años mismos del cambio de siglo y, en fin, una amplia perduración, si no en la publicación de una abundante bibliografía, sí, al menos, en los ámbitos sociales y políticos. Durante ella el ambiente impregnado de regeneracionismo constituye una faceta de primera importancia para llegar a entender las realidades culturales o políticas del momento. En suma, de acuerdo con la interpretación realizada por Carlos Seco Serrano, el regeneracionismo resultaría ser más que nada toda una época de la Historia española. El reinado de Alfonso XIII, por ejemplo, no puede ser entendido sin tener en cuenta esa realidad del regeneracionismo. No tiene, por tanto, nada de extraño que un Lucas Mallada dirigiera al monarca unas cartas destinadas a resolver los males de la Patria, la que fue su última obra política; de hecho, Ortega también le dedicó más de un artículo con semejante propósito.

Con respecto al contenido del regeneracionismo, entendido en sentido estricto y sin, por tanto, hacer mención de toda la época que se cubre con esta denominación, lo primero que es preciso advertir es que resulta difícil dar de él algo parecido a una definición con perfiles precisos. Hay que tener en cuenta que el regeneracionismo no puede desvincularse del final de siglo, que produjo una especie de inquietud y malestar generalizados en la totalidad del mundo europeo, especialmente perceptible en países de nuestro mismo entorno cultural, como Francia, Italia y Portugal. El tópico de la «decadencia» estuvo generalizado en todos estos países, pero lo que resulta mucho más difícil de perfilar es, a partir de este vago sentimiento, todo un elenco doctrinal. Enrique Tierno Galván, en su conocido libro sobre «Costa y el regeneracionismo», llega en un momento de irritación, muy característico de quien era hombre amante del orden y de la precisión, a afirmar que es difícil explicar las tesis de Joaquín Costa porque, en realidad, carecía de un pensamiento sistemático. Siendo muy estricto, quizá se pueda suscribir una afirmación como esa, y no sólo respecto a Costa, sino también del resto de los regeneracionistas; por ello he empleado, con plena conciencia, los términos «ambiente regeneracionista», y no he mencionado la existencia de una doctrina cerrada. El propio Azorín, un admirador de nuestro autor, al referirse al libro de Mallada, decía que fue «el más representativo de un momento», estableciéndose esa conexión con el peculiar ambiente en que apareció más que con un elenco doctrinal concreto.

Pero si a los regeneracionistas no cabe atribuirles propiamente una doctrina, sí que hay que reconocer que exhibieron un lenguaje encendido sobre realidades de la vida española, e hicieron de ella un diagnóstico que tuvo una extremada relevancia desde el punto de vista histórico.

Más que de una filosofía política con voluntad de permanencia, se trataba de incidir sobre unos puntos cruciales de la vida española, los «males de la patria», en expresión de Mallada, y de hacerlo con el propósito de rebelarse contra ellos y de darles solución.

Los escritores regeneracionistas responden a trayectorias muy diversas. Los hubo que tuvieron una actividad política circunstancial, como Costa, y quienes permanecieron en la vida pública durante la mayor parte de su vida en campos políticos distintos, como Almirall, Silió, Sánchez de Toca o Alba. Otros fueron auténticas glorias literarias como Ganivet o, en otro nivel, el del periodismo, Morote, y los hubo que tuvieron un impacto sólo circunstancial porque su dedicación a los problemas de la vida pública no pasó de eso, como es el caso de Mallada, Isern o Macías Picavea. Alguno de ellos, como Senador, Almirall o Costa, han servido de apoyatura, más o menos justificada, para movimientos regionalistas posteriores. Otros permanecen olvidados, e incluso parece que ese olvido pueda estar justificado.

Pero esa pluralidad de trayectorias, de calidades y de adscripciones políticas, sin embargo, admite coincidencias que empiezan por ser biográficas y concluyen por resultar de talante. Es significativo que en varios de los escritores regeneracionistas se dé la coincidencia entre la formación científica, la pluralidad de intereses intelectuales y la enorme capacidad de trabajo, esos rasgos resultan coincidentes en Costa y Mallada, por ejemplo. El regeneracionista se nos presenta como un esforzado científico, amante del trabajo en un país caracterizado por la desidia, la pereza y la incultura. De ahí la incomprensión en que vive y que a veces se ve multiplicada por la tragedia personal, tan bien descrita por Cheyne para el caso de Costa. A su vez, esa realidad de ser la excepción obliga al lenguaje detonante y agresivo. Costa, por ejemplo, no dudó en asegurar que España era un país de mujeres (no debía ser muy feminista el polígrafo oscense), para arrepentirse inmediatamente y asegurar que lo era de eunucos. Lenguaje enfebrecido y sin paliativos como el suyo, leído en el momento actual, puede rozar la desmesura. En su misma época ya Unamuno dijo que a los regeneracionistas les perdía el exceso apocalíptico en su literatura. Por supuesto, hay otro aspecto de este género de literatura que puede considerarse también efímero. Vinculados con el positivismo cientifista, muchos de los escritores regeneracionistas daban por adquiridas verdades que hoy nos resultarían más que discutibles. Cuando, por ejemplo, Santiago Alba se refiere a la superioridad racial de los anglosajones o Almirall propugna para España la hegemonía de una supuesta raza nordoriental sobre la central, yerran, por supuesto, pero están siendo, además, la expresión de un momento en que ese racismo peculiar era considerado como sólida doctrina científica. Lo mismo cabe decir, por ejemplo, de la supuesta predeterminación de ciertos rasgos nacionales que derivarían de factores geográficos, por ejemplo.

Nadie discute de la literatura regeneracionista la pasión patriótica que la justifica y la voluntad de poner en cuestión todo en la vida pública nacional. La imagen que estos escritores dan de la política, las elecciones, los partidos, la inmoralidad pública y la centralización administrativa

puede tener esos juicios es que en otras latitudes se daban fenómenos semejantes y que, además, sólo con el transcurso del tiempo se podrían solventar problemas de modernización política como los citados.

Lo que resulta, en cambio, más criticable es la solución que solieron dar los escritores regeneracionistas. Muchos de ellos coincidieron en pedir «un hombre» (como Macías Picavea), «un cirujano de hierro» (en el caso de Costa) o «una dictadura político-administrativa», de acuerdo con Mallada. Esta apelación a una persona o a un régimen de excepcionalidad, sin embargo, ha solido ser mal entendida. El propio Tierno Galván colaboró a ello al ver en los regeneracionistas los precursores del fascismo.

Pero ese juicio sencillamente no resulta correcto. En todos los regeneracionistas había una voluntad de ruptura con la realidad política española, considerada como abominable y un deseo de hacerlo de modo irreversible y taxativo. Sin embargo, esto no indica que pretendieran sustituir de manera radical la legalidad liberal, heredada de una tradición intelectual sólidamente asentada en nuestro país, por una nueva que convirtiera a la dictadura en algo permanente. Buena parte —la mayoría— de los escritores regeneracionistas procedían de los medios liberales más conspicuos de su época. Almirall, Macías Picavea o Costa, como el mismo Mallada, tuvieron contactos con los medios republicanos. Algunos de ellos, como los citados Costa o Mallada, escribieron en medios relacionados con el krausismo o con la Institución Libre de Enseñanza. Su visión sobre la necesidad de una Dictadura temporal hoy nos puede parecer impensable o incoherente. Así la juzgaron, por ejemplo, dos de los pensadores más conocidos e importantes de la generación posterior: un Ortega y Gasset cuando recomendó «perder la esperanza en el genio» o un Azaña que denunció el «pesimismo radical» de unos regeneracionistas que no parecían confiar en la capacidad de los españoles para el ejercicio de la democracia. Pero en la época esta idea estuvo muy extendida. Resumiéndola muy brevemente, consistiría en pensar que una acción decidida, pero muy poco duradera, sería capaz de solucionar los males que padecía el liberalismo y con ello volver inmediatamente a una situación liberal purgada de sus inconvenientes. Los regeneracionistas, en efecto, juzgan que son patentes los males del liberalismo, pero éste debe ser regenerado, no destruido. La dictadura que ellos tienen en la mente no es una dictadura permanente, sino la clásica, la de los latinos, temporal y basada en circunstancias de excepción. En el fondo su pesimismo radica precisamente en la nostalgia liberal, es decir, en la sensación de que sería lo mejor que el liberalismo no necesitara de esa ortopedia de un régimen que, aunque temporalmente, dejaría bajo paréntesis esas instituciones. Por otro lado, las propias soluciones que para el período temporal de dictadura propugnaban los regeneracionistas pueden tener mucho de arbitrista de ingenuo o de simplificador; lo que no puede achacárseles es que sean antiliberales. Estimular la voluntad autonómica de la vida local, introducir reformas sociales o excitar a la vitalidad social a la «masa neutra» de Maura o la «masa inerte» de Mallada no tiene nada de antiliberal, sino todo de lo exactamente contrario. Por supuesto, este género de críticas en contra de la práctica concreta del liberalismo en España fueron luego utilizadas como argumentos

de prestigio en contra de su esencia. Pero eso no fue ya obra de los escritores regeneracionistas. Por otro lado, éstos no siempre se pronunciaron a favor de una solución tan drástica como una dictadura de carácter temporal: sólo en los años de fin de siglo hacen declaraciones de este tipo, mientras que antes y después de este momento las matizaban mucho o desdibujaban unos contornos tan duros.

A partir de estas premisas es posible entender la significación de Lucas Mallada como escritor regeneracionista. Su obra política se desenvuelve en tres momentos sucesivos: el comienzo de la década de los noventa, el cambio de siglo y la época posterior a él en que escribe sus «Cartas aragonesas» dedicadas a Alfonso XIII.

En el primer momento, ante todo, lo que Mallada hace es criticar desde un punto de vista moral la realidad de las clases dirigentes en la vida pública de la época de la Restauración. Mallada era un científico, y ello explica que «Los males de la patria» tenga ante todo una primera parte en la que, con argumentos de este tipo, se critica el género, cuyos orígenes se remontan a la antigüedad, de las «Laudes Hispaniae». En páginas posteriores, respecto de la crítica a la España de la Restauración, el contenido de su libro es muy semejante a la que hizo cuatro años antes Valentí Almirall, nacido en el mismo año que él, aunque muerto mucho antes. El lenguaje es idéntico en exacerbada irritación: si Mallada sugiriera que España es un «presidio suelto», Almirall aseguró que España sólo en dos cosas iba a la cabeza de Europa, en deuda pública y en número de generales. La inmoralidad pública, la impunidad de los delitos, el caciquismo en la vida local, la irresponsabilidad e ignorancia de los profesionales de la política son criticados con idéntica indignación por ambos escritores regeneracionistas. En cuanto a las soluciones, punto éste el más débil siempre en los escritores regeneracionistas, Mallada piensa, sobre todo, en reformas sociales, desde las Cajas de Ahorros hasta la instrucción popular; Almirall insiste en la destrucción del centralismo uniformado, como presagiando su posterior evolución hacia el catalanismo. También en Lucas Mallada hay una más patética alusión a la pasividad de la masa neutra española.

El segundo momento de Mallada como escritor regeneracionista es aquel en que ante la inminencia del desastre colonial presagia ya una «futura revolución española» que considera inevitable, y a la que apela. Es el preciso momento finisecular en el que se perciben en España los ecos que ha tenido en Francia el general Boulanger; son los años, en fin, en que habrá unos oscuros intentos de llegar a un régimen autoritario auspiciado por personas alejadas de los medios políticos oficiales (como el Cardenal Cascajares o el general Polavieja), que quedarán en nada, o bien perfectamente integrados en los partidos políticos de turno. Como se trata también de los momentos en que es más patente la presión de los acontecimientos, en especial del desastre del 98, no es nada extraño que Mallada apele ahora a la necesidad de una «dictadura político-administrativa». Esta misma denominación resulta muy característica, pues no está tan lejana del lenguaje de un Costa o de un Maura; tampoco lo está del que luego utilizó el general Primo de Rivera.

El tercer momento en la obra de Mallada como escritor regeneracionista es aquel en que redacta sus «Cartas aragonesas» (1905). No es ya un lenguaje revolucionario el suyo, ni hace tampoco alusión a la necesidad de una dictadura. Tampoco parece ya tan urgente la necesidad de un cambio, e incluso sabe reconocer las modificaciones que, en un sentido modernizador, se han dado en los últimos tiempos. Como tantos otros, desde Costa a Ortega, parece confiar en la virtud regeneracionista de un monarca cuyo diario juvenil utiliza un lenguaje muy semejante al de este género de escritores. Ha desaparecido, por otro lado, a estas alturas, la efervescencia política y social que hizo aparecer en los primeros años del siglo XX iniciativas políticas como la Unión Nacional y, además, el regeneracionismo está ya instalado en el poder, principalmente gracias a los conservadores. Era el momento de proponer opciones concretas de Gobierno, como aquellas que dos años después trató Maura de llevar a cabo con la Ley de Administración Local, por ejemplo. Pero el texto de Mallada no llegó a desarrollar un conjunto articulado de propuestas, sino que se quedó en la crítica a la situación recibida, algo muy habitual en los escritores de sus características.

Concluir con una frase como ésta podría tener el inconveniente de minusvalorar toda la literatura regeneracionista. Siempre sorprende en ella la distancia entre un lenguaje a menudo apocalíptico y la carencia de soluciones, cuando no la ingenuidad de las mismas. Un escritor perteneciente a este mismo modo literario, Vital Fité, lanza abrumadores diatribas acerca de la España de la Restauración... para concluir en la necesidad de crear una lotería naval con la que financiar la creación de una escuadra. Sin embargo, muchas de las medidas propuestas por los escritores regeneracionistas acabaron llevándose a cabo, y eso mismo les hace relevantes. Y, sobre todo, lo que siempre quedará de ellos como mensaje moral no es tanto sus propuestas concretas como su fervor patriótico en la denuncia de situaciones en que la inconsciencia de la clase dirigente y la apatía de la sociedad se alían para impedir la modernización de un país necesitado de ella. Eso no ha sido precisamente infrecuente en la Historia reciente de España; más bien se puede decir lo exactamente contrario: desmovilización social y tendencia de la clase política a vivir encerrada en sí misma, al margen de las exigencias nacionales, empleando un lenguaje de reformas que es incapaz de traducir en la realidad, constituyen tendencias permanentes (uno se atrevería a decir incluso tradiciones) de la vida pública española. Eso, en definitiva, explica que el regeneracionismo, que a veces

ha podido ser presentado como una tentación, tenga también la vertiente de convertirse en una obligación periódica.

REFERENCIAS SUCINTAS

ALASTRUE y CASTILLO, E. (1983): *La vida fecunda de don Lucas Mallada*. Madrid, 110 pp.

