



Instituto Tecnológico  
GeoMinero de España

**boletín**

**geológico**

**y minero**

VOLUMEN 102

Mayo - Junio 1991

NUMERO 3



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 3

Mayo - Junio 1991

# boletín geológico y minero



revista bimestral de geología, minería y ciencias conexas

fundada en 1874 - 5.ª serie

## Sumario

<b>Geología</b>	O. APALATEGUI ISASI y R. SANCHEZ CARRETERO: Síntesis y correlación de unidades en el borde meridional de la Zona de Ossa-Morena (ZOM): Implicaciones geológicas ... ..	3
	J. ESTALRICH: El programa COLUMNNA para el dibujo automático de columnas estratigráficas ... ..	12
<b>Minería</b>	G. OVEJERO ZAPPINO: Mineralizaciones Zn-Pb ordovícicas del anticlinorio de Bossost. Yacimientos de Liat y Victoria. Valle de Arán. Pirineo (España) ... ..	20
<b>Aguas subterráneas</b>	A. NAVARRO ALVARGONZALEZ: Las sequías. Repercusiones especialmente en aguas subterráneas ... ..	42
<b>Ingeniería GeoAmbiental</b>	B. MARISCAL: Características ambientales durante el Holoceno en las Pilas de Mojácar. Análisis políceno en la Cuenca del río Aguas ...	58
<b>Geoquímica</b>	S. DEL BARRIO MARTIN: Estudio e investigación de un espectrómetro de emisión plasma ICP aplicado a la prospección geoquímica multi-elemental. Parte III: Optimización de parámetros instrumentales. Corrección de interferencias. Aplicaciones ... ..	64
<b>Geotecnia</b>	F. LOPEZ GONZALEZ-MESONES: Estudio experimental sobre el hinchamiento de los suelos que contienen sales solubles ... ..	102
<b>Rocas industriales y ornamentales</b>	R. M. ESBERT, C. GROSSI, J. ORDAZ y F. J. ALONSO: La conservación de la piedra de la Casa Milá («La Pedrera» de Gaudí, Barcelona): Pruebas preliminares ... ..	110
<b>Estudio de minerales y rocas</b>	M. AMICE, J.-L. BOUCHEZ, A. ARANGUREN, F. ALVAREZ y J.-L. VIGNERESSE: El batolito granítico de Cabeza de Araya (Extremadura): comparación de sus estructuras magmáticas y magnéticas ... ..	119
<b>Información</b>	C. ARANZADI: La actualidad minera ante el mercado interior europeo.	136
	Noticias y Notas Bibliográficas ... ..	141

### 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 TECNOLÓGICO  
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

## Síntesis y correlación de unidades en el borde meridional de la Zona de Ossa-Morena (ZOM): Implicaciones Geológicas.

Por O. APALATEGUI ISASA (1) y R. SANCHEZ CARRETERO (1)

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

Vista desde el sur de la Montaña de Taco. Corresponde a un cono volcánico de escorias, situado en la plataforma de Buenavista (Isla de Tenerife). En el cráter puede observarse un depósito para la regulación del suministro de agua.

(Foto: F. Bellido Mulas)

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

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

### RESUMEN

Las unidades, hasta ahora reconocidas, en el borde meridional de la Zona de Ossa-Morena (Unidad de Arroyomolinos, Unidad de Cumbres-Hinojales, Unidad de Herrerías-Sierra del Alamo, Unidad de Terena, Macizo de Aracena y Unidad de Pulo do Lobo) son agrupadas en tres conjuntos estructurales. Uno, que corresponde a un autóctono relativo (Unidad de Arroyomolinos y Macizo de Aracena); y los otros dos, representados por mantos de cabalgamiento (Manto inferior y superior), de gran envergadura, vergentes al sur y formados por secuencias paleozoicas correlacionables.

La afinidad oceánica de algunos de los elementos que integran dichos mantos, plantea el problema de la ubicación original de los mismos; es por ello que se propone la existencia de un surco subsidente y/o océano en el borde septentrional de la Zona de Ossa Morena.

*Palabras clave:* Unidades, Mantos, Tectónica tangencial, Obducción, Ofiolita, Hercínica, Zona Ossa-Morena, SO España.

### ABSTRACT

The units, till now acknowledge, in the southern border of the Ossa-Morena Zone (Arroyomolinos Unit, Cumbres-Hinojales Unit, Herrerías-Sierra del Alamo Unit, Terena Unit, Aracena Massif and Pulo do Lobo Unit) are grouped in three structural ensembles. One that correspond a relative autochthom (Arroyomolinos Unit and Aracena Massif) and the others two, represented by nappes (lower and upper nappe) of big scope vergent to the South, formed by paleozoical correlationable sequences.

The oceanic affinity of some elements that constitute that nappes, pose the problem of their original position; therefore is it that propose the existence of a profund furrw and/or ocean in the northern border of the Ossa-Morena Zone.

*Key words:* Units, Nappes, Tangential tectonic, Obduction, Ophiolite, Hercynian, Ossa-Morena Zone, SW Spain.

### 1. INTRODUCCION Y CARACTERISTICAS DE LAS DISTINTAS UNIDADES

Uno de los rasgos fundamentales del borde meridional de la Zona de Ossa-Morena (ZOM) es el estar constituido por una serie de Unidades yuxtapuestas con características estratigráficas y tectonometamórficas propias.

Los límites actuales entre dichas Unidades son en muchos casos el conjunto de desgarres tardihercínicos sinextrosos tan característicos de

la ZOM; en otros, por el contrario, se conservan los límites originales, que como veremos los interpretamos como mantos vergentes al sur.

Dentro del área considerada (entre el eje Olivenza Monesterio y la Zona Surportuguesa), las Unidades reconocidas de norte a sur son (ver fig. 1):

Unidad de Arroyomolinos.  
Unidad de Cumbres-Hinojales.  
Unidad de Herrerías-Sierra del Alamo.  
Unidad de Terena.  
Macizo de Aracena.  
Unidad del Pulo do Lobo.

(1) Investigaciones Geológicas y Mineras, S. A. (INGEMISA). Avda. Virgen de las Angustias, 16. 14006 Córdoba.



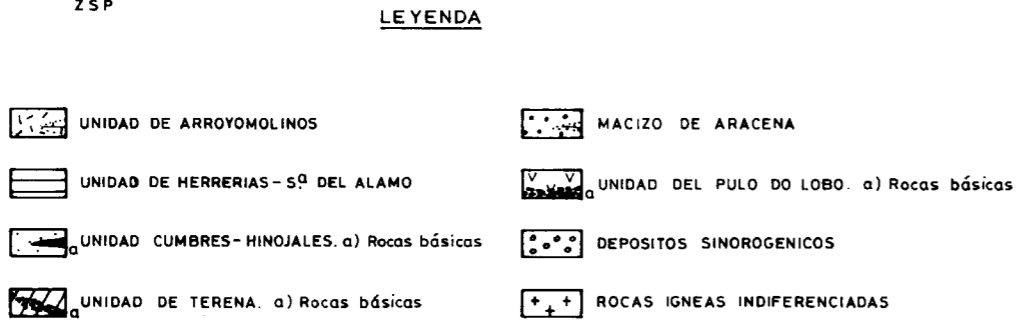
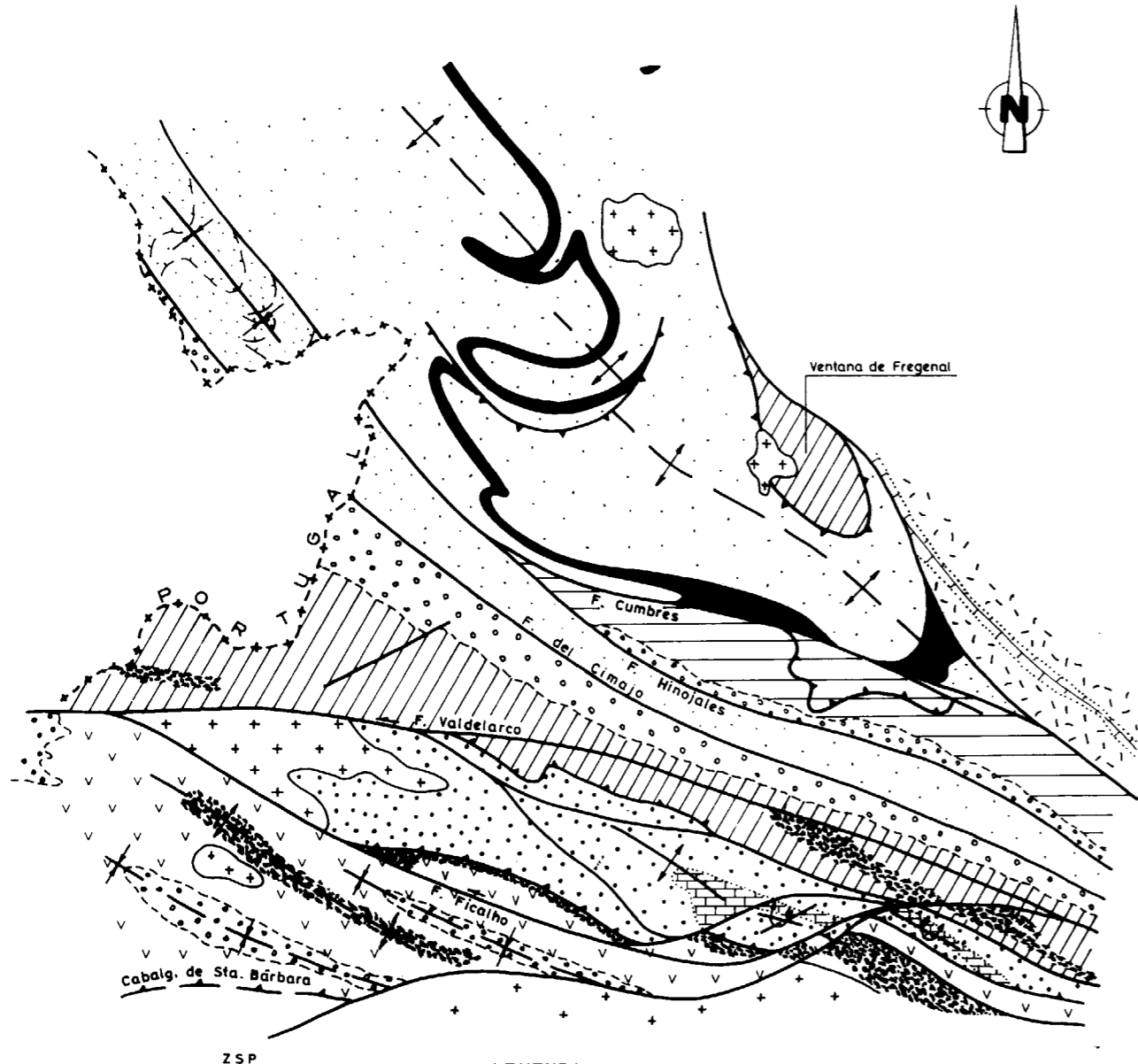


Figura 1.—Esquema geológico del SO peninsular.

La Unidad de Arroyomolinos presenta una secuencia de materiales precámbricos constituidos por el techo de la Serie Negra (Sucesión Tentudia; EGUILUZ et al., 1984); sobre la cual, y en discordancia, se dispone el complejo volcánico de Bodonal-Cala que hacia el techo pasa a una sucesión detrítica con fauna del Cámbrico Inferior (Capas de Arroyomolinos).

La estructura de esta Unidad es muy simple, y corresponde a una secuencia monoclinl muy verticalizada y/o invertida, en la que los materiales son progresivamente más modernos hacia el sur (ver fig. 2).