ALMIRALL, V. (1972): *España tal como es. La España de la restauración*. Prólogo de Antoni Jutgar. Madrid. Seminarios y Ediciones, 189 pp.

CHEYNE, G. J. G. (1972): *A bibliographical study of the writings of Joaquín Costa (1846-1911)*. London. Tamesis Books Limited, 189 pp.

CHEYNE, G. J. G. (1972): *Joaquín Costa, el gran desconocido. Esbozo biográfico*. Prólogo de Josep Fontana. Barcelona, Ariel, 266 pp.

CHEYNE, G. J. G. (1979): *Confidencias políticas y personales. Epistolario Joaquín Costa-Manuel Bescós, 1899-1910*. Zaragoza. Institución Fernando el Católico, 214 pp.

FITE, V. (1989): *Las desdichas de la Patria*. Prólogo de Javier Tusell. Madrid. Fundación del Banco Exterior, 243 pp.

FERNANDEZ CLEMENTE, E. (1989): *Estudios sobre Joaquín Costa*. Zaragoza. Prensas Universitarias, 467 pp.

MACIAS PICAVEA, R. (1972): *El problema nacional. Hechos, causas y remedios*. Introducción, enlaces y notas de Fermín Solana. Madrid. Seminarios y Ediciones, 181 pp.

MALLADA, L. (1969): *Los males de la Patria*. Prólogo de Francisco J. Flores Arroyuelos. Madrid. Alianza Editorial, 232 pp.

MARTIN RETORTILLO, C. (1961): *Joaquín Costa*. Barcelona, Aedos, 256 pp.

MAURICE, J., y SERRANO, C. (1977): *J. Costa: Crisis de la Restauración y populismo (1875-1911)*. Madrid. Siglo XXI, 246 pp.

PEREZ DE LA DEHESA, R. (1966): *El pensamiento de Joaquín Costa y su influencia en el 98*. Madrid. Sociedad de Estudios y Publicaciones, 261 pp.

TIERNO GALVAN, E. (1961): *Costa y el regeneracionismo*. Barcelona. Barcelona, 269 pp.

MINERIA E INDUSTRIAS DE LA CONSTRUCCION ANTE EL MERCADO UNICO DE 1993

Por E. GARCIA ALVAREZ

El pasado 17 de julio de 1991 se celebró la clausura del Curso 1990/1991 del Club Español de la Minería. Por tercera vez, el encargado de pronunciar la conferencia-coloquio fue el Director General de Minas y de la Construcción, don Enrique García Alvarez, quien disertó sobre «Minería e industrias de la construcción ante el Mercado Unico de 1993».

Junto al señor García Alvarez, la mesa presidencial estaba formada por el Presidente del Club, don José Rosón Trespalacios; don Emilio Llorente Gómez, Director General del Instituto Tecnológico GeoMinero de España; don Juan Carlos Mampaso Martín-Buitrago, Subdirector General de Industrias de la Construcción; don Fernando Vázquez Guzmán, Subdirector General de Investigación y Régimen Minero; don Pedro Fontanilla Soriano, Presidente de ENADIMSA, y don Francisco Román, Director de la Asociación Española del Plomo.

A los postres del almuerzo, el Presidente del Club Español de la Minería, señor Rosón Trespalacios, pasó revista a todos los actos organizados por el Club durante el curso que ahora se iba a clausurar, anunciando, asimismo, el que se va a celebrar en Oviedo los días 30 de septiembre y 1 de octubre, sobre Promoción industrial.

Ante el próximo curso, el señor Rosón solicitó de los socios y simpatizantes del Club la aportación de ideas y sugerencias para futuros actos. Agradeció la presencia del Invitado de Honor y, cediéndole la palabra, el Director General de Minas y de la Construcción, pronunció la siguiente conferencia:

ANTECEDENTES

Durante los últimos tiempos, y como cualquier otro de los sectores industriales, la minería, así como las industrias productoras de materiales de construcción, han venido singularmente determinadas por la evolución en nuestro entorno económico —cuyo aspecto más significativo lo constituye el proceso creciente de apertura de nuestra economía—. En coherencia con este hecho, el Gobierno ha venido articulando una política industrial que es preciso recapitular como cuestión previa para hablar sobre la minería y las industrias de la construcción ante el Mercado Unico. Política que ha sido expuesta repetidamente en diferentes foros y ocasiones por el propio Ministro de Industria.

Dos fechas constituyen ya un tópico al referirnos a tal proceso: 1 de enero de 1986 y 1 de enero de 1993.

La primera de ellas corresponde a nuestra integración en las Comunidades Europeas, y en la segunda —en coincidencia de fechas con la constitución del Mercado Unico

Europeo— concluirá nuestro **período transitorio de adhesión**. En esta fecha quedará consumado el proceso de liberalización de los intercambios de bienes, servicios y factores productivos entre los países europeos y quedará constituido el Mercado Unico.

Si bien es cierto que 1993 representa un paso decisivo en la integración de España en una economía abierta, es conveniente matizar el significado de esta fecha, pues los cambios no van a representar una ruptura súbita de una economía cerrada a una economía abierta. Es necesario tener en cuenta que el proceso de apertura de nuestra economía viene efectuándose desde 1986; así, en el terreno arancelario ya sólo queda pendiente una reducción en torno al 20 por 100 de los aranceles existentes el año anterior a nuestra integración.

Este proceso integrador ha supuesto un entorno favorable a la mejora de la competitividad que debe ser complementado imprimiendo una adecuada política industrial.

Sobre las cuestiones de política industrial, siempre ha existido una fuerte polémica; desde los que opinan que el exclusivo funcionamiento de los mecanismos de mercado garantizarán una situación óptima de la economía, hasta los que desearían que la política industrial fuese tal que la Administración sustituyese a los propios agentes económicos.

Por el contrario, el Gobierno viene manteniendo la necesidad de una política industrial, tanto a nivel nacional como comunitario, que responda a criterios claros de actuación pero que preserve igualmente la autonomía de decisión de los agentes económicos en una economía de mercado, tal como establece nuestra Constitución. En concreto, la instrumentación de nuestra política industrial ha de ser singularmente respetuosa con las reglas de la competencia y las relativas al otorgamiento de ayudas públicas, que es uno de los aspectos que más importantemente nos afectan.

Por consiguiente, cada marco constitucional en el que se desenvolverá nuestra industria será más abierto y competitivo y la política industrial estará orientada hacia las políticas horizontales (tecnológica, calidad, PYMES) y hacia aquellas políticas sectoriales donde la intervención viene justificada por razones de eficiencia, como es el caso, por ejemplo, de la política energética.

Dentro de este ámbito vamos a referirnos a las actuaciones de política industrial en los campos de la minería y los productos de construcción.

En el campo de la minería no energética, la política minera está orientada en la doble dirección de fomentar la exploración como política típicamente sectorial y el I+D con un carácter más horizontal, dentro de la política in-

dustrial general, así como en concienciar a las altas instancias comunitarias para realizar un serio análisis sobre las posibilidades que ofrecen ciertos países comunitarios, entre ellos España, para desarrollar una minería no energética eficaz, de interés comunitario.

De este subsector merecen destacarse los sulfuros complejos que, a pesar de las duras vicisitudes a las que se están siendo sometidos en la actualidad, constituyen un potencial de recursos metálicos de primer orden, cuya importancia económica y estratégica deberá ser plenamente valorada por Europa. En este campo, la Comisión de I+D para los minerales piríticos ha sido un paso que constituye un nuevo enfoque de colaboración entre empresas y Administración que puede ser una buena referencia para otras iniciativas futuras.

En cuanto a la Piedra Natural, otro de los subsectores destacables en la minería no energética, la diagnosis realizada por el Ministerio de Industria, Comercio y Turismo, concluida recientemente, detecta interesantes oportunidades para su desarrollo, pero también establece un reto al sector de cara al Mercado Unico, debiendo potenciarse la coordinación de esfuerzos comerciales conjuntos, de especificación de productos, de la formación personal y en reducir la excesiva atomización de la oferta.

España tiene como puntos fuertes:

- Primera posición producción mundial de pizarra.
- Segunda posición producción mundial de piedra natural, después de Italia.
- Cantidad, calidad y variedad de materia prima.
- Progresiva organización empresarial del sector (fortalecimiento de asociaciones, creación de la FDP).

Respecto de los productos de construcción, entre los que se incluye la piedra natural, el panorama ante el Mercado Unico del 93 merece también un análisis en el momento actual.

Cada vez que un fabricante desea vender su producto en otro país, tiene que someterlo conforme a las normas industriales o criterios legales vigentes en el mismo, a un proceso de comprobación y certificación. Pues bien, los países de la Comunidad Europea han contraído el compromiso de eliminar estos obstáculos con la perspectiva del gran mercado europeo para 1993.

Normalmente se observan tres tipos de obstáculos técnicos:

- Primero, los causados por las diferentes normas industriales internacionales (DIN en Alemania, NF en Francia, BSI en el Reino Unido, UNE en España) que condicionan la importación, venta o utilización de un producto.
- Segundo, otros obstáculos se derivan de las diferencias entre reglamentaciones nacionales, con fuerza legal. En general, estos criterios tienen como fin la protección de intereses colectivos: salud, seguridad, entorno, etc.
- Y un tercer tipo de obstáculos surge de los procedi-

mientos de comprobación y certificación que aseguran la conformidad de un producto con los criterios nacionales y normas industriales.

De forma general, los obstáculos técnicos al comercio que se traducen en importantes costos directos e indirectos, ya preveían ser eliminados en las disposiciones del Tratado de Roma que instituye la Comunidad Económica Europea. No obstante estas intenciones, la gran cantidad de productos industriales, los diferentes ritmos de confección de normas nacionales y los procesos de armonización de las mismas complicaron enormemente las cosas, con el consiguiente riesgo de verse superados por el progreso tecnológico, cuya velocidad es bien conocida.

En la década de los 80 se plantea, por tanto, un ajuste de criterios con el objetivo de una **política global comunitaria de certificación** como instrumento comercial a partir de 1991.

Esta política favorece que la industria use cada vez más los sistemas de garantía y calidad, quedando la credibilidad del fabricante reforzada y el prestigio del producto asegurado si están certificados por un procedimiento regulado por disposiciones comunes.

Como parte de esta política global europea de certificación surge la Directiva sobre productos de construcción 89/106/CEE, de 21 de diciembre de 1988.

Esta Directiva, relativa a la aproximación de las disposiciones legales reglamentarias y administrativas de los Estados Miembros sobre productos de construcción, establece que dichos Estados considerarán idóneos para el uso a que estén destinados y, por tanto, podrán circular libremente aquellos productos que permitan que las obras en las que sean utilizados satisfagan los «requisitos esenciales» y lleven la «marca» CE.

Estos «requisitos esenciales» son: resistencia mecánica y estabilidad, seguridad en caso de incendios, higiene, salud y medioambiente, seguridad de utilización, protección contra el ruido, ahorro de energía y aislamiento térmico.

La ligazón entre las «**características del producto**» que compondrán la norma armonizada y establecerán la marca CE antes mencionada y los «**requisitos esenciales**» de la obra, es el trabajo que en este momento está elaborándose por distintos representantes designados por los Estados Miembros ante el Comité Permanente de la Construcción, labor que estará concluida dentro de los próximos dos años y que afectará a cada tipo de producto de construcción.

De esta forma quedará articulada la política de aproximación europea para la libre circulación de productos de construcción entre los países miembros de la Comunidad.

En cuanto al carbón, el programa de ajuste actualmente en curso constituye un ejemplo de política sectorial de carácter excepcional y transitoria, que tiene su origen en la falta de adecuación de una parte del sector productor de carbón a las condiciones de competitividad a que obligan; de una parte, las exigencias comunitarias, y, de otra, lo que constituye un imperativo fundamental para la eficiencia del conjunto del sistema productivo español, que

es el lograr una contención de la evolución de los costes de producción de este combustible, pues el exceso de costes se traslada irremisiblemente a otros sectores productivos que han de competir igualmente en el plano exterior.

Por ello, es preciso tomar todas las medidas posibles para que el coste de nuestro carbón sea crecientemente competitivo. En primer lugar, en beneficio de la propia minería para aumentar las posibilidades de autoabastecimiento en condiciones económicas satisfactorias y el mantenimiento del mayor empleo con carácter estable. Fuera de este planteamiento, es difícil encontrar otras alternativas ante la perspectiva de un mercado único consolidado en el futuro.

Dos son los objetivos para el carbón por parte de la Comunidad:

— Promover el uso de este combustible (diversificar y reducir la dependencia del petróleo).

— Mejorar la competitividad de las producciones comunitarias.

El primero de los objetivos tiene que ver con la seguridad de abastecimiento, concepto comunitario que consiste en la posibilidad de asegurar en el futuro la satisfacción de las necesidades básicas de energía, armonizando el uso de los recursos existentes en la CEE, explotados en condiciones económicamente aceptables, con la existencia de fuentes exteriores accesibles y estables.

Respecto a la consecución del segundo objetivo comunitario, es decir, mejorar la competitividad, la Comisión ha empezado a exigir que vayan reduciéndose progresivamente las capacidades de producción menos competitivas. Entiende la Comisión que las ayudas de cualquier clase impiden un abastecimiento económico más favorable y necesario para la consecución de los grandes objetivos sociales de la Comunidad.

Por tanto, nuestra minería del carbón queda enmarcada como una política sectorial donde los conceptos de seguridad de abastecimiento y de mejora de la competitividad son esenciales.

En lo referente a la seguridad de abastecimiento, en un reciente informe de la Comisión se manifiesta que la valoración del carbón comunitario debe integrarse con una prima de seguridad que refleje la consideración razonable de los márgenes que pueden surgir en los mercados internacionales, así como las tendencias de evoluciones a largo plazo.

Ello es tanto más indispensable habida cuenta de la relativa rigidez de las minas como consecuencia de factores técnicos, geológicos y geográficos que a menudo no permiten, al menos para las producciones subterráneas, una adaptación a las fluctuaciones a corto plazo del mercado, tanto en calidad como en costes. En esta idea están orientados los contratos a largo plazo suscritos entre empresas eléctricas y mineras, que garantizan la disponibilidad del carbón nacional necesario para el funcionamiento del parque de centrales térmicas existente.

Y en lo que se refiere a la mejora de la competitividad:

— Desarrollando la minería más competitiva en detrimento de la menos competitiva.