La Unidad de Cumbres-Hinojales muestra una secuencia paleozoica muy completa, fundamentalmente metadetrítica, con intercalaciones de rocas básicas alcalinas de edad Cámbrico Medio (espilitas de la Umbría-Pipeta; BARD, 1969). En esta Unidad es posible que esté representado todo el Cámbrico y el Ordovícico Inferior de forma ininterrumpida; sobre ellos se depositan materiales de edad Silúrico-Devónico Inferior.

Esta Unidad presenta una estructura con desarro-

llo primero de grandes pliegues tumbados vergentes al sur, que son posteriormente replegados (VAUCHEZ, 1967) (ver fig. 2).

La Unidad de Herrerías-Sierra del Alamo presenta una secuencia de materiales de edad Cámbrico Inferior-Medio, sobre los que reposan, en discordancia, unos depósitos sinorogénicos marinos compuestos por brechas y conglomerados, equivalentes al flysch Terena, pero de carácter más proximal.

Los materiales de esta Unidad aparecen delimitados entre las fallas de Cumbres e Hinojales, en un afloramiento en forma de cuña, y muestran una estructura monoclinl muy verticalizada, con techo hacia el sur, complicada por algún pliegue menor. En esta Unidad se observan los restos de un manto de materiales cámbricos, en las proximidades de Hinojales (ver fig. 2).

La Unidad de Terena la integran, de muro a techo, los esquistos de El Cubito, los esquistos de Barrancos, una pequeña lámina de materiales silúricos y, sobre ellos, de forma discordante, los depósitos sinorogénicos del flysch Terena. Tan-

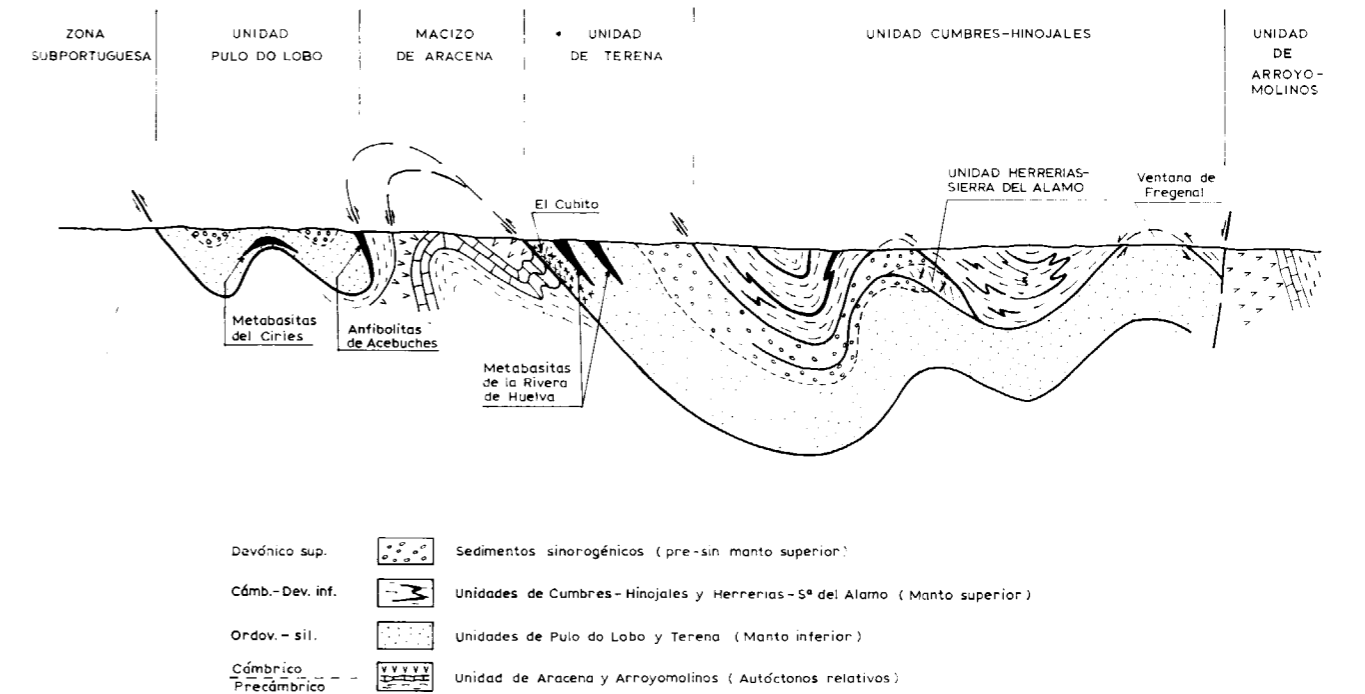


Figura 2.—Corte esquemático reconstruido del área considerada.

to en los esquistos de El Cubito como en las Pizarras de Barrancos, aparecen intercalaciones de rocas básicas de naturaleza toleítica (APALATEGUI et al., en prensa), conocidas como Metabasitas de la Ribera de Huelva (BARD, 1969). Esta Unidad parece prolongarse hacia el norte en la ventana de Fregenal (ver figs. 1 y 2), donde vuelven a aparecer los esquistos de Barrancos, posiblemente junto a sucesiones inferiores (esquistos de Fatuquedo).

El Macizo de Aracena presenta, de muro a techo, la siguiente sucesión de materiales (BARD, 1969): Formación de la Umbría, Dolomías de Aracena, Formación vulcanosedimentaria ácida y Metabasitas de la Corte.

Geoméricamente, por encima de estos materiales aparecen los denominados Esquistos de El Cubito, que sirven de nexos de unión entre estos materiales, y la Unidad de Terena. Ninguna de estas formaciones ha sido datada, sin embargo se acepta que la serie de la Umbría es de edad Precámbrico y la formación carbonatada es muy posiblemente Cámbrico Inferior.

La estructura de esta Unidad es compleja, y se caracteriza por la existencia de una serie de bandas de cizalla que aíslan varias cuñas o zonas dentro de ella (APALATEGUI et al., 1983, 1984; FLORIDO y QUESADA, 1984; CRESPO-BLANC, 1987). La estructura cartográfica más significativa es el anticlinal de Fuenteheridos-La Umbría, que es una estructura vergente al SO de tercera fase hercínica (ver fig. 2).

La Unidad del Pulo do Lobo presenta en la base un conjunto de rocas básicas que incluye las anfibolitas de Acebuches (BARD, 1969), que hacia el sur se prolonga por las metabasitas de la Antiforma del Ciries (APALATEGUI et al., 1983-1984). Sobre estas rocas se disponen, en territorio español, unas sucesiones metadetríticas correlacionables a los Grupos Pulo do Lobo y Ferreiras-Firralho (CARVALHO et al., 1976). El carácter oceánico de las rocas básicas del muro de esta Unidad fue puesto de manifiesto por BARD (1977) y BARD y MOINE (1979), que los interpretan como restos de una pila basáltica; posteriormente MUNHA et al. (1986-1989) indican que es el techo de una secuencia ofiolítica.

El conjunto metadetrítico lo integran esquistos, filitas y cuarzovacas hacia la base (Formaciones

Pulo do Lobo y Riberas de Lima) y sobre ellos y discordante se deposita un flysch sinorogénico (Formación Santa Iría), de edad Devónico Superior (OLIVEIRA et al., 1987, y LAKE, en CRESPO-BLANC, 1989).

La estructura de esta Unidad es compleja; las más visibles son las estructuras más tardías, como el Anticlinal del Ciries, que afecta a una secuencia repetida por un pliegue previo isoclinal (ver fig. 2).

## 2. ANALISIS DE LOS LIMITES ENTRE UNIDADES

A continuación se aborda el estudio de los límites entre las distintas Unidades diferenciadas.

El límite sur del Macizo de Aracena ha sido tradicionalmente objeto de atención, ya que representa la más meridional de las Unidades con caracteres claramente ossamorénicos. Dicho límite ha sido situado tradicionalmente en la falla de Ficalho (BARD, 1971; JULIVERT et al., 1974; OLIVEIRA, 1983; RIBEIRO, 1983), al norte del cual quedarían aislados, según dichos autores, las rocas metamórficas del Macizo de Aracena, que incluiría el conjunto de sucesiones descritas en este trabajo, más las anfibolitas de Acebuches. Actualmente este límite se sitúa al norte de los afloramientos de dichas anfibolitas (APALATEGUI et al., 1983-1984; FLORIDO y QUESADA, 1984), y corresponde a una zona de cizalla dúctil de varios centenares de metros (CRESPO-BLANC y OROZCO, 1988), en el que se desarrolla una zona de «melange» en condiciones desde epizonales a catazonales llamado «Nivel de Mezcla» (CRESPO-BLANC, 1989).

El buzamiento de dicho accidente es hacia el NE, y aparentemente se observa un cabalgamiento del Macizo de Aracena sobre la base de la Unidad del Pulo do Lobo (Anfibolitas de Acebuches). Este accidente también se puede interpretar como un cabalgamiento invertido de la Unidad del Pulo do Lobo sobre la Unidad del Macizo de Aracena (las relaciones cinemáticas parecerían las mismas), tal y como se expresa en la figura 2. Esto implica el emplazamiento hacia el sur de la Unidad del Pulo do Lobo sobre el Macizo de Aracena, que posteriormente es plegada e invertida. Por otra parte, el metamorfismo cata-

zonal que afecta a ambas Unidades y el magmatismo básico a él asociado es posterior al emplazamiento de la Unidad alóctona. La inversión de las formaciones, del cabalgamiento y de las isogradas de metamorfismo se produce con posterioridad, durante la última fase de plegamiento hercínico (flanco invertido del Anticlinal de Fuenteheridos-La Umbría).

Hacia el norte, el Macizo de Aracena conecta con las series detríticas de la Unidad de Terena, que se disponen en posición normal. Según BARD (1969) y FLORIDO y QUESADA (1984) se trata de una sucesión monoclinial normal en la que aparece una secuencia interrumpida sólo por la falla de Valdelarco. Esta hipótesis ha sido cuestionada por APALATEGUI et al. (1983-1984), que interpretan los esquistos del Cubito, como una banda muy deformada en el que quedan involucrados materiales de las Unidades que separa. ABALOS (1987), en el núcleo de Almadén de la Plata, y CRESPO-BLANC (1987), en el Macizo de Aracena, individualizan los Esquistos de El Cubito como una Zona o Unidad independiente de ellos.

Este límite suponemos que es la prolongación, en posición normal, del límite meridional del Macizo de Aracena, si bien aquí la base de la Unidad cabalgante no está exclusivamente formada por rocas básicas epi-catazonales, sino metasedimentos y rocas básicas epizonales (ver fig. 2).

El límite entre la Unidad de Terena y la Unidad de Cumbres-Hinojales es una falla de traza rectilínea, interpretada como un desgarre sinextroso (Falla del Cimajo), en el que aparecen pellizcados restos de materiales precámbricos y paleozoicos, en ocasiones metamorfizados.

El límite entre estas dos Unidades vuelve a verse en la ventana de Fregenal, donde se observa que la Unidad de Cumbres-Hinojales está despegada sobre la de Terena a nivel de las calizas del Cámbrico Inferior.

La Unidad de Herrería-Sierra del Alamo aparece en medio de la Unidad de Cumbres-Hinojales, en un afloramiento limitado por dos fallas longitudinales (Fallas de Cumbres e Hinojales) anastomosadas, que en épocas tardihercínicas provocaron la individualización del bloque que definían. La estructura en dicho bloque es, como ya hemos indicado, subvertical, y contrasta con la estructura de pliegues tumbados replegados de la Uni-

dad Cumbres-Hinojales. Otro elemento a tener en cuenta en esta Unidad es la presencia de depósitos sinorogénicos correlacionables con el flysch Terena.

El límite entre la Unidad de Cumbres Hinojales y la de Arroyomolinos no está aún cartografiado, pero parece tratarse de una falla longitudinal que pasaría por las proximidades de Fregenal y Arroyomolinos (ver fig. 2).

## 3. ESQUEMA GEOLOGICO GENERAL

En base a las secuencias paleozoicas reconocidas en cada una de las Unidades definidas, a su estructura, a la naturaleza de sus contactos, y a sus relaciones con los depósitos sinorogénicos, se puede plantear el siguiente esquema general.

La Unidad del Pulo do Lobo es la prolongación hacia el sur de la Unidad de Terena, y ambas corresponderían a los restos de un gran manto emplazado hacia el sur en condiciones dúctiles, integrado por elementos oceánicos, y con una secuencia paleozoica relativamente completa. Según esta propuesta se puede plantear una correlación similar a la sugerida por BARD (1969), según la cual la formación Pulo do Lobo sería el equivalente a los Esquistos de El Cubito y de Barrancos, y las metabasitas de la Ribera del Ciries y las anfibolitas de Acebuches, serían el equivalente a las metabasitas de la Ribera de Huelva (ver figs. 2 y 3).

El límite meridional de este gran manto es el cabalgamiento de Santa Bárbara, al sur del cual aparece la Zona Surportuguesa (ZSP). Las relaciones originales entre la ZOM y la ZSP quedarían fosilizadas por dicho manto. Según esta hipótesis, es más que cuestionable la existencia de una sutura (Ofiolita Beja-Acebuches) como límite entre ambas zonas, tal como ha sido propuesto recientemente (MUNHA et al., 1986, 1989; CRESPO-BLANC y OROZCO, 1988; QUESADA, 1990, 1991).

Sobre este manto se depositaron sedimentos sinorogénicos, representados por el flysch de Terena, al norte, y el de Santa Iría, al sur. Su depósito se produjo en una cuenca marina abierta hacia el sur, inducido por un frente tectónico que avan-

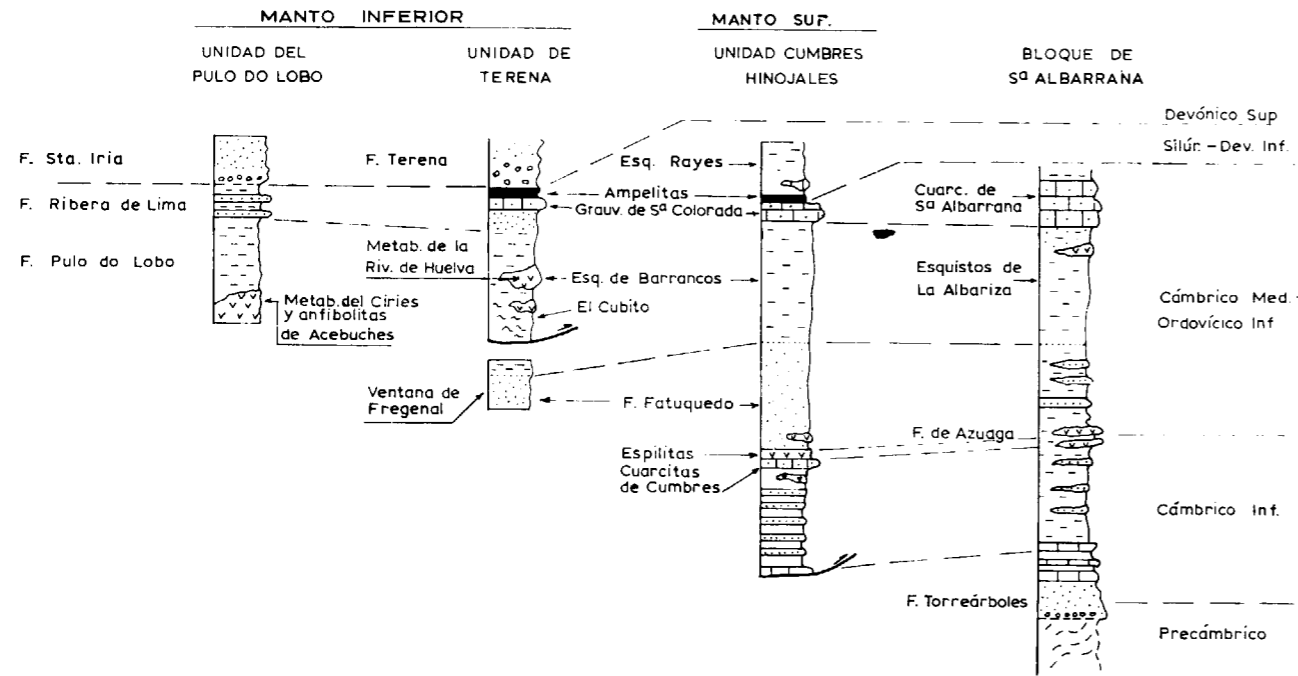


Figura 3.—Ensayo de correlación entre los distintos materiales paleozoicos aflorantes en el borde meridional de la ZOM y del bloque de Sierra Albarrana.

zaba desde el norte (SANTIESTEBAN et al., 1990). Dicho frente debió ser otro manto de emplazamiento más superficial (alcanza la superficie) representado actualmente por la Unidad de Cumbres-Hinojales, e integrado por una secuencia paleozoica muy completa, con elementos correlacionables con los del manto inferior (ver figuras 2 y 3).

Las Unidades del Macizo de Aracena, y de Arroyomolinos, representan el autóctono relativo de estos mantos, y estarían formadas por materiales precámbricos y otros de edad Cámbrico de marcado carácter volcánico (ver fig. 2).

La Unidad de Herrerías-Sierra del Alamo plantea ciertos problemas en cuanto a su interpretación. La secuencia de materiales cámbricos reconocidos es similar a la de la Unidad Cumbres-Hinojales; sin embargo, se diferencia de ella por la presencia de depósitos sinorogénicos discordantes sobre el Cámbrico Medio. Particularmente sospechamos que esta Unidad es un trozo desgajado de la de Cumbres-Hinojales, y que ha sido cabalgada por ella durante su emplazamiento (ver fig. 2).

En la ventana de Fregenal aparecen sedimentos Cambro-Ordovícicos que deben representar la prolongación septentrional de la Unidad de Terena. El hecho de que en este afloramiento aparezcan metasedimentos de dicha edad, induce a pensar que las anfibolitas de Acebuches no corresponderán al techo de una lámina ofiolítica, sino a los restos de una gran colada, tal y como propusieron BARD (1969, 1977) y BARD y MOINE (1979) (este dato hay que tomarlo, de todas formas, con ciertas reservas, hasta que no haya dudas sobre las premisas sobre las que se sustenta).

La edad de emplazamiento, del más profundo de los mantos, es pre-Viseense, edad de enfriamiento del metamorfismo catazonal del Macizo de Aracena (DALMEYER et al., en prensa), que lo afecta. La edad del manto superior es la de los depósitos sinorogénicos discordantes que fosiliza, es decir, Devónico Superior. Con estos datos no se puede precisar la secuencia de emplazamiento, si bien son compatibles con una secuencia de tipo «forward».

Al norte del área considerada aparecería de nue-

vo el autóctono relativo, representado por la Unidad de Arroyomolinos, que guarda grandes similitudes con la Unidad de Aracena.

#### 4. CONSIDERACIONES GENERALES A NIVEL DE LA ZOM

La hipótesis que planteamos implica la existencia de surcos paleozoicos, e incluso de un océano o microocéano, al norte del área considerada, en un sector en el que las vergencias de las estructuras fuera hacia el sur.

No conocemos ninguna sutura en la que situar la raíz de estos mantos, por lo que su ubicación se traduce en la localización de un surco subsidente de edad Paleozoico Inferior.

El registro paleozoico de la ZOM, a excepción de los materiales de dicha edad aquí considerados, corresponden a los afloramientos del Sinclinal del Valle y del Cerrón del Hornillo, y son depósitos de mayor profundidad que los de la ZCI, con un registro fósil fundamentalmente pelágico (GUTIERREZ MARCOS, 1982; RACHEBOEUF y ROBARDET, 1986; ROBARDET y GUTIERREZ MARCOS, 1990).

Ultimamente se ha atribuido también al Cámbrico-Ordovícico Inferior la secuencia de materiales metadetríticos del Bloque de Sierra Albarrana (APALATEGUI et al., 1983), que incluiría la Formación de Azuaga, los Micaesquistos de la Albariza y la Cuarcita de Sierra Albarrana (DELGADO QUESADA, 1971); lo que representaría, en conjunto, una sucesión de al menos 5.000 metros de sedimentos. Estas formaciones presentan claras analogías con las Unidades de Cumbres-Hinojales y de Terena, con las que se propone su correlación (ver fig. 3).

Las series detríticas del Bloque de Sierra Albarrana, así como el resto de los materiales paleozoicos considerados, debieron depositarse en un surco subsidente de edad Paleozoico Inferior, instalado sobre una corteza continental adelgazada. Las primeras deben representar restos del borde meridional de dicha cuenca; las series paleozoicas cabalgantes del borde sur de la ZOM deben proceder de zonas más internas, sobre todo la correspondiente al manto inferior, que es la que presenta mayores rasgos oceánicos.

En el borde meridional de la ZOM, y a excepción del de las Unidades alóctonas, el registro paleozoico es escaso (Cámbrico y Devono-Carbonífero), por lo que es posible que funcionase como un umbral durante dicha época.

En definitiva, proponemos la existencia de un surco oceánico, de edad Paleozoico Inferior, al norte del área considerada, posiblemente en el borde norte de la ZOM; la formación de este surco, «Surco Ibérico», estaría ligado a un proceso extensivo generalizado que sería el factor determinante en el proceso de diferenciación de la ZOM respecto a la ZCI.

Por último indicar que la existencia de un surco oceánico, en el borde norte de la ZOM, permite plantear la correlación de las Unidades alóctonas de la ZOM, con las del NO peninsular, en base al supuesto de que ambos procedan de una misma cuenca obducida, que participaría en ambas ramas de la cadena (ver fig. 4). El cierre y obduc-

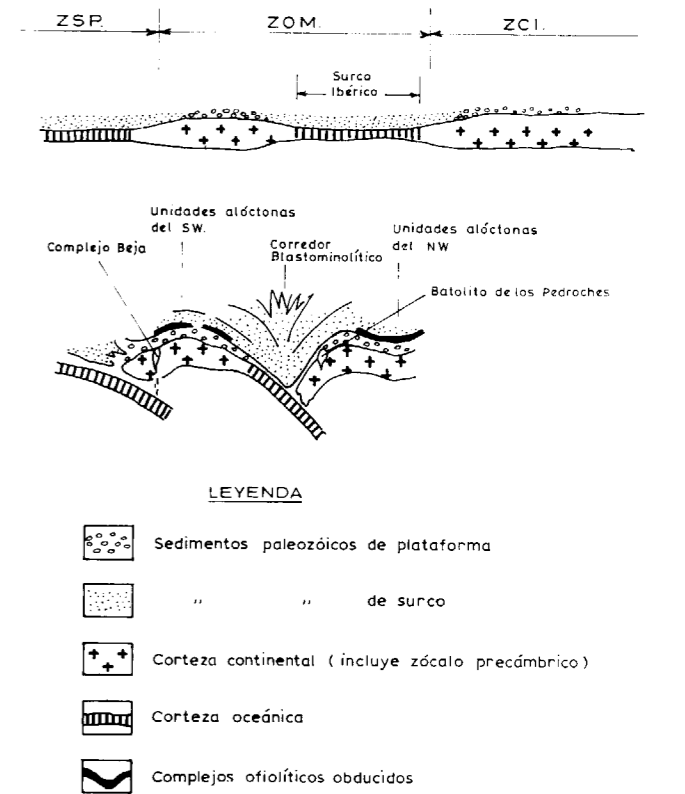


Figura 4.—Esquema sintético de evolución de la ZOM y de la ZCI.



ción de este surco tiene lugar durante la Orogenia Hercínica, coincidiendo con la zona axial de la Cadena; posteriormente, y debido al carácter transpresivo de la deformación, se produce su rotura y laminación, hasta quedar restringida a una banda de materiales miloníticos emalada en un conjunto de fallas sinextrosas anastomosadas, conocido como corredor blastomilonítico.