Esta filosofía ha sido la base sobre la que se sustenta el Plan de Reordenación del Sector del Carbón, cuya definición y alcance en el horizonte de 1993 se encuentra en fase muy avanzada. Las medidas establecidas en dicho Plan prevén que las respuestas de las empresas conducirán a una minería competitiva con las hipótesis de los actuales precios de venta. La reducción de las capacidades menos competitivas, junto con la mejora de las que presentan mejores perspectivas de viabilidad, permiten pronosticar una mejora del sector a medio plazo. A su vez una importante parte de la producción subterránea disminuida será sustituida por nueva minería a cielo abierto, reforzando la evolución positiva de reducción de costes medios del sector.

Según las estimaciones actuales la minería subterránea menos competitiva se reduciría en aproximadamente 2,5 millones de toneladas en el cuatrienio 89-93, es decir, aproximadamente un 14 por 100, previéndose una mejora de la productividad media del 16 por 100. Tal como les dije, esta reducción será compensada con los incrementos previstos en la minería más competitiva, lo que redundará en una mejora de los referidos costes medios.

Termino esta exposición de ideas en torno a la posición de nuestra industria minera y de los productos de construcción de cara al Mercado Único de 1993, a la vez que les deseo a todos unas felices vacaciones.

COLOQUIO

Pregunta.—Don Rufino Gea Javaloy, Presidente de la Asociación Española del Plomo, se interesó por tres cuestiones:

- ¿Cuál es la situación actual de la nueva Ley de Bases de la Minería?
- Esta Ley contempla la reordenación del sector minero en las Comunidades Autónomas, pero como éstas ya tienen todas las atribuciones en minería, cada una va por un camino diferente. Así, ¿la Administración va a hacer algo para poner coto a esta situación?
- Hablemos de las actividades de la Dirección General de Minas, como el «SISTEMINER».

Respuesta.—El Director General de Minas y de la Construcción respondió a la primera pregunta señalando que el borrador de la nueva Ley de Bases de la Minería está concluido desde hace tiempo por la Dirección General de Minas. Ahora está en la fase de discusión, fuera del Ministerio: «Está hecho, a falta de algún pequeño perfil; otra cosa serán los matices...».

- La reordenación está dentro de cada Comunidad Autónoma; ellas hacen su propia política minera y su propia ordenación. Nosotros, dijo el señor García Álvarez, hacemos la planificación general: «Ellos el resto.»

El Director General de Minas y de la Construcción calificó la tercera cuestión de «punto clave». Nuestra idea —dijo—

es de promocionarlo al máximo. Otra cosa son las disponibilidades presupuestarias. En otro orden de cosas, la LEIM funciona, tal y como puede decir José Enrique Azcárate, quien, por cierto, pronto se va a dedicar a otras cosas, añadió el señor García Álvarez.

P.—Juan Ignacio Artieda, Presidente de Encasur y Carbuñón, indicó que la Administración debería tener en cuenta a las centrales térmicas ubicadas en la meseta, ya que su producción, unos 4.000 MW, y su consumo, de entre 10.000-11.000 toneladas de carbón, así lo justifica.

Para el señor Artieda, esto demuestra que el carbón nacional todavía es necesario, así como que esta producción se mantenga a base de ir bajando los precios, cerrando minas caras y manteniendo las competitivas.

R.—El Director General de Minas y de la Construcción respondió que, al final, este año ha sido bueno para el carbón, pero el tema del precio es esencial.

La idea es que el famoso precio de referencia se mantenga, aunque en este sentido, el planteamiento de la CE es bastante difuso. Allí barajan conceptos como la seguridad de abastecimiento o costes marginales de los precios fijados en 90 Ecus la tonelada CIF, más transporte.

Creo, dijo el señor García Álvarez, que el precio de referencia del carbón español se va a mantener en valores reales.

Respecto a las térmicas, la minería nacional es vital para ellas. Actualmente tienen dos condiciones: térmico y de transporte.

El primero consiste en que utilizan carbones «de diseño», específicos para las centrales térmicas. Estas no pueden utilizar carbones de importación de bajos contenidos en volátiles y altos contenidos en ceniza.

Así, deben usar un 60-65 por 100 de carbón nacional y el resto de importación. Otro factor determinante es la dureza del mineral, pues, por ejemplo, el procedente de África del Sur es demasiado duro y obtendríamos mucho carbón inquemado.

El otro condicionante es el de la logística del transporte, ya que, cuando hay que movilizar grandes cantidades, es un problema.

De todas formas, señaló el señor García Álvarez, con independencia de razones medioambientales, creo que un 70 por 100 de consumo de carbón nacional en nuestras centrales térmicas, es lo correcto.

P.—Don Ubaldo Usunáriz, Presidente de Confedem, se interesó por los minerales piriticos y por conseguir que Bruselas libere el 15 por 100 del Programa FEDER, a fin de que se dedique a proyectos de investigación minera.

R.—El Director General de Minas y de la Construcción manifestó que, ante la próxima presidencia portuguesa en la CE, habría que interesar a éstos en los sulfuros complejos, ya que el I+D aplicado a la Faja Piritica es importante.

Actualmente, dijo el señor García Álvarez, hay muchas empresas interesadas en investigar esta zona por sus grandes posibilidades.

Respecto a Bruselas, este es un punto muy duro: «Aquí sí que hay que ser inasequible al desaliento, ya que la

conciencia minera comunitaria, o no existe, o existe muy poco».

Si bien la exploración minera presenta alto riesgo económico, es interesante saber que un país de la CE posee recursos. Los estados mineros de la CE como Portugal, España o Grecia, sí creen en la exploración, pero los poderosos, como Francia o la República Federal de Alemania, no tienen el menor interés.

De todas formas, señaló el señor García Álvarez, la próxima presidencia comunitaria de Portugal quizá dé un impulso a la minería, tal y como lo hizo España en su momento.

P.—Don Francisco Román, Director de la Asociación Española del Plomo, preguntó: ¿Qué pasa en Cartagena? Las fundiciones de plomo y cinc están en el alero, y creo que esto es importante para la minería, añadió.

R.—«Te refieres a Portman Golf», dijo el señor García Álvarez; allí actualmente existe un «impasse» que la Comunidad Murciana ha de resolver: «Si promocionar la minería o dedicarse a otras actividades.»

Se ha producido un contencioso con un pueblo que tiene a toda la explotación paralizada, y que continuarla significaría trasladar a todo un pueblo. Sin embargo, la fundición está allí y podría utilizar otros concentrados para continuar en funcionamiento.

P.—Don Julián García San Miguel, Consejero-Delegado de Cavosa, indicó que el mercado del carbón no es libre, ya que puede haber problemas de competencia y, hoy por hoy, el precio se ha degradado y los costes internos han crecido. Pienso que la Administración tiene que adoptar una postura realista, pues las reservas decrecen y empresas con reservas apreciables se descapitalizan. Entonces, ¿cuándo la Administración va a contemplar subidas de precio realistas? ¿Se piensa realmente en subir el precio? Por otro lado, hay empresas productoras de carbón que financian el mineral de las empresas eléctricas al pagar éstas a 90 días. ¿Se va a terminar esta situación con la llegada del Mercado Único el 1 de enero de 1993?

R.—El señor García Álvarez señaló que el Nuevo Sistema de Contratación de Carbón Termoeléctrico (NSCCT) es quien fija el precio del carbón a largo plazo, no la Administración, como algunos piensan. Se pretende, sí, que la Administración consiga que el valor máximo del carbón sea el precio de referencia y que éste se mantenga en valores reales.

El reto es mantener la minería competitiva, pero que quede claro que la Administración no marca los precios (aunque parezca lo contrario); hay un contrato y una fórmula con ventajas e inconvenientes.

Asimismo, indicó el Director General de Minas y de la Construcción, el pago a 90 días es un elemento de precio. Al contado pagan menos y a 90 días pagan más. En otros países de la CE pagan a boca mina y al contado. Pero, por otro lado, a mí no me importa cómo se pague, sino los costes medios. No hablo del carbón sometido a contrato-programa: «Hay que intentar reducir los costes de nuestro carbón...».

Finalmente, el Presidente del Club, señor Rosón, luego de agradecer la asistencia al acto y la participación en el coloquio, deseó buenas vacaciones a todos, declarando clausurado así el Curso 1990-1991.

Noticias

IV ENCUENTRO DE CAMPO SOBRE GEOMORFOLOGIA, CUATERNARIO Y NEOTECTONICA (ALICANTE, 1991)

Durante los días 15 al 19 de julio de 1991 se ha celebrado en la provincia de Alicante (extremo oriental peninsular de la Cordillera Bética) el IV Encuentro de Campo sobre Geomorfología, Cuaternario y Neotectónica. Una treintena de participantes, de carácter pluridisciplinar, ha recorrido la mayor parte de la provincia en cinco itinerarios realizados a lo largo de las cinco jornadas del Encuentro. Este, auspiciado por la Sociedad Española de Geomorfología, ha sido patrocinado fundamentalmente por el Instituto Tecnológico GeoMinero de España, y organizado conjuntamente por el Departamento de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales (División de Geología) de la Universidad de Alicante y el propio ITGE. Los temas debatidos y los lugares visitados han sido los siguientes:

- El día 15 se dedicó al análisis de la Cuenca del Segura, centrando las observaciones principalmente en sus rasgos neotectónicos. Se recorrió tanto el margen meridional de la alineación estructural de Crevillente-Alicante, como los afloramientos del Mioceno Superior y Plioceno del sector Hurchillo - Guardamar - San Miguel de Salinas. De otra parte se visitaron las Sierras de Orihuela y Callosa, como actuales relieves subsidentes relacionados con el hundimiento del antiguo «Macizo del Segura».
- El día 16 fue ocupado en reconocer la principal estructura de la región: el Accidente Cádiz-Alicante, con los registros de actividad reciente asociados y su expresión morfológica. Además, se completó el recorrido con otros aspectos, tales como los sistemas de fracturación

al oeste de la línea del Vinalopó, los rasgos morfológicos de las áreas endorreicas de Salinas, los movimientos diapíricos del sector de Pinoso y las singulares acumulaciones eólicas actuales de Petrel.

- El día 17 se recorrieron los relieves prebéticos situados al norte de la provincia, en concreto entre las localidades de Altea y Alcoy. Este sector nos fue particularmente apropiado para discutir en torno a las relaciones entre la neotectónica y el dispositivo actual del relieve, dado que importantes sistemas de fracturación controlan bordes de depresiones y de alineaciones montañosas, como, por ejemplo, pudo observarse en la Cuenca de Alcoy y en las Sierras del Menechaor y Mariola.
- El día 18 se dedicó íntegramente al litoral, tanto desde el punto de vista de la distribución y cronología de las sucesiones de playas cuaternarias, como de las deformaciones registradas en ellas. Además, se reconocieron los depósitos eólicos y dunas de los Arenales del Sol, como también los sectores subsidentes del Hondo de Elche y Salinas de Santa Pola.
- El día 19 se terminó el Encuentro tras visitar el arribe de Santa Pola y la Isla de Nueva Tabarca. En esta última se reconocieron los depósitos del Mioceno Superior y las playas tirrenienses, centrando la atención tanto en su significado paleogeográfico como de la evolución reciente del sector.

IV CONGRESO DE GEOQUIMICA DE ESPAÑA

Organizado por el Colegio Oficial de Químicos, ANQUE, Consejo Superior de Colegios de Ingenieros de Minas y Colegio Oficial de Geólogos se ha celebrado en Soria, del 8 al 13 de septiembre de 1991, el IV Congreso de Geoquímica de España.

Las sesiones científicas desarrolladas en jornadas de mañana y tarde en el marco del Aula Magna Tirso de Molina, de la citada ciudad, comprendieron dos conferencias plenarias pronunciadas por los profesores invitados G. C. Amstutz, de la Universidad de Heidelberg, y G. R. Dmitrievich, del Instituto Vernadsky, de Moscú, y ochenta y cuatro comunicaciones distribuidas en las once secciones en que se dividió el Congreso.

Por el número de trabajos presentados destacaron las Secciones de Geoquímica de los minerales y procesos geológicos e Hidrogeoquímica, con quince comunicaciones cada una.

La participación de personal del ITGE ha sido significativa. Dieciocho investigadores han asistido, contribuyendo con las siguientes catorce ponencias al mayor éxito del Encuentro:

- Estudio Geoquímico de efluentes salinas de Peralta (Navarra, España).
- Aportación de dataciones Rb-Sr al estudio del batolito de Los Pedroches en la transversal de Pozoblanco.

- Composición isotópica del oxígeno de los basaltos alcalinos de la Garrotxa, región volcánica del NE de España.
- Aplicación de las técnicas de estudentización y agrupamiento de individuos a la detección de valores anómalos en el estudio de la hidroquímica de las aguas subterráneas del subsistema 71-1, «Baix Fluvia-Muga».
- Aplicación del análisis de componentes principales a la caracterización hidrogeoquímica de las aguas subterráneas del sistema acuífero 61, «Cardo-Vandellós».
- El análisis discriminante aplicado al reconocimiento de patrones en las variables de calidad del agua subterránea. Aplicación al acuífero del Maresme (Subsistema 71/5).
- Control de la zona no saturada para calcular la infiltración en la isla del Hierro (Canarias).
- Estudio fisicoquímico y análisis multivariante de aguas de manantial de la provincia de Málaga (España).

- Calidad Hidroquímica de los aluviales del río Ebro y afluentes en la zona comprendida entre Baños de Ebro y Alfaro (La Rioja).
- Aplicación de la espectrometría de emisión con fuente de excitación plasma acoplado por inducción al análisis geoquímico.
- Evaluación por ICP de la técnica de Microondas para la puesta en solución de suelos.
- Determinación de lantánidos y otros elementos poco frecuentes en fergusonitas por microsonda electrónica.
- Determinación rápida de oro por microextracción y AA. Optimización del disolvente.

Las conclusiones del Congreso fueron expuestas por don Francisco de Pedro Herrera ante las autoridades asistentes a la Sesión de Clausura, que fue presidida por el Gobernador Civil de Soria.

II MASTER EN TECNOLOGIA HIDROGEOLOGICA

A celebrar en Madrid, del 13 de enero al 13 de noviembre de 1992, y organizado por el Instituto Tecnológico GeoMinero de España y la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas.

GICA APLICADA, TECNOLOGIA NUMERICA E INFORMATICA EN HIDROGEOLOGIA o TECNOLOGIAS ESPECIALES EN HIDROGEOLOGIA.

La culminación de las tres titulaciones da acceso a la de MASTER EN TECNOLOGIA HIDROGEOLOGICA.

PRESENTACION

A lo largo de sus veinticuatro años de dilatada experiencia, el Curso Internacional de Hidrogeología Aplicada se situó en primera línea, en la formación de especialistas en el campo de las aguas subterráneas, y en el reciclado y formación permanente de estos profesionales.