#### REFERENCIAS

- ABALOS, B. (1987): *Tectónica y metamorfismo en el Núcleo de Almadén de la Plata*. Tesis Lic., Univ. País Vasco, 174 pp.
- APALATEGUI, O.; BARRANCO, E.; CONTRERAS, F., y ROLDAN, F. J. (1983): *Mapa y memoria explicativa de la Hoja 1:50.000, núm. 916 (Aroche), del Mapa Geológico Nacional (MAGNA)*. ITGE, Madrid.
- APALATEGUI, O.; BARRANCO, E.; CONTRERAS, F.; DELGADO QUESADA, M., y ROLDAN, F. J. (1964): *Mapa y memoria explicativa de la Hoja 1:50.000, núm. 917 (Aracena), del Mapa Geológico Nacional (MAGNA)*. ITGE, Madrid.
- APALATEGUI, O.; BORRERO, J. D., y HIGUERAS, P. (1983): *División en Grupos de Rocas en Ossa-Morena Oriental*. 5.ª Reunión del GOM. Temas Geol. Min., 73-80.
- APALATEGUI, O.; CONTRERAS, F.; EGUILUZ, L., y QUESADA, C. (en prensa): *Mapa y memoria explicativa de la Hoja 1:50.000, núm. 918 (Santa Olalla del Cala), del Mapa Geológico Nacional (MAGNA)*. ITGE, Madrid.
- BARD, J. P. (1969): *Le métamorphisme régional progressif des Sierras d'Aracena en Andalousie Occidentale (Espagne). Sa place dans le segment hercynien sub-ibérique*. Thèse Doct. Univ. Montpellier, 355 pp.
- BARD, J. P. (1971): *Sur l'alternance des zones métamorphiques et granitiques dans le segment hercynien sub-ibérique: comparaison de la variabilité des caractères géotectoniques de ces zones avec les orogènes «orthotectoniques»*. Bol. Geol. y Minero, t. LXXXII-III-IV, 108-128.
- BARD, J. P. (1977): *Signification tectonique des métatholites d'affinité abyssale de la ceinture métamorphique de basse pression d'Aracena (Huelva, Espagne)*. Bull. Soc. Géol. France, 2: 385-393.
- BARD, J. P., y MOINE, B. (1979): *Acebuches amphibolites in the Aracena hercynian metamorphic belt (southwest Spain): Geochemical variations and basaltic affinities*. Lithos, 12: 271-282.
- CARVALHO, D.; CORREIA, M., e INVERNO, C. (1976): *Contribuição para o conhecimento geológico do Grupo de Ferreira-Ficalho. Suas relações com a Faixa Piritosa e o Grupo do Pulo do Lobo*. Mem. Not. Mus. Lab. Min. Facultad Ciênc. Coimbra, 82: 145-169.
- CRESPO-BLANC, A. (1987): *El Macizo de Aracena (macizo Ibérico Meridional): Propuesta de división sobre la base de nuevos datos estructurales y petrográficos*. Bol. Geol. Min. España, XCVIII-IV: 507-515.
- CRESPO-BLANC, A., y OROZCO, M. (1988): *The Southern Iberian Shear Zone: a major boundary in the Hercynian folded belt*. Tectonophysics, 148: 221-227.
- CRESPO-BLANC, A. (1989): *Evolución geotectónica del contacto entre la Zona de Ossa-Morena y la Zona Surportuguesa en las sierras de Aracena y Aroche (Macizo Ibérico Meridional): un contacto mayor en la cadena hercínica europea*. Tesis Univ., Sevilla.
- DALLMEYER, R. D.; FONSECA, P.; QUESADA, C., e RIBEIRO, A. (in prep.): *40Ar/39 Ar mineral age constraints to the tectonothermal evolution of the Variscan suture in SW Iberia*.
- DELGADO QUESADA, M. (1971): *Esquema geológico de la Hoja núm. 878 de Azuaga (Badajoz)*. Bol. Geol. Min. España, 82: 277-286.
- EGUILUZ, L.; FERNANDEZ CARRASCO, J.; COULLAUT, J. L., y GARROTE, A. (1984): *Mapa y memoria explicativa de la Hoja 1:50.000, núm. 897 (Monesterio), del Mapa Geológico Nacional (MAGNA)*. ITGE, Madrid.
- FLORIDO, P., y QUESADA, C. (1984): *Estado actual de conocimientos sobre el Macizo de Aracena*. Cuad. Lab. Xeol. Laxe, 8: 257-277.
- GUTIERREZ MARCO, J. C. (1982): *Descubrimiento de nuevos niveles con graptolitos ordovícicos en la unidad «Pizarras con Didymograptus»*. SCHNEIDER, H. (1939). *Provincia de Huelva, SO de España*. Comm. Serv. Geol. Portugal, 68: 241-246.
- JULIVERT, M.; FONTBOTE, J. M.; RIBEIRO, A., y CONDE, L. N. (1974): *Mapa Tectónico de la península Ibérica y Baleares, E. 1:1.000.000*. Serv. Publ. Minist. Ind., 113 pp.
- MUNHA, J.; OLIVEIRA, J. T.; RIBEIRO, A.; QUESADA, C.; FONSECA, P., y CASTRO, P. (1989): *Accreted Terranes in Southern Iberia: The Baja-Acebuches Ophiolite and related Oceanic Sequences*. 28.º International Geological Congress, Washington, Abstract.
- MUNHA, J.; OLIVEIRA, J. T.; RIBEIRO, A.; OLIVEIRA, V.; QUESADA, C., y KERRICH, R. (1986): *Beja-Acebuches Ophiolite, characterization and geodynamic significance*. Maleo. Bol. Inf. da Soc. Geol. de Portugal, V2, 13: 31.
- OLIVEIRA, J. T. (1983): *The marine Carboniferous of South Portugal: a stratigraphic and sedimentological approach*. In: M. J. Lemos de Sousa y J. T. Oliveira (eds.): *The Carboniferous of Portugal*. Mem. Ser. Geol. Portugal, 29: 3-37.
- OLIVEIRA, J. T.; CUNHA, T.; STREEL, M., y VANGUESTAINE, M. (1987): *Dating the Horta da Torre Formation, a new lithostratigraphic unit of the Ferreira-Ficalho Group, South Portuguese Zone: geological consequences*. Comun. Serv. Geol. Portugal, 17: 129-137.
- QUESADA, C. (1990): *Geological constraints on the Paleozoic tectonic evolution of tectonostratigraphic terranes in the Iberian Massif*. Tectonophysics, 185: 225-245.

QUESADA, C. (1991): *Significado geodinámico del límite entre las zonas de Ossa-Morena y Surportuguesa*. Parte I: *Introducción a la Excursión de la XI Reunión sobre la Geología del Oeste peninsular*. Guía de campo, 2-24, pp. Aracena-Beja, 13-16 de marzo.

RACHEBOEUF, P. R., y ROBARDET, M. (1986): *Le Pridoli et le Dévonien inférieur de la zone d'Ossa-Morena (Sud-Ouest de la Péninsule Ibérique)*. *Etude des Brachiopodes*. Geol. Pleont., 20: 11-37.

RIBEIRO, A. (1983): *Guia das excurções no bordo sudoeste da Zona de Ossa Morena. Relações entre as formações do Devónico superior e o Maciço de Evora na região de Cabrela (Vendas Novas)*. Com. Serv. Geol. Portugal, t. 69, fasc. 2: 267-269.

ROBARDET, M., y GUTIERREZ MARCOS, J. C. (1990): *Sedimentary and fauna domains in the Iberian Peninsula during the lower Paleozoic*. In: R. D. Dallmeyer y E. Martínez (eds.): *Pre-Mesozoic Geology of Iberia*, Springer Verlag, 267-272.

SANTIESTEBAN, J. I.; ALONSO, G., y DABRIO, C. (1990): *Sedimentación de plataformas durante el Carbonífero Inferior (Formación Terena) en el área de Santa Olalla del Cala*. Bol. R. Soc. Hist. Nat., 85.

VAUCHEZ, A. (1976): *Les structures hercyniennes dans la région de Fregenal-Oliva de la Frontera (Badajoz, Espagne). Un exemple de tectoniques tangéantielles superposées*. Comun. Serv. Geol. Portugal, 60: 261-265.

Original recibido: Marzo de 1991.

Original aceptado: Abril de 1991.

## GEOLOGIA

# El programa «COLUMNA» para el dibujo automático de columnas estratigráficas.

Por J. ESTALRICH (\*)

## RESUMEN

La elaboración gráfica de una columna estratigráfica requiere, por lo general, un elevado número de horas de delineación. Los actuales medios informáticos de tipo gráfico representan una alternativa viable que puede facilitar dicha labor. Con tal motivo se realizó el programa «COLUMNA», que mediante la lectura secuencial de un fichero de datos, en el que se encuentran convenientemente codificadas diversas características sedimentológicas de cada una de las capas que componen una serie, elabora un dibujo mediante plotter de dicha serie.

**Palabras clave:** Columnas estratigráficas, Dibujo automático, Salida gráfica, Características sedimentológicas, Bases de datos estratigráficas.

## ABSTRACT

Plotting a stratigraphic column is a tedious task requiring a high number of working hours. The state-of-the-art of the today available graphic hardware and software can facilitate this work. The code «COLUMNA» allows for the plotting of such a column by reading sequentially a set of data in which the different stratigraphic aspects are conveniently codified.

**Key words:** Stratigraphic columns, Automatic plotting, Graphic output, Sedimentologic aspects, Stratigraphic data base.

## 1. INTRODUCCION

La elaboración de columnas litológicas mediante ordenador ha sido motivo de atención de diversos autores: MCCARTHY (1981), GRIMSTONE et al. (1982), GOLDBERY and WINIKOFF (1986), WARD and WALTHO (1988) y POPE et al. (1988), entre otros. Varias son las ventajas reconocidas de este hecho (POPE et al., 1988). Por una parte, se puede conseguir una presentación y recopilación tipificada de un conjunto de series. Por otra parte, las diferentes características sedimentológicas de cada serie pueden ser almacenadas mediante una base de datos y ser fácilmente accesibles para posteriores análisis y usuarios. Pero, de todos modos, la principal ventaja del uso de estos medios se deriva del hecho de que se disminuye enormemente el número de horas empleadas en la delineación, e incluso permite variar la escala de dibujo según preferencias del usuario. Sin embargo, a pesar de estas ventajas, en los trabajos realizados no siempre se centra suficientemente la atención en las características de tipo sedimentológico. Por tal motivo se consideró necesaria la elaboración del programa «COLUMNA», que realiza el dibujo de una columna de tipo estratigráfica poniendo especial atención en las siguientes variables de claro interés sedimentológico:

— Número de capa.  
— Litología.  
— Calificativo litológico.  
— Estratificación.  
— Espesor.  
— Contactos en el techo y en la base.  
— Granulometría en el techo y en la base.  
— Paleocorrientes.  
— Estructuras sedimentarias y restos orgánicos.

(\*) Unidad de Geodinámica Externa e Hidrogeología. Departamento de Geología. Universidad Autónoma de Barcelona. 08193 Bellaterra. Barcelona.

- Identificación de muestras y su posición en la columna.
- Comentarios adicionales.

## 2. EL FICHERO DE DATOS

El programa «COLUMNA» se basa en la lectura secuencial de los registros que configuran un fichero de datos, como el de la figura 1, creado mediante el uso de un editor a elección del usuario. Las primeras 16 líneas de este fichero contienen los registros que identifican la columna siguiendo las normas del plan Magna y contienen información, a razón de una línea por registro, referente a:

```

333
Santa Coloma de Farners
Gerona
J. Estalrich
Pantano del pantano viejo
AB03
14
01 Mayo de 1987
1110,1110,5
623,4,426,7
342,804
Serie realizada por el camino que, desde la población de Sta. Coloma de Farners, nos conduce a la ermita de Sta. Maria siguiendo el barranco del pantano viejo. La serie se inicia en la confluencia de dicho camino con el kilómetro 1,5 de la carretera nacional 41 y termina en la última curva del camino, ya en las proximidades de la ermita.
5 4 4 3200 1 7 5 4 10 10 32 5 255 Uranio
6 2 700
7 3 1500 1 7 4 10 10 32
8 4 400
4 4 2 1400 1 1 1 1
5 5 2 500 1 1
3 4 3 1200 5 1 4 5 1
2 1 400
2 3 2 1900 7 1 3 10 30
9 3 1100
1 5 2 2 900 4 1 2 1 1 100 10 34
5 7 2 1500 57
6 5 2 400
8 1300
7 2 700
6 2 2 400
1 550
6 3 200 7
6 3 500 2
10 1200
5 2 700 4
6 13 3 1100 6
11 300

```

Figura 1.—Ejemplo de fichero de datos.

- Número de Hoja de escala 1:50.000.
- Nombre de la Hoja.
- Provincia.
- Autor(es).
- Nombre local de la serie.
- Número de la serie.

- Fecha de realización.
- Coordenadas en X del principio y fin de la serie.
- Coordenadas en Y del principio y fin de la serie.
- Coordenadas en Z del principio y fin de la serie.
- Comentario sobre la situación de la serie en un máximo de 5 líneas.

A continuación se encuentran los registros con las características sedimentológicas de las capas, a razón de una línea por capa. Cada uno de estos registros se compone de un total de 20 campos, donde, con un formato I4, 2I3, I2, I6, 4I2, I4, 5I3, 2(I5, I5), A40, se hallan codificados los siguientes aspectos sedimentológicos:

- Campo 1: Número de capa asignada en el campo.
- Campo 2: Tipo de litología.
- Campo 3: Calificativo sedimentológico.
- Campo 4: Tipo de estratificación.
- Campo 5: Espesor de la capa en milímetros.
- Campo 6: Tipo de contacto en el techo.
- Campo 7: Tipo de contacto en la base.
- Campos 8 y 9: Granulometría en el techo y la base, respectivamente. Esta característica sedimentológica tiene sentido únicamente para areniscas, conglomerados y calizas.
- Campo 10: Dirección de corriente medida en grados hacia el este tomando como origen el sentido norte.
- Campos 11, 12, 13, 14 y 15: Estructuras diversas.
- Campos 16 y 18: Número de muestra.
- Campos 17 y 19: Distancia de la muestra al muro de la capa.
- Campo 20: Reservado para comentarios.

Los distintos códigos aceptados en cada uno de estos campos y su significado sedimentológico quedan descritos en el Apéndice I.

## 3. ESTRUCTURA

El programa «COLUMNA» está codificado en lenguaje FORTRAN IV, junto con la instrucción IF THEN ELSE, y una serie de subrutinas de tipo grá-

fico (FACTOR, COLOR, NUMBER, PLOT, PLOTS, SYMBOL, WHERE y WINDOW), comunes a muchas librerías gráficas. Esta característica le confiere un alto grado de compatibilidad, aunque en su forma original haya sido especialmente concebido para su utilización en un IBM PC y un plotter HP7586B y compatibles.

Las etapas necesarias para proceder al dibujo de una columna estratigráfica por parte del programa «COLUMNA» son las que siguen:

- En primer lugar el usuario ha de responder interactivamente con el programa a una serie de preguntas referentes a: nombre del fichero de datos, escala a emplear, tipo de representación a utilizar y tipo de leyenda.
- A continuación, y tras la lectura de los primeros 16 registros, se dibuja la carátula, acorde con las normas del plan Magna del IGME (1980), que puede observarse en la figura 2, según el ejemplo del fichero de datos de la figura 1.

HOJA: 333	NOMBRE: Santa Coloma de Farners
PROVINCIA: Girona	
AUTOR: S. J. Estalrich	
NOMBRE LOCAL: Barranco del pantano viejo	
IDENTIFICACION DE MUESTRAS: ADJS	
FECHA: 20 de mayo de 1987	
SERIE N.º: 15	
X: 1115.000	Y: 1119.500
COORDENADAS Y: 923.400	Y: 926.700
Z: 342.000	Z: 374.000
SITUACION :	
Sería realizada por el camino que, desde la población de Sta. Coloma de Farners, nos conduce a la ermita de Sta. María siguiendo el barranco del pantano viejo. La serie se inicia en la confluencia de dicho camino con el kilómetro 1,5 de la carretera nacional 45 y termina en la última curva del camino, ya en las proximidades de la ermita.	

CROQUIS	LOCALIZACION
---------	--------------

Escala 1:75

Figura 2.—Carátula realizada por el programa «COLUMNA».

- Posteriormente, se leen de forma secuencial los registros de cada una de las capas. A medida que se realiza esta operación, y atendiendo a los distintos códigos de cada campo, se va dibujando la capa con sus respectivos atributos sedimentológicos.
- Finalmente, una vez dibujadas todas las capas, se procede a ultimar el dibujo de la columna estratigráfica y a la delineación de la leyenda, que, para el fichero de datos de la figura 1, adquieren el aspecto que se puede ver en las figuras 3, 4 y 5.

El dibujo mediante plotter del total de las figuras 2, 3, 4 y 5 es inferior a unos 10 minutos, dependiendo del modelo de plotter. Este tiempo es varias veces inferior al tiempo necesario para el dibujo de forma manual de estas mismas figuras, lo que constituye la principal ventaja derivada del uso del programa «COLUMNA».

AGRADECIMIENTOS

Agradezco la ayuda prestada por M. Trio, del ITGE, en la definición del aspecto final de la columna estratigráfica. Este trabajo se ha llevado a cabo mediante convenio entre el ITGE y la Fundación «Empresa y Ciencia».

APENDICE I  
CODIGOS DE CARACTERISTICAS  
SEDIMENTOLOGICAS

Se mencionan sólo aquellos campos con características sedimentológicas que necesitan ser codificadas. El código es el número entre paréntesis.

- Campo 2.—Tipo de litología. Admite las siguientes litologías:
  - Arcilla (1).
  - Limo (2).
  - Arenisca (3).
  - Conglomerado (4).
  - Marga (5).
  - Caliza (6).
  - Dolomía (7).
  - Yeso (8).
  - Carbón (9).

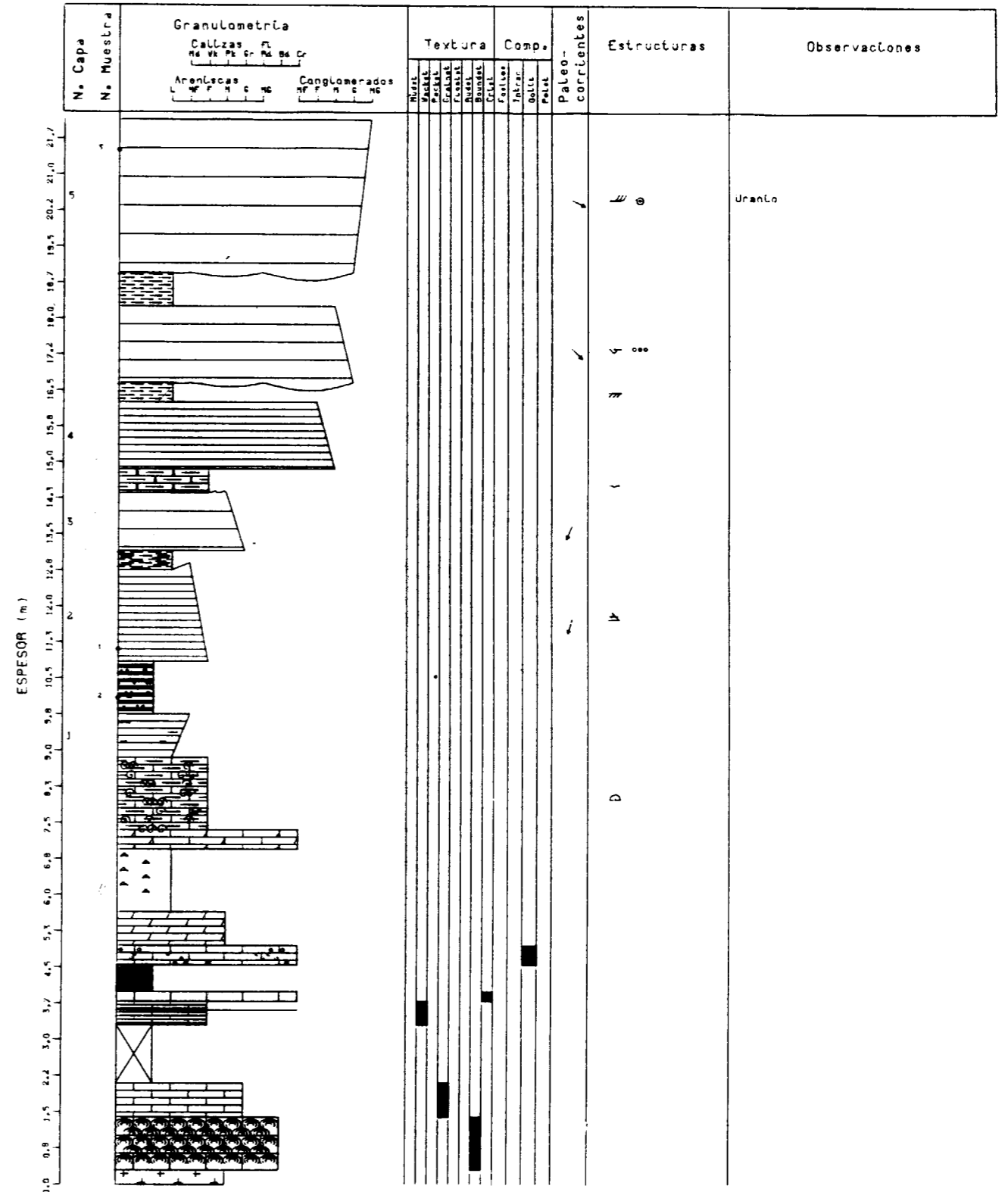


Figura 3.—Columna estratigráfica realizada por el programa «COLUMNA».



**LITOLOGIA**

	Arcilloso
	Limo
	Arenoso o Conglomerado
	Margas
	Caliza
	Dolomita
	Yeso
	Carbon
	Tramo cubierto
	Granito

→ Omisión de información

**CALIFICATIVO**

	Arcilloso
	Limoso
	Arenoso
	Margoso
	Calcáreo
	Dolomítico
	Bioclástico
	Intraclástico
	Oolítico
	Peletoidal
	Bafflestone
	Bindstone
	Framestone
	Floatstone
	Rudstone

**CONTACTOS**

**TECHO**

	Nublado
	Transicional
	Difuso
	Ondulado a pequeña escala
	Ripples de corriente
	Laguna estratigráfica
	Ondulado a gran escala
	Ondulado a mediana escala

**BASE**

	Nublado
	Transicional
	Difuso
	Ondulado a pequeña escala
	Ripples de corriente
	Laguna estratigráfica
	Erosivo a gran escala

**ESTRATIFICACION**

	Fina
	Media
	Gruesa
	Muy gruesa

Figura 4.—Leyenda realizada por el programa «COLUMNA».