Ahora, con el objeto de formar hidrogeólogos para el siglo XXI, y con el reto de contribuir en la tarea común del V Centenario, se ha dado un decisivo paso adelante, con la creación de tres cursos de ESPECIALIDAD que, juntos, conforman la titulación de MASTER.

Las titulaciones de Especialista y de MASTER lo son por la UNIVERSIDAD POLITECNICA DE MADRID.

La profunda renovación se orienta hacia el previsible desarrollo y demanda futura de estas técnicas, y se basa en el elevado nivel alcanzado por la hidrogeología en España.

La estructura sigue siendo la de Areas, de la que ha sido pionero el Curso Internacional de Hidrogeología Aplicada, y que permite a los profesionales en ejercicio atender a su reciclado, sin un alejamiento prolongado de su lugar de residencia. La superación de las pruebas de aptitud, de las áreas individuales, permite obtener el DIPLOMA correspondiente. La integración de las áreas, que constituyen cada Curso de Especialidad, permite alcanzar la titulación de ESPECIALISTA en: TECNOLOGIA HIDROGEOLO-

OBJETIVOS

Los objetivos fundamentales son los siguientes:

- a) Conseguir una formación eminentemente práctica, reduciendo las explicaciones teóricas a las indispensables para completar los conocimientos básicos necesarios, adquiridos en los Centros de Enseñanza.
- b) Conseguir la capacitación adecuada de aquellos técnicos que necesitan adquirir, por la índole de su trabajo, los conocimientos impartidos en el Curso, en algunas de sus áreas.
- c) Formar especialistas altamente cualificados en Hidrogeología, capaces de participar en los trabajos de investigación, captación, protección y gestión de las aguas subterráneas.

PARTICIPANTES Y NUMERO DE PLAZAS

Los técnicos que se interesan por la amplia temática de las Aguas Subterráneas. Está dirigido, con preferencia, a postgraduados de Escuelas Técnicas Superiores y Facultades Universitarias.

Se limita a 25 alumnos por área.

MATRICULA Y DOCUMENTACION

Los derechos de matrícula son los siguientes:

Por Areas:	
I a IX, XII, XIV, XXI	40.000 ptas.
X, XI, XIII, XV a XXI	20.000 ptas.
Por Especialidad:	
Tecnología Hidrogeológica Aplicada	320.000 ptas.
Tecnología Numérica e Informática en Hidrogeología	180.000 ptas.
Tecnologías Especiales en Hidrogeología. Por Master	180.000 ptas. 680.000 ptas.

Con objeto de facilitar el pago de los derechos de matrícula, el Banco General concede créditos en condiciones ventajosas a los alumnos españoles que cursen el Master completo o algunos de sus Cursos de Especialidad.

Cada asistente recibe una amplia documentación referente a cada área en la que participa.

SECRETARIA E INSCRIPCIONES

Fundación Gómez-Pardo
Alenza, 1
28003 MADRID - ESPAÑA
Teléfonos: (91) 441 79 21 y 442 26 56

CONSEJO DE DIRECCION

Ilmo. Sr. Director del Instituto Tecnológico GeoMinero de España.

Ilmo. Sr. Director de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid

Ilmo. Sr. Director de Aguas Subterráneas y Geología Ambiental, del Instituto Tecnológico GeoMinero de España.

Ilmo. Sr. Subdirector de Doctorado, Investigación y Desarrollo, de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid.

CURSO DE ESPECIALIDAD**TECNOLOGIA HIDROGEOLOGICA APLICADA**

Duración: Enero-mayo 1992 - 32 Créditos
Director: **D. Agustín Navarro Alvargonzález**

AREA I**HIDROGEOLOGIA BASICA APLICADA**

Director: **D. Agustín Navarro Alvargonzález**
Fecha: 13-24 enero. Horas lectivas: 40

PROGRAMA

— Introducción a la hidrogeología. Acuíferos y sistemas subterráneos.

- Movimiento del agua en un medio poroso. Parámetros hidráulicos.
- El sistema acuífero: identificación, recursos, descargas.
- Importancia de las aguas subterráneas en España. Principales acuíferos.
- Técnicas de prospección y captación: geología, geofísica, captación, ensayo de bombeo.
- Calidad de agua. Hidroquímica. Intrusión marina.
- Explotación de acuíferos. Coste del agua. Legislación. Gestión y conservación.
- Técnicas especiales. Recarga artificial. Modelización.

COSTO: 40.000 ptas. CREDITOS: 4

AREA II**METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION HIDROGEOLOGICA**

Director: **D. Segismundo Niñerola Plá**
Fecha: 27 enero-7 febrero Horas lectivas: 40

PROGRAMA

- Objetivos.
- Programación y planificación de proyectos de investigación hidrogeológica.
- Estudios preliminares regionales y locales.
- Investigación hidrogeológica en diversos ámbitos:
 - Formaciones detríticas.
 - Formaciones ígneas y metamórficas.
 - Formaciones volcánicas.
 - Formaciones kársticas.
 - Inventario y base de datos.
 - Cartografía hidrogeológica.
 - Ejemplos prácticos.

COSTO: 40.000 ptas. CREDITOS: 4

AREA III**CAMPAMENTO DE HIDROGEOLOGIA**

Director: **D. Angel González Asensio**
Fecha: 10-14 febrero Horas lectivas: 40

PROGRAMA

- Geología aplicada a la hidrogeología.
- Cortes, estratigrafía y tectónica.
- Fotogeología aplicada.
- Cartografía hidrogeológica.
- Identificación de formaciones acuíferas.
- Identificación de cierres impermeables.
- Identificación de áreas de recarga, bordes y áreas de descarga.
- Funcionamiento de acuíferos.

COSTO: 40.000 ptas. CREDITOS: 4

AREA IV**HIDROLOGIA DE SUPERFICIE**

Director: **D. Felipe García Berrio**
Fecha: 17-28 febrero Horas lectivas: 40

PROGRAMA

- Precipitación y evapotranspiración.
- Geomorfología de ríos y cuencas.
- Escorrentía: ciclo y componentes.
- Hidrometría: métodos y equipos de aforos.
- Relaciones río-acuífero.
- Análisis de hidrogramas. Determinación de la escorrentía subterránea.
- Estadística aplicada a la hidrología.
- Regulación de aguas superficiales.
- Estudio hidrológico de una cuenca.

COSTO: 40.000 ptas. CREDITOS: 4

AREA V**HIDRODINAMICA SUBTERRANEA APLICADA**

Director: **D. Alfredo Iglesias López**
Fecha: 2-13 marzo Horas lectivas: 40

PROGRAMA

- Principios y conceptos básicos en hidrodinámica. Tipos de acuíferos y parámetros característicos.
- Redes de flujo. Mapas piezométricos.
- Ecuaciones fundamentales.
- Hidráulica de pozos en acuíferos libres, confinados y semiconfinados. Régimen permanente.
- Hidráulica de pozos en acuíferos libres, confinados y semiconfinados. Régimen transitorio.
- Análisis de niveles en recuperación.
- Casos particulares. Barreras y drenaje diferido.
- Modelos de afecciones y modelos de flujo radial.
- Estudio de la conexión hidráulica entre río y acuífero. Modelos de relación río-acuífero.
- Estudio de la calidad hidrodinámica de pozos de captación de aguas subterráneas.
- Propuestas de investigación y desarrollo.

COSTO: 40.000 ptas. CREDITOS: 4

AREA VI**TECNICAS GEOFISICAS EN HIDROGEOLOGIA**

Director: **D. Alfonso Maldonado Zamora**
Fecha: 16-27 marzo Horas lectivas: 40

PROGRAMA

- La geofísica como auxiliar del hidrogeólogo.
- Conceptos fundamentales en prospección geoeléctrica.
- Teoría e interpretación de los sondeos eléctricos verticales (SEV).
- Estudios regionales y puntuales mediante la técnica de SEV.
- Calicatas eléctricas: formaciones kársticas.

- Testificación e interpretación de diagrfias geofísicas.
- Método de polarización inducida en hidrogeología.
- El sondeo electromagnético transitorio y su aplicación a la determinación de estructuras profundas y contactos agua dulce-agua salada.
- Método electromagnético, en el dominio de la frecuencia y del tiempo. Comparación con el método de corriente continua.
- Otras técnicas (sísmica de refracción y reflexión de alta resolución, gravimetría, magnetometría, etc.).

COSTO: 40.000 ptas. CREDITOS: 4

AREA VII**METODOS DE CAPTACION DE AGUAS SUBTERRANEAS**

Director: **D. José Francisco González Fernández**
Fecha: 30 marzo-10 abril Horas lectivas: 40

PROGRAMA

- Introducción a los métodos de captación de aguas subterráneas.
- Perforación a percusión.
- Perforación a rotación con circulación directa.
- Perforación a rotación con circulación inversa.
- Rotoperforación.
- Control hidrogeológico de sondeos.
- Limpieza y desarrollo de sondeos. Tratamientos. Corrosión e incrustaciones.
- Equipamiento de sondeos.
- Dimensionado de sondeos. Pliego de condiciones.

COSTO: 40.000 ptas. CREDITOS: 4

AREA VIII**CALIDAD Y CONTAMINACION DEL AGUA**

Director: **D. Juan Antonio López Geta**
Fecha: 20 abril-8 mayo Horas lectivas: 40

PROGRAMA

- Normas de calidad para los usos del agua.
- Contaminación agrícola, industrial y urbana.
- La intrusión marina en acuíferos costeros.
- Los mapas de orientación al vertido de residuos sólidos.
- Modelos matemáticos de calidad.
- El tratamiento de datos de calidad. Redes de vigilancia.
- Aguas minero-medicinales.
- Legislación y situación actual española.
- Estudio de casos prácticos.

COSTO: 40.000 ptas. CREDITOS: 4

CURSO DE ESPECIALIDAD**TECNOLOGIA NUMERICA E INFORMATICA EN HIDROGEOLOGIA**

Duración: Mayo-Julio 1992 - 18 Créditos
Director: **D. Alfredo Iglesias López**

AREA IX**INFORMATICA APLICADA A LA HIDROGEOLOGIA**

Director: **D. Félix Heras García**
 Fecha: 11-22 mayo Horas lectivas: 40

PROGRAMA

- Introducción a la informática.
- Sistemas operativos y lenguajes de programación.
- Sistemas PC y periféricos.
- Paquetes de programas estándar:
 - Hojas de cálculo.
 - Base de datos.
 - Paquetes gráficos.
- Paquete de apoyo informático a la hidrogeología. PAI.
- Paquete integrado de manejo de recursos. MARE.
- Aplicaciones de paquetes estándar a problemas hidrogeológicos.

COSTO: 40.000 ptas. CREDITOS: 4

AREA X**SISTEMAS DE INFORMACION**

Director: **D. Alfredo Iglesias López**
 Fecha: 25-29 mayo Horas lectivas: 20

PROGRAMA

- Introducción y conceptos en sistemas de información.
- Sistemas físicos. Vocabulario y términos de referencia:
 - Unidades centrales: «Main Frame», Mini, PC.
 - Sistemas periféricos.
- Sistemas lógicos. Vocabulario y términos de referencia:
 - Sistemas operativos y lenguaje de programación.
 - «Software» de base.
- Comunicaciones. Redes de área local. Consultas a bancos de datos.
- Bases de datos (BD).
- Sistemas de almacenamiento en disco óptico (SAD).
- Sistemas de información geográfica (SIG).
- Metodologías para la planificación de sistemas de información.

COSTO: 20.000 ptas. CREDITOS: 2

AREA XI**METODOS NUMERICOS APLICADOS A LA HIDROGEOLOGIA**

Director: **D. Julián Alonso Martínez**
 Fecha: 1-5 junio Horas lectivas: 20

PROGRAMA

- Introducción a los métodos numéricos.
- Análisis numérico.
- Derivación e integración numérica. Aplicaciones.
- Resolución de ecuaciones.
- Métodos matriciales.
- Resolución de sistemas.
- Métodos de diferencias finitas. Aplicación a la modelización de acuíferos.

- Introducción al método de elementos finitos. Aplicación a la modelización de acuíferos.

COSTO: 20.000 ptas. CREDITOS: 2

AREA XII**ESTADISTICA APLICADA A LA HIDROGEOLOGIA**

Director: **D. Enrique Chacón Oreja**
 Fecha: 8-19 junio Horas lectivas: 40

PROGRAMA

- Introducción y conceptos básicos.
- Estudio de distribuciones.
- Correlación y regresión.
- Modelo lineal.
- Series temporales.
- Modelos estocásticos en hidrogeología.
- Geostatística aplicada a la hidrogeología.
- Análisis multivariante.

COSTO: 40.000 ptas. CREDITOS: 4

AREA XIII**TELEDETECCION APLICADA A LA HIDROGEOLOGIA**

Director: **D. Angel Valverde Gonzalo**
 Fecha: 22-26 junio Horas lectivas: 20

PROGRAMA

- Introducción. Objetivo y desarrollo de la teledetección.
- Bases físicas y medios perturbadores.
- Niveles. Vectores y sensores.
- Verdad terreno.
- Tratamiento de imágenes.
- Aplicaciones a la hidrogeología.

COSTO: 20.000 ptas. CREDITOS: 2

AREA XIV**MODELOS EN HIDROGEOLOGIA**

Director: **D. Cayetano Lucena Bonny**
 Fecha: 29 junio-11 julio Horas lectivas: 40

PROGRAMA

- Modelos matemáticos de simulación directa. Balance de flujos. Condiciones en los límites. Régimen permanente. Métodos prácticos de resolución.
- Régimen transitorio. Discretización del tiempo. Métodos prácticos de resolución.
- Resolución de problemas especiales.
- Utilización práctica de modelos de simulación. Planteamiento y resolución de problemas concretos.
- Modelos de transporte.
- Ejemplos de utilización.
- Modelos precipitación-escorrentía.
- Modelos de elementos finitos.

COSTO: 40.000 ptas. CREDITOS: 4

CURSO DE ESPECIALIDAD**TECNOLOGIAS ESPECIALES EN HIDROGEOLOGIA**

Duración: Septiembre-noviembre 1992 - 18 Créditos
 Director: **D. Adolfo Eraso Romero**

AREA XV**PROBLEMAS DEL AGUA EN LA MINERIA**

Director: **D. Rafael Fernández-Rubio**
 Fecha: 14-18 septiembre Horas lectivas: 20

PROGRAMA

- El agua en los pozos de mina.
- El agua en galerías y rampas de minas.
- El agua en la minería subterránea.
- El agua en la minería a cielo abierto.
- Problemas especiales: biomina, lixiviación.
- Energía hidrogeotérmica.
- Recarga artificial de acuíferos.

COSTO: 20.000 ptas. CREDITOS: 2

AREA XVI**HIDROGEOLOGIA EN LAS OBRAS PUBLICAS**

Director: **D. Pedro Martín Bourgon**
 Fecha: 21-25 septiembre Horas lectivas: 20

PROGRAMA

- Introducción a la hidrogeología en las obras públicas.
- Ensayos de permeabilidad.
- Ensayos especiales.
- Drenajes. Taludes.
- Pantallas. Pantallas continuas. Muros de hormigón.
- Problemas del agua en presas, ferrocarriles y carreteras.
- Cimentaciones.
- Técnicas especiales.

COSTO: 20.000 ptas. CREDITOS: 2

AREA XVII**HIDROGEOLOGIA DE FORMACIONES ESPECIALES. KARST, MEDIOS FISURADOS Y MEDIOS DE BAJA PERMEABILIDAD**

Director: **D. Adolfo Eraso Romero**
 Fecha: 28 septiembre-2 octubre Horas lectivas: 20

PROGRAMA

- Hidrogeología del karst.
- Procesos de karstificación.
- Aspectos geomorfológicos e hidrogeológicos.
- Fenómenos de disolución. Mecanismos.
- Formaciones fisuradas.
- Cuantificación de la anisotropía. Metodología.
- Programas de cálculo e investigación.

- Aplicaciones.
- Formaciones de baja permeabilidad.
- Problemas y ensayos tipo.

COSTO: 20.000 ptas. CREDITOS: 2

AREA XVIII**MODELIZACION DE ALMACENAMIENTOS DE RESIDUOS RADIOACTIVOS**

Director: **D. Javier Elorza Tenreiro**
 Fecha: 5-9 octubre Horas lectivas: 20

PROGRAMA

- Introducción a la modelización. Planteamiento del problema.
- Tipos de modelos: Probabilísticos y determinísticos.
- Toma de datos.
- Modelos de flujo de agua subterránea.
- Modelos de transporte de radionucléidos.
- Toma de datos y calibración de parámetros.
- Revisión de ejemplos.

COSTO: 20.000 ptas. CREDITOS: 2

AREA XIX**IMPACTO AMBIENTAL EN HIDROGEOLOGIA**

Directora: **Dña. Paloma Iglesias López**
 Fecha: 13-16 octubre Horas lectivas: 20

PROGRAMA

- Impacto ambiental. Definición y conceptos.
- Evaluación del impacto ambiental. Metodologías y fases.
- Impacto sobre las aguas superficiales, subterráneas y los ecosistemas.
- Corrección del impacto ambiental.
- Impacto hidrológico: Cantidad y calidad. Eutrofización y contaminación.
- Corrección del impacto ambiental en hidrogeología. Planificación de la explotación y actividades. Perímetros de protección. Asesoramiento y control.
- Restauración de espacios ambientales afectados por labores mineras.
- Abandono de minas.
- Emplazamiento y clausura de instalaciones nucleares.

COSTO: 20.000 ptas. CREDITOS: 2

AREA XX**TECNOLOGIA DEL CONTROL EN HIDROGEOLOGIA**

Director: **D. Carlos Riestra Fuertes**
 Fecha: 19-23 octubre Horas lectivas: 20

PROGRAMA

- Sistemas de control en hidrogeología.

- Tipos de controles: climático, piezométrico, hidrométrico, de calidad, y de uso del agua.
- Dispositivos de control: clásicos y nuevas tecnologías.
- Planificación del control en hidrogeología.
- Control espacial y puntual. Redes de control.
- Diseño, objetivos y análisis de redes de control.
- Redes automáticas de control: dispositivos, comunicaciones y bases de datos.

COSTO: 20.000 ptas. CREDITOS: 2

AREA XXI

ECONOMIA Y LEGISLACION DEL AGUA

Director: **D. Borja Martí Vallbona**

Fecha: 26-30 octubre Horas lectivas: 20

PROGRAMA

- Usos y aplicaciones del agua.
- Usos del agua en España.
- Costo y valor del agua.
- Economía del agua.
- Optimización del uso del agua.

- Legislación. Ley de Aguas y Reglamento.
- Las concesiones y los usuarios.

COSTO: 20.000 ptas. CREDITOS: 2

AREA XXII

GESTION DEL AGUA

Directores: **D. Borja Martí Vallbona** y
D. Luis López García

Fecha: 2-13 noviembre Horas lectivas: 40

PROGRAMA

- Planificación hidrológica. Conceptos y secuencia.
- Planificación hidrológica en España.
- Gestión de recursos. Regulación.
- Sistemas de recursos hidráulicos.
- Operaciones de manejo de recursos.
- Utilización conjunta.
- Modelos de gestión.
- Sobreexplotación.
- Gestión de la calidad.

COSTO: 40.000 ptas. CREDITOS: 4

Notas bibliográficas

GEOLOGIA REGIONAL

901546. **Estructura y estratigrafía de la Sierra de Los Gajares y sectores próximos (Conjunto Alpujarride, Cordilleras Béticas).** SANZ DE GALDEANO, C.

Estud. geol. (Madrid), vol. 46, núm. 1-2, 123-134, 27 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Tectónica imbricada, Cabalgamiento, Manto, Escama tectónica, Falla, Roca carbonatada, Unidad estratigráfica, Trías Medio, Trías Sup., Alpujarras, Zona Bética, Provincia Granada.

901585. **La Formación Marín: redeposición de material jurásico durante el Mioceno, zona Subbética.** REY, J.; MARTINEZ GALLEGO, J., y VERA, J. A.

Geogaceta (1990), núm. 8, 94-96, 7 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Remoción sedimentaria, Litostratigrafía, Falla, Conglomerado, Burdigaliense, Zona Subbética, Zona Bética, Provincia Murcia.

901591. **Nuevas aportaciones al conocimiento geológico de la Ría del Eo, NO de España.** FERNANDEZ CATUXO, J.

Geogaceta (1990), núm. 8, 109-111, 11 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Carbonífero, Tectónica superpuesta, Corte geológico, Pliegue tumbado, Geometría, Asociación diques, Asturias.

ESTRATIGRAFIA

901545. **El Cretácico Superior del Prebético externo en el norte de Yecla (Murcia).** MARTIN CHIVELET, J.

Estud. geol. (Madrid), vol. 46, núm. 1-2, 111-121, 30 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Albiense, Cenomaniense, Senoniense, Megaciclo sedimentario, Plataforma carbonatada, Tectónica sinsedimentaria. Eustatismo, Subsistencia, Unidad estratigráfica, Bios-tratigrafía, Prebético, Zona Bética, Provincia Murcia.

901570. **Datos biostratigráficos de los materiales silúricos del Sinclinal de Herrera del Duque, Badajoz.** PIEREN, A., y GUTIERREZ MARCO, J. C.

Geogaceta (1990), núm. 8, 58-61, 10 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Biostratigrafía, Fauna graptolites, Fauna braquiópodos, Silúrico, Hercínico sur, Provincia Badajoz.

901573. **Trilobites y goniatites de la cuenca carbonífera de los Santos de Maimona: deducciones biostratigráficas.** PALACIOS, M. J.; PALACIOS, T., y GOMEZ VALENZUELA, J. M.

Geogaceta (1990), núm. 8, 66-67, 11 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Biostratigrafía, Fauna trilobites, Carbonífero, Provincia Badajoz.

901576. **Extensión de la unidad «Limos y areniscas abigarrados de Torete», al sector NO de la Cordillera Ibérica, provincias de Soria y Guadalajara (1).** GARCIA GIL, S.

Geogaceta (1990), núm. 8, 71-72, 7 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Ladiniense, Muschelkalk, Limolita, Arenisca, Discordancia erosiva, Estructura sedimentaria, Macizo Ibérico, Provincias Soria, Guadalajara.

901577. **Caracterización de la secuencia Oxfordiense en el sector central de la Cordillera Ibérica.** AURELL, M.; MELENDEZ, A., y MELENDEZ, G.

Geogaceta (1990), núm. 8, 73-75, 7 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Oxfordiense, Plataforma carbonatada, Sedimentación bioclástica, Laguna estratigráfica, Variación nivel, Transgresión, Packstone, Calcarenita, Macizo Ibérico, Provincias Teruel, Zaragoza.

901578. **Caracterización biostratigráfica de la Biozona Transversarium, Oxfordiense Medio, en el sector oriental de la Cordillera Ibérica.** FONTANA, B., y MELENDEZ, G.

Geogaceta (1990), núm. 8, 76-78, 7 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Biostratigrafía, Oxfordiense, Laguna estratigráfica, Fauna específica, Fauna ammonites, Macizo Ibérico, Provincia Zaragoza.

901579. **Empleo de diagracías para la identificación del Cretácico entre la Cordillera Ibérica y la Sierra de Altimira.** ARACIL, E.

Geogaceta (1990), núm. 8, 79-80, 6 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Diagráfia gamma, Cretácico, Corte sondeo, Macizo Ibérico.

901580. **Turbiditas oolíticas cretácicas al norte de Vélez Blanco, Subbético interno, provincia de Almería.** VERA, J. A.; AGUADO, R.; MARTINEZ GALLEG0, J., y RUIZ ORTIZ, P. A.

Geogaceta (1990), núm. 8, 81-83, 8 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Cretácico, Turbiditas, Oolito, Paleocorriente, Paleogeografía, Zona Subbética, Zona Bética, Provincia Almería.

901581. **El Cretácico Superior en la terminación occidental de la Zona Axial Pirenaica.** TEIXELL, A.

Geogaceta (1990), núm. 8, 84-85, 9 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Cretácico Sup., Plataforma carbonatada, Discordancia angular, Paleokarst, Variación nivel, Transgresión, Pirineos españoles, Provincias Huesca, Navarra.

901582. **La transgresión del Cenomaniense Superior en el Prebético.** MARTIN CHIVELET, J.

Geogaceta (1990), núm. 8, 86-88, 8 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Cenomanense, Turonense, Variación nivel, Transgresión, Plataforma carbonatada, Zona Prebética, Zona Bética, Provincia Murcia.

901586. **Sobre la conexión entre la Depresión de Guadalix-Baza y el Corredor de Alanzora. Cordilleras Béticas, Andalucía Oriental.** GUERRA, M.

Geogaceta (1990), núm. 8, 97-99, 16 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Paleogeografía, Tortoniense, Variación nivel, Transgresión, Sedimentación marina, Zona Bética, Provincia Granada.

901587. **El Terciario de la Cubeta de Muniesa, provincia de Teruel.** PEREZ, A.; PARDO, G., y VILLENAL, J.

Geogaceta (1990), núm. 8, 100-101, 7 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Terciario, Paleogeografía, Abanicos fluviales, Tectónica sinsedimentaria, Discordancia angular, Provincia Teruel.

901594. **Aspectos paleoecológicos de la cuenca de Los Santos de Maimona: acritarcos y esporas.** VALENZUELA, J. M.; PALACIOS, T., y PALACIOS GONZALEZ, M. J.

Geogaceta (1990), núm. 8, 118-121, 6 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Carbonífero, Paleoecología, Plataforma carbonatada, Sedimentación talud marino, Espora, Flora acritarcos, Regresión, Variación nivel, Provincia Badajoz.

GEOMORFOLOGIA

901515. **Procesos litorales en las Rías de Betanzos y Ares, La Coruña.** GRAJAL, M.

Corpus Geologicum Gallaeciae (1990), vol. 5, 327 pp., 78 ref., esp., bibl. ITGE.

* Tesis, Geomorfología, Morfología costa, Golfo, Estuario, Medio litoral, Sedimentación litoral, Provincia La Coruña.

901532. **Evolución morfológica del Monte Suevo (NE de Asturias).** SAEZ HERNANDEZ, J. M., y GOMEZ DE BENITO, L.

Eria (1988), núm. 15, 80-84, esp., bibl. ITGE.

* Morfodinámica, Erosión fluvial, Lapiaz, Macizo montañoso, Asturias.

901534. **Catalog espeleológico del Massís del Garraf. Unitat septentrional (Ordal).** RUBINAT, F.

Espeleosie (1988), núm. 30, 13-65, 34 ref., cat., res. esp., bibl. ITGE.

* Catálogo, Cavidad subterránea, Provincia Barcelona.

901544. **Tipología de dunas eólicas, procesos de erosión-sedimentación costera y evolución litoral de la provincia de Huelva (Golfo de Cádiz occidental, sur de España).** FLOR, G.

Estud. geol. (Madrid), vol. 46, núm. 1-2, 99-109, 39 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Duna costera, Clasificación, Morfología costa, Playa, Duna, Corriente litoral, Línea costa, Erosión eólica, Sedimentación eólica, Pleistoceno, Provincia Huelva.

901588. **El límite Pleistoceno-Holoceno en el yacimiento de la Cueva de Nerja, Málaga.** JORDA CERDA, J. F.; AURA, T., y JORDA CERDA, F.

Geogaceta (1990), núm. 8, 102-103, 7 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Límite estratigráfico, Pleistoceno, Holoceno, Paleoclima, Unidad estratigráfica, Datación, Provincia Málaga.

GEOLOGIA DEL INGENIERO

901501. **Las marismas del Guadalquivir, reserva biogenética de plantas tolerantes a la salinidad.** MARAÑON, T.; GARCIA, L. V.; MURILLO, J. M., y CLEMENTE, L.

An. edafol. agrobiol. (1989), vol. 48, núm. 5-12, 725-740, 34 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Marisma salada, Salinidad, Biocenosis, Ecosistema, Perímetro protección, Protección medio ambiente, Parque Nacional de Doñana, Cuenca Guadalquivir, Provincia Huelva.

901519. **La restauración de la vegetación en los montes españoles.** ICONA.

Ecología (1990), núm. 1, 571 pp., ref. disem., esp., bibl. ITGE.

* Conservación, Reacondicionamiento, Ecosistema, Vegetación, Bosque, Península Ibérica.

901520. **La evolución de los bosques de la Península Ibérica: una interpretación basada en datos paleobiogeográficos.** COSTA, M.; GARCIA ANTON, M.; MORLA, C., y SAINZ OLLERO, H.

Ecología (1990), núm. 1, 31-58, 54 ref., esp., bibl. ITGE.

* Cuaternario, Paleogeografía, Paleobiología, Bosque, Ve-

getación, Análisis polínico, Palinodiagrama, Península Ibérica.

901521. **Clasificación biogeoclimática territorial de España: definición de eco-regiones.** ELENA, R.; TELLA, G.; ALLUE, J. L., y SANCHEZ PALOMARES, O.

Ecología (1990), núm. 1, 59-79, 13 ref., esp., bibl. ITGE.