**SIMBOLOGIA**

**ESTRATIFICACIONES Y LAMINACIONES**

	Est. convoluta
	Est. cruzada pequeña escala
	Est. cruzada mediana escala
	Est. cruzada gran escala
	Est. nodulosa
	Est. ondulada
	Est. surco pequeña escala
	Est. surco mediana escala
	Est. surco gran escala
	Herring bone
	Lam. cruzada
	Lam. fijas
	Lam. lenticular
	Lam. ondulada
	Lam. paralela
	Lam. sigmoidal
	Laminas rotas

**ESTRUCTURAS ORGANICAS**

	Est. organicas indiferenciadas
	Algal mat
	Bioturbação
	Estromatolitos
	Excavaciones
	Dolitos
	Pellets
	Perforaciones
	Plisadas
	Plislas en superficie
	Tepee

**ESTRUCTURAS DIVERSAS**

	Est. diversas indiferenciadas
	Est. subaereas indiferenciadas
	Cantos acorazados
	Cantos blandos
	Costra
	Escape de fluidos
	Estilucillos
	Estructuras de carga
	Grietas de desecación
	Gotas de lluvia
	Paleosuelo
	Porosidad fenestral
	Superficie carbonatificación

**CONCRECIONES MINERALES**

	Concre. mineral indiferenciada
	Cristales de sales
	Glauconita
	Nodulos de sílex
	Pirita

**ESTRUCTURAS DE CORRIENTE**

	Est. corriente indiferenciada
	Bounce mark
	Canales interestratificados
	Cantos imbricados
	Flute cast
	Parting lineation
	Ripples de corriente
	Ripples de cresta plana
	Ripples de oleaje

**RESTOS ORGANICOS**

	Fosiles indiferenciados
	Macrofauna indiferen.
	Microfauna indiferen.
	Microfona indiferen.
	Microfauna plancton. indiferen.
	Microfauna bentonica indiferen.
	Restos fosiles rotos
	Restos vegetales enteros
	Restos vegetales rotos
	Restos vertebrados enteros
	Restos vertebrados rotos
	Algas
	Alveolinas
	Amolites
	Belemnites
	Braquiópodos
	Briozos
	Carófitas
	Characeas
	Conodontos
	Corales
	Crinoides
	Equinoides
	Espículas de esponjas
	Filamentos
	Gasterópodos
	Globígerinas
	Globorotalias
	Globotruncanas
	Graptolites
	Lacazinas
	Lamelibránquios
	Miliolitas
	Nummulites
	Orbitoides
	Orbitolinas
	Ostracodos
	Ostréidos
	Restos de peces
	Radiolarios
	Radiolas de equinoides
	Rodofitas
	Rudistas
	Trilobites

Figura 5.—Leyenda realizada por el programa «COLUMNA» (continuación).

- Tramo cubierto (10).
- Granito (11).
- Campo 3.—Calificativo sedimentológico. Admite estos calificativos:
  - Arcilloso (1).
  - Limoso (2).
  - Arenoso (3).
  - Margoso (4).
  - Calcáreo (5).
  - Dolomítico (6).
  - Bioclástico (7).
  - Intraclástico (8).
  - Oolítico (9).
  - Peletoidal (10).
  - Bafflestone (11).
  - Bindstone (12).
  - Framestone (13).
  - Floatstone (14).
  - Rudstone (15).

- Campo 4.—Tipo de estratificación. Admite estos tipos:
  - Fina (1).
  - Media (2).
  - Gruesa (3).
  - Muy gruesa (4).
- Campo 6.—Tipo de contacto en el techo. Admite estos tipos:
  - Nítido (1).
  - Transicional (2).
  - Difuso (3).
  - Ondulado a pequeña escala (4).
  - Ripples de corriente (5).
  - Laguna estratigráfica (6).
  - Ondulado a gran escala (7).
  - Ondulado a pequeña escala (8).
- Campo 7.—Tipo de contacto en la base. Admite, asimismo, estos tipos:
  - Nítido (1).
  - Transicional (2).
  - Difuso (3).
  - Ondulado a pequeña escala (4).
  - Ripples de corriente (5).
  - Laguna estratigráfica (6).
  - Erosivo a gran escala (7).
- Campos 8 y 9.—Granulometría en el techo y la base, respectivamente. Esta característica sedimentológica tiene sentido únicamente para areniscas, conglomerados y calizas. En el caso de areniscas admite los siguientes valores:
  - Limo (1).
  - Muy fina (2).
  - Fina (3).
  - Media (4).
  - Gruesa (5).
  - Muy gruesa (6).

En el caso de conglomerados se aceptan:

- Muy fina (1).
- Fina (2).
- Media (3).
- Gruesa (4).
- Muy gruesa (5).

Finalmente, para calizas:

- Mudstone (1).

- Wackestone (2).
- Packstone (3).
- Grainstone (4).
- Floatstone, Rudstone (5).
- Bondstone (Bafflestone, Bindstone, Framestone) (6).
- Cristalizada (7).

- Campos 11, 12, 13, 14 y 15.—Estructuras diversas. Pueden agruparse del siguiente modo:

Estratificaciones y laminaciones:

- Estratificación convoluta (1).
- Estratificación cruzada a pequeña escala (2).
- Estratificación cruzada a mediana escala (3).
- Estratificación cruzada a gran escala (4).
- Estratificación nodulosa (5).
- Estratificación ondulada (6).
- Estratificación en surco a pequeña escala (7).
- Estratificación en surco a mediana escala (8).
- Estratificación en surco a gran escala (9).
- Herring bone (10).
- Laminación cruzada (11).
- Laminación flaser (12).
- Laminación lenticular (13).
- Laminación ondulada (14).
- Laminación paralela (15).
- Laminación sigmoidal (16).
- Láminas rotas (17).

Estructuras varias:

- Estructuras diversas indiferenciadas (18).
- Estructuras subaéreas indiferenciadas (19).
- Cantos acorazados (20).
- Cantos blandos (21).
- Costra (22).
- Escape de fluidos (23).
- Estilolitos (24).
- Estructuras de carga (25).
- Grietas de desecación (26).
- Gotas de lluvia (27).
- Paleosuelo (28).
- Porosidad fenestral (29).
- Superficie de carstificación (30).

Concreciones minerales:

- Concreciones minerales indiferenciadas (31).

- Cristales de sales (32).
- Glauconita (33).
- Nódulos de sílex (34).
- Pírita (35).

Estructuras de corriente:

- Estructura de corriente indiferenciada (36).
- Bounce mark (37).
- Canales interestratificados (38).
- Cantos imbricados (39).
- Flute cast (40).
- Parting lineation (41).
- Ripples de corriente (42).
- Ripples de cresta plana (43).
- Ripples de oleaje (44).

Estructuras orgánicas:

- Estructura orgánica indiferenciada (45).
- Algal mat (46).
- Bioturbación (47).
- Estromatolitos (48).
- Excavaciones (49).
- Oolitos (50).
- Pellets (51).
- Perforaciones (52).
- Pisadas (53).
- Pistas en superficie (54).
- Teepe (55).

Restos orgánicos:

- Fósiles indiferenciados (56).
- Macrofauna indiferenciada (57).
- Microfauna indiferenciada (58).
- Microflora indiferenciada (59).
- Microfauna planctónica indiferenciada (60).
- Microfauna bentónica indiferenciada (61).
- Restos fósiles rotos (62).
- Restos vegetales enteros (63).
- Restos vegetales rotos (64).
- Restos vertebrados enteros (65).
- Restos vertebrados rotos (66).
- Algas (67).
- Alveolinas (68).
- Amonites (69).
- Belemnites (70).
- Braquiópodos (71).
- Briozoos (72).
- Carofitas (73).

- Charáceas (74).
- Conodontos (75).
- Corales (76).
- Crinoides (77).
- Equínidos (78).
- Espículas de esponja (79).
- Filamentos (80).
- Gasterópodos (81).
- Globigerinas (82).
- Globorotalias (83).
- Globotruncanas (84).
- Graptolites (85).
- Lacazinas (86).
- Lamelibranquios (87).
- Miliólidos (88).
- Nummulites (89).
- Orbitoides (90).
- Orbitolinas (91).
- Ostrácodos (92).
- Ostreidos (93).
- Restos de peces (94).
- Radiolarios (95).
- Radiolas de equínidos (96).
- Rodofíceas (97).
- Rudistas (98).
- Trilobites (99).

#### REFERENCIAS

- GOLDBERY, R., and WINIKOFF, G. (1986): *SEDCODE: a Fortran 77 program for decoding sedimentological field data*. Computer & Geosciences, 12(1), 47-49.
- GRIMSTONE, L. R.; HODGSON, W.; MCTAGGART, S., and PETERSON, M. S. (1982): *Computer aided geological modelling for a new Queensland coal mine*. Aust. Coal Geol., 4(2), 451-463.
- IGME (1980): *Mapa Geológico Nacional. Escala 1:50.000 Magna. Modelo de Hoja*. Instituto Geológico y Minero de España, 106 pp.
- MCCARTHY, T. S. (1981): *A Fortran IV computer program for rapid graphic display of sedimentary borehole log data*. Trans. Geol. Soc. South Africa, 84, 271-279.
- POPE, C. W.; CAIRNCROSS, B.; CADDLE, A. B., and MCCARTHY, T. S. (1988): *A revised Fortran IV computer program for displaying coal-bearing sedimentary data*. Computer & Geosciences, 14 (3), 299-320.
- WARD, C. L., and WALTHO, A. E. (1988): *A basic program for in-field entry of lithologic descriptions in borehole logs to a hand-held portable computer system*. Computer & Geosciences, 14(1), 83-97.

## MINERIA

# Mineralizaciones Zn-Pb ordovícicas del anticlinorio de Bossost. Yacimientos de Liat y Victoria. Valle de Arán. Pirineo (España).

Por G. OVEJERO ZAPPINO (\*)

## RESUMEN

Se analiza el contexto tecto-sedimentario de mineralizaciones de blenda y galena, principalmente estratoides, afectadas por el dinamometamorfismo de la orogenia Hercínica. Se relacionan genéticamente con soluciones hidrotermales del Ordovícico Superior, controladas por zonas de fracturas sinsedimentarias, de dirección ONO-ESE y eventualmente N-S. Se definen zonalidades (Zn/Pb, Ag) y diferencias en el contenido metal de los yacimientos, aparentemente correlacionables con la presencia o ausencia de volcanismo contemporáneo, a escala regional. Cabe extraer, de todo ello, algunas guías para la investigación minera.

**Palabras clave:** Zinc, Plomo, Hidrotermal-sedimentario, Ordovícico, Liat, Pirineo, España.

## ABSTRACT

Sediment-hosted Zn-Pb strata-bound deposits of Upper Ordovician age, folded and metamorphosed by the Hercynian orogeny, occur in a clastic and carbonate sequence, without volcanism, in an active geodynamic setting.

Metal content and zoning (Zn-Pb-Ag-Cd-Sn-Ge-Au) are discussed on a regional scale, showing specific patterns apparently connected with the presence (Pierrefitte) or lack (in area studied) of volcanic activity.

Ore morphology and gangues (quartz, amphibolic-garnet-tourmaline assemblages) show differences depending on the host-lithology and the mechanisms of emplacement (exhalative precipitates and metasomatic replacements), but are interpreted as different expressions of the same Ordovician period of mineralization.

As for other similar ores in the Pyrenees (Bentaillou...), the «hydrothermal-sedimentary» genesis, indicated by G. Pouit (1986) fits our deposits. Structural Ordovician controls on different scales (WNW-ESE and N-S deep penetrating faults), having drained the ore-forming solutions, are suggested on the basis of the distribution of the ore occurrences and the paleogeographic-sedimentological evidence. Hence, favourable mineral exploration areas can be inferred.