* Biogeografía, Clasificación, Metodología, Estratigrafía, Clima, Relieve, Vegetación, Península Ibérica.

901522. **Edafología, ecología y reforestación.** GANDULLO, J. M.

Ecología (1990), núm. 1, 129-138, 8 ref., esp., bibl. ITGE.

* Protección medio ambiente, Ecosistema, Suelo, Bosque, Vegetación, Reacondicionamiento, España.

901523. **El papel del bosque en la conservación del agua y del suelo.** LOPEZ CADENAS DE LLANO, F.

Ecología (1990), núm. 1, 141-155, 8 ref., esp., bibl. ITGE.

* Recurso natural, Bosque, Vegetación, Conservación, Ciclo agua, Divisoria de aguas, Suelo, Balance agua.

901524. **La problemática actual de la erosión hídrica de los suelos de España.** CAMACHO, N.

Ecología (1990), núm. 1, 157-167, esp., bibl. ITGE.

* Erosión suelo, Control erosión, Acción preventiva, Acuerdo internacional, CEE, España.

901526. **Problemática que presentan las tierras agrícolas abandonadas desde la óptica de la lucha contra la erosión y los planes hidrológico forestales.** ARANDA, G.

Ecología (1990), núm. 1, 197-198, esp., bibl. ITGE.

* Conservación, Erosión suelo, Bosque, Reacondicionamiento.

901527. **El proyecto LUCDEME: «Lucha Contra la Desertificación en el Mediterráneo.** CARRERA, J. A.

Ecología (1990), núm. 1, 199-211, 6 ref., esp., bibl. ITGE.

* Proyecto, Planificación, Acción preventiva, Reacondicionamiento, Desertificación, Acción climática, Acción humana, Región Mediterránea, España.

901528. **Restauración de ecosistemas singulares y frágiles. Zonas húmedas.** MOLINA, P.

Ecología (1990), núm. 1, 331-340, esp., bibl. ITGE.

* Ecosistema, Ciclo agua, Vulnerabilidad acuifero, Medio húmedo, Zona húmeda, Conservación, Provincia Ciudad Real.

901529. **Restauración de la vegetación en cuencas mediterráneas: repoblaciones en zonas áridas.** SIMON, E.

Ecología (1990), núm. 1, 401-427, 34 ref., esp., bibl. ITGE.

* Medio árido, Reacondicionamiento, Vegetación, Bosque, Red hidrológica, Escorrentía, Drenaje terreno, Región Mediterránea.

901531. **Restauración de la vegetación en ecosistemas áridos y semiáridos: algunas reflexiones ecológicas.** ESTEVE, M. A.; FERRER, D.; RAMIREZ DIAZ, L.; CALVO, J. F.; SUAREZ ALONSO, M. L., y VIDAL, M. R.

Ecología (1990), núm. 1, 497-510, 70 ref., esp., bibl. ITGE.

* Estudio medio, Ecosistema, Medio árido, Medio semiárido, Reacondicionamiento, Vegetación, Régimen hidrológico suelo, Erosión suelo, Región Mediterránea, Provincia Murcia.

901533. **La intervención del hombre en la Ría y Marismas del Guadalquivir.** CRUZ, J.

Eria (1988), núm. 16, 109-123, 38 ref., esp., res. ing., fr., bibl. ITGE.

* Marisma, Estuario, Planicie aluvial, Acción hombre, Agricultura, Catástrofe natural, Protección medio ambiente, Cuenca Guadalquivir.

901592. **Evaluación cuantitativa del impacto ambiental en la selección del emplazamiento del nuevo vertedero de residuos sólidos urbanos de Málaga.** BARETTINO, D., y GALLEG0, E.

Geogaceta (1990), núm. 8, 112-114, 3 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Estudio impacto medio, Vertedero, Residuo sólido, Residuo urbano, Elección lugar, Provincia Málaga.

901597. **Nuevo proceso para la depuración natural de los efluentes de la industria.** DUPUY DE LOME, E.

Ind. mín. (1990), núm. 298, 51-65, 14 ref., esp., bibl. ITGE.

* Depuración, Efluente, Residuo industrial, Residuo líquido, Residuo urbano, Infiltración, Suelo, Legislación, España.

901598. **Estudio de la contaminación marina entre Cabo de Palos y Cabo Tiñoso, sureste de España. Concentraciones de cadmio, plomo y cinc en sedimentos superficiales.** GUERRERO, J., y RODRIGUEZ PUENTE, C.

Inf. téc. Inst. Esp. Oceanogr. (1990), núm. 80, 13 pp., 10 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Contaminación, Sedimentación marina, Estéril, Plomo, Cadmio, Cinc., Provincia Murcia.

901601. **Cimentaciones por medio de micropilotes en zonas kársticas.** URUEL, A.; ORTUÑO, L., y PUEBLA, F. J.

Ing. civ. (1990), núm. 74, 17-22, 1 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Pilote de cimentación, Karst, Capacidad de carga, Edificio, Ensayo de carga, Calcarenita, Isla Mallorca, Baleares.

PALEONTOLOGIA: VERTEBRADOS

901510. **Els ocells del Pleistocene superior de la Cova Nova, Capdepera, Mallorca. I. El registre.** FLORIT, X., y ALCOVER, J. A.

Boll. Soc. Hist. Nat. Balears (1987), vol. 31, 7-32, 29 ref., cat., res. ing., bibl. ITGE.

* Osamenta, Fauna pájaro, Biometría, Caverna, Pleistoceno Sup., Isla Mallorca, Baleares.

901511. **Els ocells del Pleistocene superior de la Cova Nova, Capdepera. Mallorca. II. Fauna associada i discussió.** FLORIT, X., y ALCOVER, J. A.

Boll. Soc. Hist. Nat. Balears (1987), vol. 31, 33-44, 26 ref., cat., res. ing., bibl. ITGE.

* Fauna pájaro, Fauna mamífero, Fauna gastrópodo, Paleoecología, Wurm, Pleistoceno Sup., Isla Mallorca, Baleares.

901514. **Presencia de restos óseos en el Pérmico de Menorca. Nota previa.** PRETUS, J. LL., y OBRADOR, A.

Boll. Soc. Hist. Nat. Balears (1987), vol. 31, 149-152, 3 ref., esp., res. cat., ing., bibl. ITGE.

* Tetrápoda, Vertebrado, Osamenta, Pérmico Sup., Isla Menorca, Baleares.

901548. **Primeros resultados del estudio de un nuevo yacimiento de icnofauna triásica en Peña Sagra (Cantabria, España).** DEMATHIEU, G., y SAINZ DE OMEÑACA, J. *Estud. geol. (Madrid)*, vol. 46, núm. 1-2, 147-150, 4 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Ichnites, Fauna reptil, Morfología, Pirita, Trias, Provincia Santander.

PALEONTOLOGIA: INVERTEBRADOS

901547. **Los Ostrácodos de la formación «Arenas de Huelva» (sección de Moguer).** RUIZ MUÑOZ, F., y GONZALEZ REGALADO, M. L.

Estud. geol. (Madrid), vol. 46, núm. 1-2, 135-145, 40 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Ostrácodos, Fauna específica, Biostratigrafía, Paleoecología, Tabinense, Plioceno Inf., Cuenca Guadalquivir, Provincia Huelva.

TECTONICA

901554. **Las diaclasas y diques en el Plutón de Caldas de Reyes, provincias de La Coruña y Pontevedra. España.** CUESTA, A.; CORRETGE, L. G.; SUAREZ, O., y GALLASTEGUI, G.

Geogaceta (1990), núm. 8, 18-20, 15 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Diaclasa, Asociación diques, Microtectónica, Foliación, Geometría, Roca granuda, Provincias La Coruña, Pontevedra.

901555. **Observaciones sobre algunos diques de pórfidos. Sector de Alpedrete. Sistema Central.** DOBLAS, M., y GOICOECHEA, P.

Geogaceta (1990), núm. 8, 21-22, 8 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Asociación diques, Pórfido, Roca ígnea, Geometría, Falla diestra, Falla inversa, Diaclasa, Foliación, Hercínico Centro, Provincia Madrid.

901557. **Análisis estructural de las mineralizaciones de baritina de la Unidad de Herrera, Cordillera Ibérica Oriental.** POCOVI, A.; BESTEIRO, J.; OSACAR, M. C.; GONZALEZ MARTINEZ, J., y LAGO, M.

Geogaceta (1990), núm. 8, 25-27, 5 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Deformación, Filón, Geometría, Microtectónica, Barita sustancia, Macizo Ibérico.

901558. **Algunos aspectos de la deformación continua de los materiales mesozoicos del borde noroccidental de la Cordillera Ibérica, Rama Aragonesa: esquistosidad y microestructuras asociadas.** GIL, A.; ALBA, J., y POCOVI, A.

Geogaceta (1990), núm. 8, 28-29, 9 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Geometría, Microtectónica, Pliegue, Micropliegue, Esquistosidad flujo, Ordenación granos, Estirolita, Macizo Ibérico, Provincia Zaragoza.

901559. **Efecto de arrastre aparente en zonas de cizalla: resultados de un modelo experimental.** DOBLAS, M.

Geogaceta (1990), núm. 8, 30-32, 2 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Ensayo de laboratorio, Ensayo cizallamiento, Modelo, Zona de cizalla.

901560. **Formación de una cubeta sinclinal en un contexto extensivo: la cuenca miocena de Rubielos de Mora, Teruel.** GUIMERA, J.

Geogaceta (1990), núm. 8, 33-35, 9 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Sinclinal, Cuenca subsidencia, Extensión tectónica, Falla normal, Geometría, Fosa tectónica, Horst, Mioceno, Provincia Teruel.

901561. **Rasgos estructurales de la Sierra de Salinas y zona de los Mallos, Sierras Exteriores, Prepirineo, provincias de Huesca y Zaragoza.** POCOVI, A.; MILLAN, H.; NAVARRO, J. J., y MARTINEZ, M. B.

Geogaceta (1990), núm. 8, 36-38, 14 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Lineación, Discordancia, Cabalgamiento, Anticlinal, Pirineos españoles, Provincias Huesca, Zaragoza.

901562. **Distensión-compresión en la Cuenca de Campo Arañuelo. Implicación cortical.** MARTIN, C.

Geogaceta (1990), núm. 8, 39-41, 30 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Cuenca intracratónica, Compresión tectónica, Falla inversa, Falla normal, Cabalgamiento, Discordancia, Geometría, Extensión tectónica, Hercínico Centro, Provincia Cáceres.

901563. **La estructura del anticlinal de La Massana, Hercínico del Pirineo Central.** CIRES, J.; ALIAS, G.; POBLET, J., y CASAS, J. M.

Geogaceta (1990), núm. 8, 42-43, 6 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Tectónica zócalo, Anticlinal, Pliegue, Cabalgamiento, Geometría, Orogenia hercínica, Pirineos españoles, Provincia Lérida.

901564. **Tectónica y sedimentación en el margen oeste del «rift» terciario del Valle de Ayora-Cofrentes, Valencia.** DE SANTIESTEBAN, C.; SAIZ, J.; BELLO, D., y RUIZ, F. J.

Geogaceta (1990), núm. 8, 44-46, 4 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Tectónica de fractura, Tectónica sinsedimentaria, Falla horizontal, Fosa tectónica, Geometría, Provincia Valencia.

901565. **Evolución del cabalgamiento de la Muela de Montalbán, Cordillera Ibérica, Teruel.** GUIMERA, J.; GONZALEZ, A., y PEREZ, A.

Geogaceta (1990), núm. 8, 47-49, 7 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Tectónica sinsedimentaria, Cabalgamiento, Anticlinal, Fosa tectónica, Geometría, Macizo Ibérico, Provincia Teruel.

901566. **«La Falla de Urriza», Pirineo Occidental: Neotectónica en materiales del Cretácico Superior del norte de Navarra.** MARTINEZ TORRES, L.; RAMON LLUCH, R., y EGUILUZ, L.

Geogaceta (1990), núm. 8, 50-51, 4 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Neotectónica, Falla vertical desgarré, Pliegue, Cretácico Sup., Pirineos españoles, Navarra.

901595. **Algunas reflexiones sobre los modelos tectónicos aplicados a la Cordillera Ibérica.** SIMON GOMEZ, J. L.

Geogaceta (1990), núm. 8, 123-129, 22 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Tectónica superpuesta, Modelo, Geometría, Microtectónica, Campo tensión-cizallamiento, Macizo Ibérico.

HIDROLOGIA. HIDROGEOLOGIA

901525. **Aproximación a la medida de la erosión y medios para reducir ésta en la España Peninsular.** SOTO, D.

Ecología (1990), núm. 1, 169-196, esp., bibl. ITGE.

* Almacenamiento agua, Precipitación atmosférica, Red hidrográfica, Erosión suelo, Proporción material erosionado, Proporción material sedimentado, Utilización terreno, Bosque, Agricultura, España.

901543. **Hidroquímica de la laguna de Tiscar (Córdoba, España).** MOYA, J. L.; RECIO, J. M., y GIRALDEZ, J. V.

Estud. geol. (Madrid), vol. 46, núm. 1-2, 93-98, 28 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Hidroquímica, Disolución, Saturación, Precipitación, Yeso, Halita, Levantamiento eléctrico, Espectro RX, Lago salado, Trias, Provincia Córdoba.

901593. **El drenaje subterráneo de la Cordillera Ibérica en la depresión del Ebro: aspectos geológicos.** SANCHEZ NAVARRQ, J. A.; SAN ROMAN, J.; DE MIGUEL, J. L., y MARTINEZ GIL, F. J.

Geogaceta (1990), núm. 8, 115-117, 14 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Acuífero, Agua subterránea, Manantial, Evaporita, Drenaje terreno, Depresión acuífero, Jurásico Inf., Terciario, Cuenca Ebro, Macizo Ibérico, Aragón.

MINERALOGIA: GENERALIDADES

901516. **Métodos espectroscópicos aplicados a la identificación de gemas.** DE LA FUENTE, C.

Cuad. gemol. (1989), vol. 2, núm. 10-11, 44-55, 3 ref., esp., bibl. ITGE.

* Dato mineral, Gema, Espectrometría RX, Espectrometría Mossbauer, Espectrometría UV, Espectrometría IR, Espectrometría Raman, Resonancia magnética nuclear.

901517. **El diamante sintético: su estado actual.** PELLICER, M. A.

Cuad. gemol. (1989), vol. 2, núm. 10-11, 62-78, 10 ref., esp., bibl. ITGE.

* Diamante comercial, Síntesis, Diagrama equilibrio, Grafito sustancia, Propiedad óptica, Utilización sustancia, Industria.

MINERALOGIA: SILICATOS

901506. **Síntesis de soluciones sólidas con estructura granate mediante proceso sol-gel.** CARDAS, J.; MONROS, G.; TENA, M. A.; ESCRIBANO, P., y ALARCON, J.

Bol. Soc. Esp. Cerám. Vidr. (1990), vol. 29, núm. 2, 95-98, 8 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Uvarovita, Grosularia, Solución sólida, Grupo granate, Síntesis, Estructura cristalina, Dato RX, Espectro IR, Gel coloidal.

901508. **Mullita: Naturaleza de la fusión y rango de solución sólida.** CAVALIERI, A. L.; PEÑA, P., y DE AZA, S.

Bol. Soc. Esp. Cerám. Vidr. (1990), vol. 29, núm. 3, 171-176, 23 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Mullita, Ionosilicato, Fusión, Solución sólida, Diagrama equilibrio.

901536. **Mineralogía y génesis de las arcillas de las Unidades del Campo de Gibraltar. V. Unidad de Bolonia.** RODRIGUEZ JIMENEZ, P., y RUIZ CRUZ, M. D.

Estud. geol. (Madrid), vol. 46, núm. 1-2, 3-14, 18 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Grupo arcilla-mineral, Caolinita, Illita, Clorita, Mineral interestratificado, Composición mineralógica, Dato ATG, Dato ATD, Dato MEB, Dato RX, Diagrama equilibrio, Diagénesis, Zona Bética, Provincia Cádiz.

901541. **Naturaleza del cemento en las areniscas del Flysch numidiense (sur de España).** RUIZ CRUZ, M. D.

Estud. geol. (Madrid), vol. 46, núm. 1-2, 71-79, 30 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Arenisca, Cemento roca, Caolinita, Dickita, Materia amorfa, Cristalinita, Composición mineralógica, Análisis químico, Dato MEB, Dato ATD, Dato ATG, Dato RX, Oligoceno, Zona Bética, Provincia Cádiz.

901549. **Granates en el plutón de Caldas de Reyes, provincias de La Coruña y Pontevedra, España.** CUESTA, A.

Geogaceta (1990), núm. 8, 5-6, 7 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Grupo granate, Piralspita, Grosularia, Asociación mineral, Análisis químico, Granito, Schilierense, Provincia La Coruña, Pontevedra.

901556. **Estudio de la variación del grado de desorientación de subgranos en cuarcitas de la zona este del Sistema Central y Macizos Paleozoicos de la Cordillera Ibérica.** TEJERO, R., y FERNANDEZ RODRIGUEZ, C.

Geogaceta (1990), núm. 8, 23-24, 7 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Deformación, Recristalización, Cuarzo, Grupo sílice, Extinción óptica, Cuarzita, Ordenación granos, Histograma, Macizo Ibérico, Hercínico Centro.

PETROLOGIA DE ROCAS SEDIMENTARIAS

901512. **Estudi biosedimentologic de l'estany de Sa Barçassa de l'Albufereta de Pollensa, Mallorca.** FORNOS, J. J., y FORTEZA, V.

Boll. Soc. Hist. Nat. Balears (1987), vol. 31, 123-142, 15 ref., cat., res. ing., bibl. ITGE.

* Sondeo, Laguna, Sedimento, Sedimentación bioclástica, Granulometría, Arcilla, Materia orgánica, Isla Mallorca, Balears.

901540. **Influencia de la diagénesis en la mineralogía de los materiales terciarios del Sector Central de la Depresión del Ebro (Zaragoza).** GONZALEZ LOPEZ, J. M.; FERNANDEZ NIETO, C., y LOPEZ AGUAYO, F.

Estud. geol. (Madrid), vol. 46, núm. 1-2, 65-69, 8 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Arcilla mineral, Diagénesis precoz, Arenisca, Marga, Análisis químico, Dato MEB, Dato RX, Composición mineralógica, Terciario, Cuenca Ebro, Provincia Zaragoza.

901542. **Estudio y clasificación de la materia orgánica dispersa (MOD) en el Lías de la Playa de Peñarrubia (Asturias).** SUAREZ RUIZ, I., y GONZALEZ PRADO, J. J.

Estud. geol. (Madrid), vol. 46, núm. 1-2, 81-92, 17 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Materia orgánica, Bitumen, Maceral, Alga, Plancton, Grado hullificación, Pirólisis, Petrografía, Histograma, Roca carbonatada, Pliensbaquiense, Sinemuriense, Asturias.

901569. **Caracterización de la materia orgánica de la Facies Villaro-Aramayona por pirólisis Rock-Eval.** DORRONSORO, C., y GARCIA SANCHEZ, M. R.

Geogaceta (1990), núm. 8, 56-57, 10 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Materia orgánica, Análisis químico, Pirólisis, Catagénesis, Maduración, Roca madre, Región Cantábrica, Provincia Alava.

901571. **Sedimentación marina somera en el Devónico del Anticlinorio de Puebla de Guzmán, Faja Píritica Ibérica.** MORENO, C., y SAEZ, R.

Geogaceta (1990), núm. 8, 62-63, 8 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Sedimentación marina, Sedimentación detrítica, Medio

agua poco profunda, Arenisca, Conglomerado, Paleocorriente, Barra, Anticlinorio, Devónico, Provincia Huelva.

901574. **Algunas aportaciones al conocimiento tecto-sedimentario del Carbonífero de «El Bierzo», León.** SANTA-MARIA, J., y ROBLES, R.

Geogaceta (1990), núm. 8, —68—, 1 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Tectónica sinsedimentaria, Sedimento lacustre, Sedimentación deltáica, Paleoambiente, Discordancia angular, Estefaniense, Provincia León.

901575. **Depósitos de abanicos aluviales distales en la unidad inferior del pérmico del borde noreste del Sistema Central.** PEREZ MAZARIO, F.

Geogaceta (1990), núm. 8, 69-70, 4 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Abanicos fluviales, Megaciclo sedimentario, Depósito de borde, Hercínico Centro, Pérmico, Provincia Soria.

901583. **Sequence stratigraphy and facies analysis of the Arro-Broto Turbidite System in the Castisent-Broto depositional sequence of the Hecho Group, Eocene, South-central Pyrenees.** SOLA, J., y MONTANER, J.

Geogaceta (1990), núm. 8, 89-91, 9 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Turbiditas, Estructura corriente turbiditas, Unidad estratigráfica, Eoceno, Pirineos españoles, Provincia Huesca.

901584. **Las unidades tectosedimentarias del margen septentrional de la Depresión del Ebro en el sector Luesia-Riglos, provincias de Zaragoza y Huesca.** ARENAS, C.; PARDO, G., y VILLENA, J.

Geogaceta (1990), núm. 8, 92-93, 7 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Abanicos fluviales, Tectónica sinsedimentaria, Cabalgamiento, Discordancia angular, Terciario, Cuenca Ebro, Provincias Zaragoza, Huesca.

901589. **Caracterización mineralógica de los sedimentos actuales del río Nervión, Vizcaya.** IRABIEN, M. J., y VELASCO, F.

Geogaceta (1990), núm. 8, 104-106, 5 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Aluvión, Arcilla mineral, Calcita, Granulometría, Cristalinidad, Acción hombre, Actual, Provincia Vizcaya.

901590. **Comportamiento hidráulico y sedimentario del río Ebro, entre Tortosa y Amposta, Tarragona, España.** SERRA, J.; COLOMO, F.; CANALS, M., y GUILLEN, J.

Geogaceta (1990), núm. 8, 107-108, 4 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Transporte fluvial, Medio alta energía, Configuración lecho, Sedimentación fluvial, Caudal, Río Ebro, Provincia Tarragona.

901600. **Metales pesados en sedimentos marinos del Golfo de Vera, Almería.** GUERRERO, J.; RODRIGUEZ PUENTE, C.; DEYA, M., y JORNET, A.

Inf. téc. Inst. Esp. Oceanogr. (1990), núm. 83, 21 pp., 12 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Sedimentación marina, Metal pesado, Elemento transuránico, Mercurio, Manganeso, Hierro, Plomo, Cromo, Análisis químico, Remoción sedimentaria, Crucero científico, Provincia Almería.

PETROLOGIA DE ROCAS IGNEAS Y METAMORFICAS

901538. **Aspectos vulcanológicos y estructurales, evolución petrológica e implicaciones en riesgo volcánico de la erupción de 1730 en Lanzarote. Islas Canarias.** CARRACEDO, J. C.; RODRIGUEZ BADIOLA, E., y SOLER, V.

Estud. geol. (Madrid), vol. 46, núm. 1-2, 25-55, 75 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Ciclo eruptivo, Histórico, Magma básico, Composición alcalina, Composición toleítica, Análisis químico, Norma petrográfica, Fusión parcial, Cristalización fraccionada, Control tectónico, Fractura, Catástrofe natural, Estudio impacto medio, Isla Lanzarote, Canarias.

901550. **Dataciones Rb/Sr en el complejo plutónico Táliga-Barcarrota (CPTB), Badajoz.** GALINDO, C.; PORTUGAL, M. R.; CASQUET, C., y PRIEM, H. N. A.

Geogaceta (1990), núm. 8, 7-9, 11 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Datación, Rb-Sr, K-Ar, Granito, Leucogranito, Pórfiro granítico, Granito biotita, Diorita, Gabro, Gabro olivino, Análisis químico, Provincia Badajoz.

901551. **Cálculo de los parámetros de los procesos de fusión parcial, cristalización fraccionada y mezcla, con el Programa TRAZAS.** LOPEZ RUIZ, J., y CEBRIA, J. M.

Geogaceta (1990), núm. 8, 11-12, 7 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Fusión parcial, Cristalización fraccionada, Asimilación, Contaminación magmática, Ecuación matemática, Coeficiente repartición, Análisis elemento traza.

901553. **Estructuras de desvitrificación en lavas ácidas del Paleozoico Medio-Superior del Sarrabús, SE de la Isla de Cerdeña, Italia.**

Geogaceta (1990), núm. 8, 16-17, 6 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Desvitrificación, Lava, Composición ácida, Esfelorita, Silúrico, Devónico, Cerdeña.

901572. **Preservación de estructuras internas y externas primarias, en pillow-lavas del Paleozoico Medio-Superior del Sarrabús, SE de la Isla de Cerdeña, Italia.** GIMENO TORRENTE, D.

Geogaceta (1990), núm. 8, 64-65, 5 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Pillow-lava, Textura, Silúrico, Devónico, Cerdeña.

YACIMENTOLOGIA: METALES

901567. **Estudio de algunos indicios cupríferos en la Depresión geológica del Ebro, Bages, Cataluña.** MATA PERELLÓ, J. M.

Geogaceta (1990), núm. 8, —52—, 3 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Índice mineral, Cobre sustancia, Malaquita, Yacimiento estratoide, Medio anaerobio, Cuenca Ebro, Provincia Barcelona.

YACIMENTOLOGIA DE SUSTANCIAS NO METALICAS

901505. **Características fisicoquímicas de las diatomitas de Bayovar (Chile).** VERDEJA, L. F.; SANCHO, J. P.; BARRANZUELA, J. L., y VASQUEZ, E. R.

Bol. Soc. Esp. Cerám. Vidr. (1990), vol. 29, núm. 2, 87-93, 7 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Diatomita, Refractario, Propiedad físico-química, Propiedad térmica, Análisis mayores, Dato ATD, Perú.

901507. **Tratamientos del caolín y su utilización en la fabricación del papel.** IBAÑEZ, A.; GONZALEZ PEÑA, J. M.; SANDOVAL, F., y PAIS, J.

Bol. Soc. Esp. Cerám. Vidr. (1990), vol. 29, núm. 3, 159-162, 6 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Papel, Utilización sustancia, Caolín sustancia, Análisis químico, Propiedad óptica, Granulometría.

901509. **Tratamiento químico de la escoria de sílice de una planta geotérmica para su aplicación en cerámica y vidrio.** DIAZ, C., y RINCON, J. M.

Bol. Soc. Esp. Cerám. Vidr. (1990), vol. 29, núm. 3, 181-184, 4 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Sílice, Corteza silíceas, Lavado, Análisis químico, Materia prima, Cerámica, Vidrio, Méjico.

901518. **Vidrios naturales.** ASIAIN, J., y GOMEZ LOPEZ, E.

Cuad. gemol. (1989), vol. 2, núm. 10-11, 84-94, 11 ref., esp., bibl. ITGE.

* Vidrio natural, Vidrio volcánico, Obsidiana, Tectita, Moldavita, Sílice, Fulgurita, Impactita, Propiedad física, Análisis químico.

SUELOS

901490. **Suelos y vegetación de las Peñas de Aya, Navarra y Guipúzcoa.** PERALTA, J.; IÑIGUEZ, J., y BASCONES, J. C.

An. edafol. agrobiol. (1989), vol. 48, núm. 5-12, 499-522, 28 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Suelo, Perfil suelo, Diferenciación horizonte, Inceptisol, Mistosol, Vegetación, Navarra, Provincia Guipúzcoa.

901491. **Presencia de horizonte plácido en ñadis (Placaquands) y trumaos (Placudands) en el sur de Chile.** LU-

ZIO, W.; BARROS, C.; ARANCIBIA, M., y ALCAYAGA, S. *An. edafol. agrobiol.* (1989), vol. 48, núm. 5-12, 523-543, 23 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Suelo, Andosol, Estructura suelo, Perfil suelo, Diferenciación horizonte, Aluminio, Hierro, Carbono orgánico, Micromorfología suelo, Pedogénesis, Ceniza volcánica, Chile.

901492. **Estudio edafogenético en suelos de rañas. Distribución de hierro y aluminio.** GARCIA RODRIGUEZ, M. P.; FORTEZA, J.; LORENZO, L. F., y NAJAC, N.

An. edafol. agrobiol. (1989), vol. 48, núm. 5-12, 557-573, 19 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Suelo, Raña, Perfil suelo, Diferenciación horizonte, Análisis químico, Oxido, Hierro, Aluminio, Granulometría, Gley, Pseudogley, Provincia Salamanca.

901493. **Water retention equations and their relationship with particle size distribution and bulk density for undisturbed samples.** ANDRIULO, A.; AMIOTTI, N., y PECORARI, C.

An. edafol. agrobiol. (1988), vol. 48, núm. 5-12, 575-590, 6 ref., ing., res. esp., bibl. ITGE.

* Modelo matemático, Ecuación matemática, Suelo, Perfil suelo, Retención, Porosidad, Estructura suelo.

901494. **Micronutrients distribution in grown soils (Fe and Zn) prediction equations of contents.** RUIZ-NIETO, A.; BARAHONA, E.; JAIME, S.; HUERTAS, F.; AGUILAR, A., y LINARES, J.