**Key words:** Zinc, Lead, Hydrothermal-sedimentary, Ordovician, Liat, Pyrenees, Spain.

## INTRODUCCION

La zona axial del Pirineo Central presenta en la alta montaña (1.500 a 2.500 m.) numerosas labores mineras abandonadas, cuya principal actividad extractiva se extendió de 1850 a 1930, conociendo sólo tres minas un período de laboreo posterior: Bentaillou (hasta 1954) y Pierrefitte (1941-1969), en Francia, y Victoria (1949-1953), en

España. Durante la segunda mitad de los años 70 se generalizó en ambos países una intensa etapa de exploración sobre estos depósitos zincíferos, que no se ha resuelto, hasta la fecha, en ningún proyecto minero.

El presente estudio se centra en los yacimientos de Liat y Victoria, y se basa en la investigación realizada por la Sociedad Minera y Metalúrgica Peñarroya durante cuatro años (1975-78): geología de superficie y mina, desmuestres y sondeos (1.000 m.) (OVEJERO, 1975-79).

(\*) Geólogo. c./ Antonio Ruiz, 10. 28023 Pozuelo (Madrid).

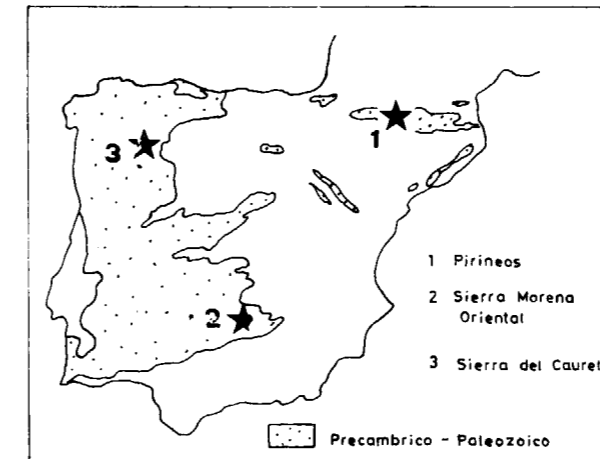


Figura 1.—Mineralizaciones Zn-Pb del Ordovícico de la Península Ibérica.

## 1. LA PROVINCIA METALICA Zn-Pb(Fe) ORDOVICICA DEL PIRINEO CENTRAL

### 1.1. LAS MINERALIZACIONES Y SU CUADRO GEOLOGICO REGIONAL

Las mineralizaciones se distribuyen en tres grandes anticlinorios de núcleo cambro-ordovícico: Pierrefitte, Bossost y Lys-Caillouas (fig. 2), situándose en los metasedimentos detríticos con intercalaciones calcáreas del Ordovícico Superior (Ashgill - Caradoc). Se conoce volcanismo penecontemporáneo solamente en Pierrefitte (POUIT et al., 1979), y parece ausente en los otros dos anticlinorios, salvo discretos y discutibles niveles volcánico-detríticos.

Los yacimientos se presentan mayoritariamente en cuerpos estratoides, de potencia decimétrica a métrica, asociados también localmente (Pierrefitte, DAGALLIER, 1981; Bentaillou, POUIT, 1986) a mineralizaciones fisurales secantes («stockworks», filones).

Mineralógicamente presentan gran uniformidad: blenda ferrífera masiva, galena subordinada y, como minerales accesorios, calcopirita, pirrotina, pirita y magnetita. Como minoritarios: sulfoarseniuros de Fe, Ni, Co (arsenopirita, niquelina y cobaltita), casiterita y estannina (POUIT, 1978; GUERIN, 1979; BRAUX, 1980, y DAGALLIER, 1981), cubanita y gahnita ferrífera (ALVAREZ, 1975).

La plata (0,3-1,5 Kg/t. Pb metal) está asociada a la galena; el cadmio (2-10 Kg/t. Zn metal) y germanio (7-38 g/t. Zn metal) a la blenda. El oro (<1 ppm), asociado a la arsenopirita, se conoce en Pierrefitte (GALLET, 1969), Preciosa Pepita (GUERIN, 1979), Liat (OVEJERO, 1987) y otros indicios (OUDIN et al., 1988).

### 1.2. MODELOS DE YACIMIENTOS: HIPOTESIS Y PROBLEMAS

Los primeros estudios (VISVANATH, 1957, y otros) asignaron a estas mineralizaciones un origen hidrotermal de edad hercínica, con una deposición controlada por metalotectos variables (rocas carbonatadas reactivas a las soluciones mesotermiales; pantalla reductora de las ampelitas silíceas suprayacentes), pero sin llegar a precisar los posibles controles estructurales o magmáticos.

Una nueva interpretación partió de A. BERNARD y F. FOGLIERINI (1964), para los supuestos «filones hidrotermales» de Pierrefitte. A partir de ella la mayoría de los estudios sucesivos sobre este yacimiento (BOIS et al., 1976; DAGALLIER, 1981; BERNARD et al., 1981), coincidirán en un modelo singenético con los sedimentos ordovícicos encajantes, apuntando a una génesis volcánico-exhalativa asociada a un volcanismo submarino ácido-básico («exhalitas» estratiformes y «alteritas» tipo «stockwork», con facies de clorititas, biotititas y grunerititas).

Sin embargo, para las mineralizaciones de los anticlinorios de Lys-Caillouas y Bossost la aparente ausencia de volcanismo deja el campo abierto a varias interpretaciones, entre ellas la del concepto volcánico distal (BRAUX, 1980) o el modelo «hidrotermal (exhalativo)-sedimentario» propuesto por G. POUIT (1978, 1986). Este último, que entendemos en el sentido de R. W. HUTCHINSON (1980) (diferenciándolo del tipo «exhalativo-volcánico» o «volcánico-sedimentario» clásico), supone una metalogénesis conectada a soluciones hidrotermales de edad ordovícica, drenadas hasta la cuenca de sedimentación por fracturas sinsedimentarias y depositadas en niveles litoestratigráficos y trampas estructurales variadas.

Particularmente, para los yacimientos del Valle



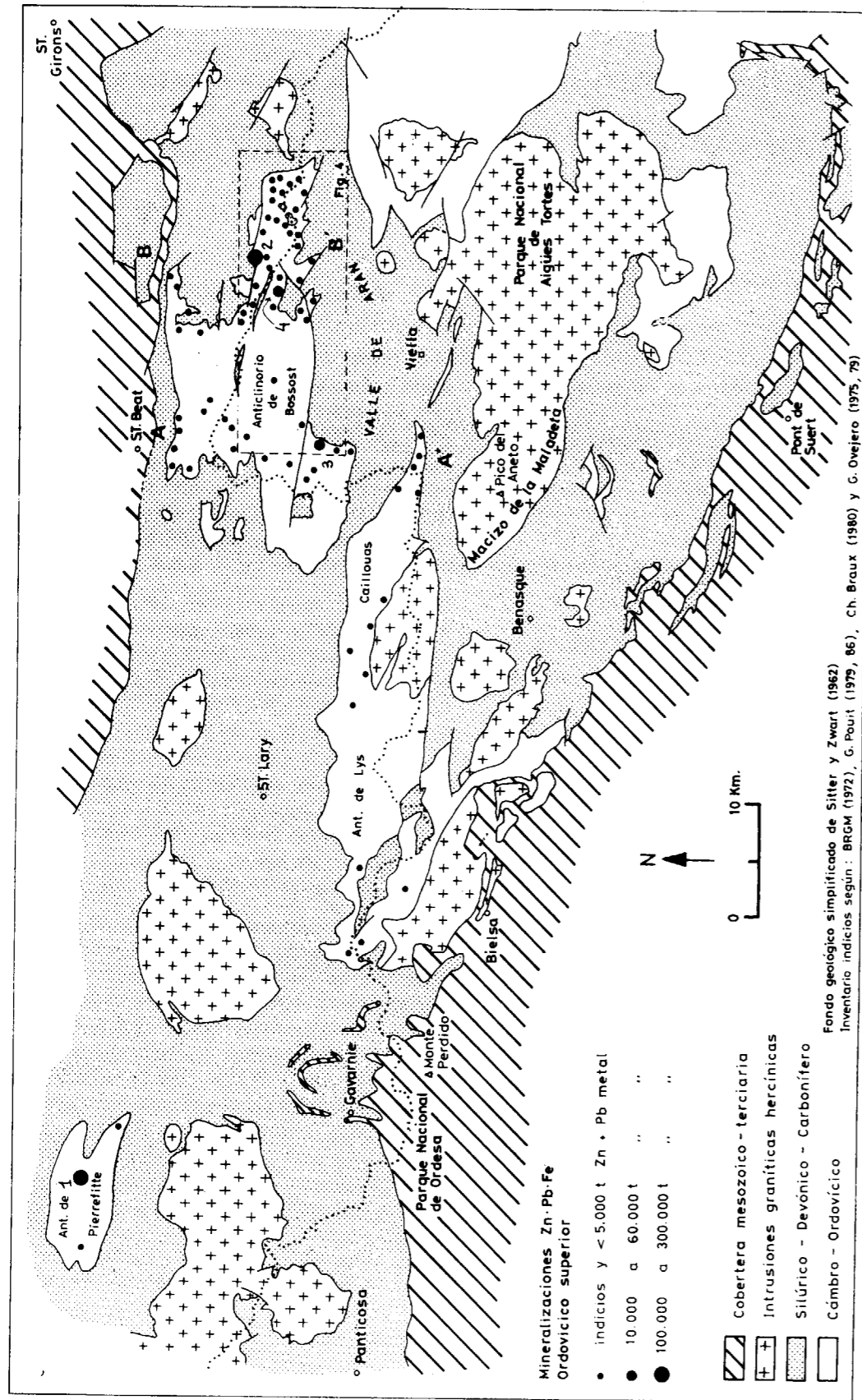


Figura 2.—Distribución de las mineralizaciones en los Anticlinorios de Bossost, Pierrefitte y Lys-Caillouas. Yacimientos de: 1. Pierrefitte, 2. Bentaillou, 3. Victoria, 4. Liat. A-A' y B-B': Bandas norteadas con mayor concentración de mineralizaciones y de supuesta inestabilidad ordoevicica. ¿Paleo-estructuras tipo rift en el Anticlinorio de Bossost?.

de Arán (Anticlinorio de Bossost) suponemos, tal como trataremos de demostrar, una edad ordoevicica y un origen explicable por uno o ambos modelos, coincidiendo con las hipótesis de otros autores (ALVAREZ, 1975; GUERIN, 1979; CARDELLACH et al., 1982) y en desacuerdo con la interpretación introducida por J. L. ALONSO (1979) de una edad y un control tectónico hercínico para el emplazamiento de las concentraciones minerales, supuestamente removilizadas a partir de una diseminación preexistente en ciertas facies.

### 1.3. DIMENSIONES Y ZONALIDADES METALICAS DE LOS YACIMIENTOS

Esta provincia metálica constituye la principal acumulación metal (aprox. 1 Mt. Zn+Pb de metal extraído+recursos potenciales) del Ordovícico de la Península Ibérica, muy superior al pequeño distrito (0,2 Mt.) contemporáneo de Sierra Morena oriental (fig. 2).

La figura 3 detalla las dimensiones de varios yacimientos y conduce a las siguientes observaciones:

- \* El principal yacimiento (Pierrefitte) está ubicado en un contexto volcánico.
- \* Hay mayor contenido metálico en el anticlinorio de Pierrefitte (0,285 Mt.) que en el de Bossost (0,223 Mt.), sin volcanismo, a pesar de la mayor densidad de mineralizaciones en este último.
- \* El contenido en Ag varía regionalmente: de 1.500 g. Ag/t. Pb metal en el yacimiento volcánogénico de Pierrefitte, a 340-860 en los yacimientos, desprovistos de volcanismo, del anticlinorio de Bossost.
- \* La relación Zn/Pb varía también en función de su distribución regional, superponiéndose espacialmente a la presencia o ausencia de volcanismo: es menor (Zn/Pb=1,8) en el yacimiento de Pierrefitte, y es mayor (2,5 a 8,4) en los yacimientos de Bossost.