An. edafol. agrobiol. (1989), vol. 48, núm. 5-12, 605-613, 18 ref., ing., res. esp., bibl. ITGE.

* Suelo, Regresión estadística, Ecuación matemática, Suelo aluvionar, Hierro, Cinc, Silicato, Materia orgánica, Granulometría, Elemento nutriente, Provincia Málaga.

901495. **Contenido de azufre total en muestras superficiales de suelos de la provincia de La Coruña.** MERINO, A.; MONTERROSO, C., y GARCIA RODEJA, G.

An. edafol. agrobiol. (1989), vol. 48, núm. 5-12, 615-626, 19 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Suelo, Azufre, Materia orgánica, Granito, Gabro, Anfibolita, Pizarra, Fertilización, Prado, Agricultura, Provincia La Coruña.

901496. **Consideraciones acerca de las interrelaciones entre suelos, vegetación y paleoprocesos morfogenéticos en el Macizo de Ayllón y la Sierra de Alto Rey, sector oriental del Sistema Central.** IBAÑEZ, J. J.; FERNANDEZ GONZALEZ, F., y GARCIA ALVAREZ, A.

An. edafol. agrobiol. (1989), vol. 48, núm. 5-12, 637-647, 35 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Suelo, Control geomorfológico, Vegetación, Glacis, Macizo montañoso, Piedemonte, Plioceno, Pleistoceno, Hercínico Centro.

901498. **Relación entre algunas propiedades físico-químicas y las fracciones de fósforo en suelos naturales de Galicia, NO España.** TRASAR, M. C.; GIL SOTRES, F., y GUITIAN, F.

An. edafol. agrobiol. (1989), vol. 48, núm. 5-12, 665-679, 21 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Método estadístico, Método Hedley, Desviación típica, Suelo, Propiedad físico-química, Fósforo, pH, Materia orgánica, Galicia.

901499. **Distribución del fósforo en perfiles de suelos**

de Galicia, NO España. TRASAR, M. C.; GIL SOTRES, F., y GUITIAN, F.

An. edafol. agrobiol. (1989), vol. 48, núm. 5-12, 693-710, 30 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Suelo, Estructura suelo, Fósforo, Ranker, Podzol, Suelo pardo, Distribución estadística, Desviación típica, Galicia.

901500. **Influencia de la dilución en la desorción de cationes en andosoles y suelos ándicos.** ARBELO, C. D.; GARCIA HERNANDEZ, J. E., y HERNANDEZ MORENO, J. M.

An. edafol. agrobiol. (1989), vol. 48, núm. 5-12, 711-724, 15 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Suelo, Suelo poco evolucionado, Dilución, Desorción, Cation, Conductividad eléctrica, Canarias.

901502. **Estabilidad estructural de suelos afectados por sales. Revisión bibliográfica.** AMEZKETA, E., y ARAGÜES, R.

An. edafol. agrobiol. (1989), vol. 48, núm. 5-12, 765-785, 51 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Síntesis bibliográfica, Suelo, Estructura suelo, Estabilidad, Arcilla, Concentración, Ión, Floculación, Hinchamiento.

901503. **Factores formadores y características generales de los luvisoles desarrollados sobre materiales calizos y su distribución en la provincia de Valencia.** SORIANO SOTO, M. D.

An. edafol. agrobiol. (1989), vol. 48, núm. 5-12, 799-812, 31 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Suelo, Luvisol, Perfil suelo, Estructura suelo, Degradación, Erosión suelo, Caliza, Provincia Valencia.

901530. **Consideraciones sobre el impacto de la repoblación forestal en el suelo.** SERRADA, H.

Ecología (1990), núm. 1, 453-462, 16 ref., esp., bibl. ITGE.

* Suelo, Estudio impacto medio, Erosión suelo, Régimen hidrológico suelo, Bosque, Vegetación.

GEOQUIMICA

901497. **Composición geoquímica de unas ferricretas en el entorno de un monte isla de Ciudad Real.** JIMENEZ BALLESTA, R.; ALVAREZ GONZALEZ, A. M.; GUTIERREZ MARIANO, A., y REDONDO, E.

An. edafol. agrobiol. (1989), vol. 48, núm. 5-12, 649-664, 14 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Corteza ferruginosa, Suelo, Suelo ferralítico, Suelo esquelético, Laterita, Arenisca, Análisis mayores, Análisis menores, Dendrograma, Difracción RX, Monte isla, Provincia Ciudad Real.

901504. **Propiedades de intercambio iónico en tobas sálicas puniticas del sur de la Isla de Tenerife.** GARCIA HERNANDEZ, J. E.; NOTARIO, J. S., y GONZALEZ MARTIN, M.

An. edafol. agrobiol. (1989), vol. 48, núm. 5-12, 813-824, 20 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Cambio iónico, Zeolita, Piedra pómez, Toba volcánica, Sílice, Fosfato, Adsorción, Desorción, Análisis químico, Sustancia útil, Canarias, Isla Tenerife.

901537. **Análisis comparativo de los valores K(T) para el equilibrio cuarzo/solución de 0 a 100° C según los calibrados geotermométricos y las funciones utilizadas en programas de modelización geoquímica.** TENA, J. M.; AUQUE, L. F.; GIMENO, M. J.; FERNANDEZ, J., y MANDADO, J.

Estud. geol. (Madrid), vol. 46, núm. 1-2, 15-24, 42 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Geotermometría, Sílice, Cuarzo, Solubilidad, Temperatura, Termodinámica, Modelo.

901539. **Los carbonatos marinos aptienses del anticlinal de Santillana del Mar, Cantabria: procesos diagenéticos y su relación con los contenidos en Sr, Fe y Mn.** BUSTILLO, M., y FORT, R.

Estud. geol. (Madrid), vol. 46, núm. 1-2, 57-64, 39 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Roca carbonatada, Diagénesis tardía, Dolomitización, Dedolomitización, Análisis elemento traza, Hierro, Manganeso, Estroncio, Anticlinal, Cretácico Inf., Provincia Santander.

901568. **Datación radiogénica U-234/U-238 y Th-230/U-234 de sistemas travertínicos del Alto Tajo, Guadalajara.** ORDÓÑEZ, S.; GONZALEZ MARTIN, J. A., y GARCIA DEL CURA, M. A.

Geogaceta (1990), núm. 8, 53-55, 21 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

* Datación, U234-U238, Th-U, Travertino, Análisis elemento traza, Cuaternario, Río Tajo, Provincia Guadalajara.

GEOFISICA

901596. **Exploración geofísica: hacia más altos niveles de eficacia.** ITGE.

Ind. min. (1990), núm. 298, 43-46, esp., bibl. ITGE.

* Prospección, Método geofísico, Tratamiento dato, Ordenador, Interpretación, Instrumentación.

ECONOMIA MINERA

901535. **Estadística Minera de España 1988.** MINER. 315 pp., esp., bibl. ITGE.

* Estadística, Metal sustancia, Sustancia no metálica, Producción, Mano de obra, Productividad, Investigación, España.

NORMAS DE PUBLICACION PARA LOS AUTORES

Los trabajos inéditos que se reciban para su publicación en el BOLETIN GEOLOGICO Y MINERO serán revisados por un Comité editorial que decidirá si procede su publicación.

Los autores deberán atenerse a las siguientes normas:

Texto.

Se entregará paginado y mecanografiado a doble espacio por una sola cara y con amplios márgenes. Este texto se considerará definitivo, deberá venir leído por el autor y perfectamente puntuado y con las correcciones de las erratas de mecanografía que fuesen precisas. En él serán marcadas las fechas de recepción y aceptación.

Cuando en el trabajo se acompañen figuras, tablas y fotografías, el autor deberá dejar un pequeño espacio con indicación del lugar donde han de intercalarse, si es posible. En los originales de las mismas se reseñará el título del trabajo, así como el nombre de los autores.

Todos los trabajos en lengua española irán precedidos de un breve resumen en español e inglés o francés. Los de idiomas extranjeros lo llevarán en su idioma y también en español. Al final de los mismos, y en párrafo aparte, se incluirán las palabras clave, reservándose el último lugar para la localización geográfica, si la hubiere.

En todo momento los autores conservarán una copia del texto original y figuras.

Idiomas.

Excepcionalmente podrán publicarse trabajos en otros idiomas (preferiblemente inglés o francés), siempre que abarquen temas sobre España y sean de autores extranjeros.

Referencias.

Se incluirá al final de cada trabajo la relación de las obras consultadas por orden alfabético de autores, empleándose las normas y abreviaturas usuales.

Parte gráfica.

La parte gráfica vendrá preparada para ser reproducida a las anchuras máximas de 80 mm. (una columna) y 170 mm. (doble columna). Se evitará en lo posible la inclusión de encartes, así como se reducirá a lo indispensable el número de figuras, tablas y fotografías. En las ilustraciones a escala, ésta se expresará solamente en forma gráfica, con objeto de evitar errores en caso de reducir el original. Todas las figuras irán numeradas correlativamente según su orden de inserción.

Las figuras serán originales y nunca copiativos, delineadas con tinta china sobre papel vegetal. Las tablas, bien presentadas para su reproducción fotográfica. Las fotografías serán positivos en blanco y negro sobre papel brillo y excepcionalmente en color (positivo en brillo o transparencia).

Pruebas.

Serán enviadas a los autores para que realicen las correcciones de erratas de imprenta producidas en la composición, no admitiéndose modificación alguna, adición o supresión al texto original.

Las pruebas serán devueltas por el autor en el plazo máximo de diez días, pasados los cuales la Redacción decidirá entre retrasar el trabajo o realizar ella misma la corrección, declinando la responsabilidad por los errores que pudieran persistir.

Los originales de texto y figuras quedarán en poder de la Redacción.

Tiradas aparte.

Se asignan 30 tiradas aparte con carácter gratuito por trabajo publicado. Cuando el autor desee un número mayor del indicado deberá hacerlo constar por escrito en las pruebas y abonar el precio de este excedente.

La Redacción del BOLETIN GEOLOGICO Y MINERO introducirá cuantas modificaciones sean necesarias para mantener los criterios de uniformidad y calidad del mismo. De estas modificaciones se informará al autor.

TARJETA DE SUSCRIPCION AL BOLETIN GEOLOGICO Y MINERO

Boletín Geológico y Minero

Revista bimestral de geología, minería y ciencias conexas

DIRECCION, REDACCION Y PUBLICACION

Instituto Tecnológico GeoMinero de España

Ríos Rosas, 23 - 28003-Madrid, España

ADMINISTRACION, DISTRIBUCION Y SUSCRIPCION

Centro de Publicaciones del Ministerio de Industria, Comercio y Turismo

Doctor Fleming, 7, 2.º - 28036-Madrid, España
Teléfono: 250 02 03

Suscrip. anual (6 núms.). Año 1991: 4.800 ptas.
Suscrip. anual (6 núms.). Año 1992: 5.280 ptas.

Nombre, Organismo o Empresa
Profesión
Dirección Teléfono
Ciudad (provincia) D. P.
País FIRMA
Fecha

BOLETIN GEOLOGICO Y MINERO

ACUSE DE RECIBO

HEMOS RECIBIDO
WE HAVE RECEIVED
NOUS AVONS RECU

NOS FALTA
WE ARE IN WANT OF
IL NOUS MANQUE

FECHA
DATE

FIRMA
SIGNATURE

NOMBRE
NAME
NOM

DIRECCION
ADDRESS
ADRESSE

ROGAMOS DEVUELVAN ESTE ACUSE DE RECIBO, NECESARIO PARA NUESTRO CONTROL, Y DIRIGIDO EXCLUSIVAMENTE A AQUELLOS CENTROS QUE RECIBEN ESTA PUBLICACION CON CARACTER GRATUITO EN REGIMEN DE INTERCAMBIO.

Toda la correspondencia referente a las publicaciones
deberá dirigirse a:

Leopoldo Aparicio Ladrón de Guevara. Instituto Tecnológico GeoMinero de España

Ríos Rosas, 23. 28003-Madrid

Instituto Tecnológico GeoMinero de España

Finalidad:

Investigación, Desarrollo Tecnológico y Asistencia técnica en Geología, Minería y Disciplinas conexas

GEOLOGIA Y GEOFISICA



MAPA GEOLOGICO NACIONAL (MAGNA)
ESTUDIOS GEOLOGICOS Y CARTOGRAFIA TEMATICA
GEOFISICA Y GEOLOGIA DEL SUBSUELO
GEOLOGIA MARINA (FONDOS MARINOS)
TELEDETECCION APLICADA

RECURSOS MINERALES



METALOGENIA Y CARTOGRAFIA METALOGENETICA
GEOQUIMICA BASICA Y APLICADA
YACIMIENTOS MINERALES
EVALUACION DE RESERVAS E INVENTARIO DE RECURSOS

AGUAS SUBTERRANEAS



CARTOGRAFIA HIDROGEOLOGICA
PROTECCION DE RECURSOS HIDROGEOLOGICOS
EVALUACION Y CONTROL DE ACUIFEROS SUBTERRANEOS
RECURSOS GEOTERMICOS

LABORATORIOS Y ENSAYOS



ANALISIS QUIMICOS Y MINERALOGICOS
ENSAYOS MINERALURGICOS Y GEOTECNICOS
CARACTERIZACION DE ROCAS MINERALES INDUSTRIALES
SONDEOS DE INVESTIGACION HIDROGEOLOGICA Y MINERA
ENSAYOS DE BOMBEO

INFORMACION, DOCUMENTACION Y BANCO DE DATOS



FONDOS DOCUMENTALES Y BASES DE DATOS
SISTEMAS DE INFORMACION Y COMUNICACIONES
CATASTRO MINERO
PUBLICACIONES

INGENIERIA GEOAMBIENTAL



RIESGOS GEOLOGICOS
RESTAURACION DEL MEDIO AMBIENTE MINERO
GEOTECNIA Y GEOLOGIA APLICADA A LA INGENIERIA
MEDIO AMBIENTE Y ORDENACION DEL TERRITORIO

DESARROLLO MINERO



PROCESOS Y TECNOLOGIAS
SEGURIDAD MINERA
NORMATIVA
ESTUDIOS DE ECONOMIA MINERA

MUSEO GEOMINERO

Sede Central:

c/ Ríos Rosas, 23. 28003 MADRID
Tel.: 441 65 00 – Fax: 442 62 16

Centro de Laboratorios:

c/ La Calera, 1 28760 TRES CANTOS (MADRID)
Tel.: 803 22 00



Instituto Tecnológico
GeoMinero de España

MINISTERIO DE INDUSTRIA, COMERCIO Y TURISMO
SECRETARIA GENERAL DE LA ENERGIA Y RECURSOS MINERALES