ANTICLINORIO de BOSSOST	Todo-uno			Metal (t)		Metal (Mt)		
	t	% Zn	% Pb	Zn	Pb	Zn + Pb	Zn/Pb	gr Ag/t Pb
• Bentaillou <sup>(1)</sup>	1.300.000	7,6	2,5	99.000	33.000	0,132	2,5 - 3	600
• Victoria <sup>(1)</sup>	504.168	10,67	1,26	53.794	6.352	0,06	8,4	860
• Liat <sup>(1)</sup>	60.150	20	1	12.030	601	0,012	3,12	340
• Mail de Bulard <sup>(2)</sup>	50.000	-	-	14.400	96	0,014	-	-
• Forcall, Reparadora, Margalida, Solitaria,....	50.000	8-10	1	5.000	-	0,005	-	-
TOTAL						0,223		
<b>ANTICLINORIO de PIERREFITTE</b>								
• Pierrefitte <sup>(1)</sup>	2.600.000	6,9	3,8	180.000	100.000 (+150 t Ag)	0,28	1,8	1.500
• Meyabat, Heches,.... <sup>(3)</sup>	52.000	9-10	-	5.500	-	0,005	-	-
• Curadere <sup>(3)</sup>	5.000	11	-	550	-	-	-	-
TOTAL						0,285		
TOTAL						0,508		

t : toneladas  
Mt : millón de toneladas  
t<sub>Pb</sub> : tonelada de Pb metal

Reconstitución a partir de datos de (1) Archivos PEÑARROYA (1908 a 1969); (2) C. géol. 1/50.000, n° 1085, BRGM (1972) y (3) J.P. Bois et al. (1986).

Figura 3.—Metal extraído y relación Zn/Pb y Ag/Pb de los principales yacimientos. Observaciones: En Victoria la ley indicada sólo ha podido ser reconstituida para un 16 por 100 de los 0.5 Mt. de todo-uno. En Liat el total extraído es 100.000 toneladas, con ley controlada sobre 60.150 toneladas (periodo 1923-31). La relación Zn/Pb ha sido calculada en lo posible de leyes del todo-uno o de desmuestres, y no de la producción de concentrados, distorsionada por las condiciones técnico-económicas del momento.

## 2. CUADRO GEOLOGICO

### 2.1. LAS FORMACIONES PALEOZOICAS

En la zona en cuestión el Ordovícico pertenece a un medio marino de plataforma, integrado en la cuenca sedimentario intracratónica entre los bloques ibérico y europeo. Una potente serie terrígena marina, flyschoides, arenoso-pelítica, epimetamorfizada en cuarcitas y esquistos representa las rocas más antiguas del anticlinorio (Cambro-Ordovícico de Bossost. Hacia su parte superior (Ashgill - Caradoc) se individualizan intercalaciones carbonatadas y conglomeráticas indicadoras de una tendencia regresiva, probable reflejo de los movimientos tectónicos caledonien-ses. Esta actividad tectónica, acompañada de volcanismo en ciertos sectores de la cadena pirenaica, se estructura según la dirección dominante (E-O y ONO-ESE) de la cadena actual (MIROUSE, 1962; PELHATE et al., 1980), y puede haber jugado un papel en la génesis de las mineralizaciones.

En el Silúrico la instauración de un ambiente reductor y tranquilo, dio lugar a sedimentos amplitico-piritosos con fauna de Graptolites, posteriormente recubiertos por formaciones carbonatadas y detríticas del Devónico, en cuya litoestratigrafía, innecesaria para este estudio, no entraremos.

### 2.2. LAS ESTRUCTURAS HERCINICAS. MAGMATISMO

La serie paleozoica está afectada por un metamorfismo «intermedio de baja presión» (SITTER et al., 1962) y por las deformaciones polifásicas de la orogenia hercínica (Carbonífero Superior).

Se distinguen regionalmente (BRGM, 1972) tres generaciones de pliegues: una precoz, transversal a la elongación actual de la cordillera, y dos principales (D1 y D2), paralelas a esta elongación (N 120°). La D1 originó pliegues tumbados de vergencia norte y una esquistosidad regional de flujo, de plano axial. La D2 dio pliegues disimétricos con planos axiales verticalizados.

Fueron frecuentes los despegues a favor de los materiales plásticos del Silúrico, responsables de sus considerables variaciones de espesor y de la disarmonía de plegamiento: domos laxos (con

esquistosidad subhorizontal o inclinada) en las formaciones cambro-ordovícicas y pliegues similares (de esquistosidad próxima a la vertical) en las formaciones devono-carboníferas (SITTER et al., 1962).

Las intrusiones calcoalcalinas, emplazadas durante el Carbonífero Superior, están escasamente representadas por los domos graníticos de Salar-dú y Bossost.

### 3. TIPOLOGIA DE LOS YACIMIENTOS DEL VALLE DE ARAN

Los yacimientos presentan mayoritariamente una composición metálica Zn-Pb-(Fe), con Zn predominante, siendo su paragénesis mineralógica la descrita anteriormente. El Fe es preponderante sólo localmente (Veredera, Preciosa Pepita). El cuarzo es la ganga omnipresente. Cuando el encajante de las mineralizaciones son las rocas calcáreas está acompañado de una facies silicatada (anfíbólica), dando bolsas de reemplazamiento.

Estas facies anfibólicas precisan una descripción más detallada, dada su implicación en la interpretación metalogénica. Consisten en agregados granoblásticos de anfíboles fibrosos (tremolita-actinolita), con porfiroblastos idiomorfos de granates de probable naturaleza cálcica, micas (término magnésico de la serie biotita-annita), total o parcialmente cloritizadas, cuarzo y carbonatos (calcita...). Localmente están acompañadas de una intensa turmalinización. En lámina delgada presentan dos facies tectono-metamórficas: la primera, sin esquistosidad, con blastesis nematoblástica de los minerales, orientados según la esquistosidad de flujo; la segunda, generadora de crenulación y microfracturas, que han destruido total o parcialmente la orientación primitiva al producirse recrecimientos prismático-radiales desorientados del anfíbol y de los restantes minerales.

Las facies anfibólicas aparecen como gangas estrechamente asociadas a las concentraciones metálicas o como pequeñas bolsas epigenéticas aisladas en los niveles carbonatados. En este último caso también presentan Zn-Pb, no siempre visible, pero detectable analíticamente a nivel de anomalías geoquímicas. Esta relación sulfuro-facies anfibólicas nos lleva a considerar para am-

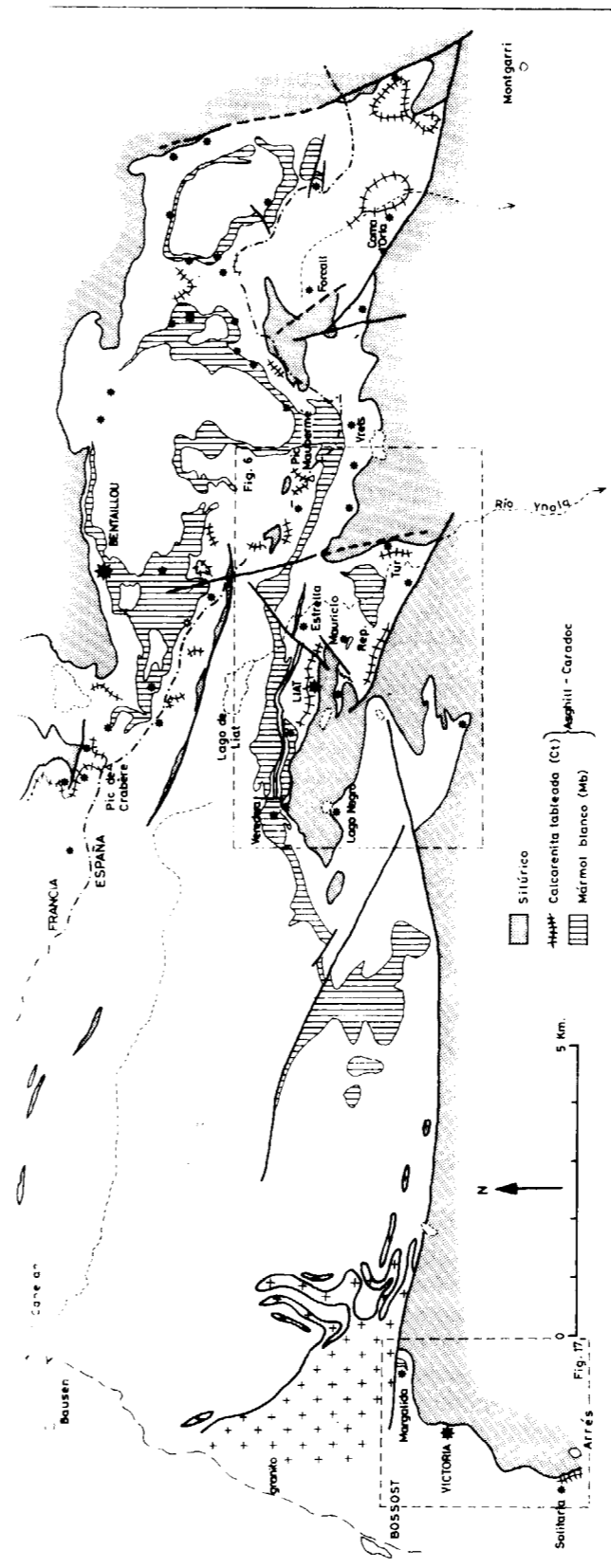


Figura 4.—Mineralizaciones del Anticlinorio de Bossost.

bas una génesis común. Descartamos por tanto para las facies anfibólicas un origen de neoforación exclusivamente metamórfico (por ejemplo, a partir de calizas con impurezas silíceas), interpretándolas como resultantes del efecto del metamorfismo sobre rellenos y alteraciones silíceo-cloríticas previamente aportadas por los fluidos hidrotermales mineralizantes.

Estas facies presentan parentesco con las descritas en el yacimiento de Pirrefitte por G. DAGALLIER (1981).

#### Tipología

Se distinguen cuatro tipos morfológicos y texturales de desigual importancia (figs. 5 y 19):

Tipo 1.—Niveles estratoides de blenda masiva y galena con ganga cuarzosa dominante, de 0,1 a 3,2 m. de potencia, situados en rocas cuarcíticas, preferentemente en los 0-30 m. finales de la serie ordovícica. Presentan altas concentraciones metálicas (hasta el 20 por 100 de Zn, 6 por 100 de Pb), y constituyen la mineralización principal explotada en Victoria, Liat, Urets y Forcall y la de los indicios de Plá de Tur, Estrella, Pico de las Cabras y Solitaria.

Asimismo, existen nivelillos mineralizados con cierto desarrollo de las facies anfibólicas y con bajos contenidos metálicos (800 ppm a 3,5 por 100 Zn; 300 ppm Pb), generalmente asociados a lentejuncillos carbonatados (0,1-1 m. de potencia), situados entre las mineralizaciones principales y el «mármol blanco» del Caradoc.

Tipo 2.—Bolsadas lenticulares (0,5-4 m. de potencia), concordantes e irregulares, aboudinadas por el plegamiento y situadas, en posición variable, dentro del «mármol blanco» del Caradoc. Presentan ganga cuarzosa y anfibólica y mineralización de blenda, galena, calcopirita, pirrotina (mina Margalida) o ferrífera (magnetita, pirrotina, arsenopirita débilmente aurífera), con débiles anomalías en Zn-Pb (Preciosa Pepita, Veredera). Su aspecto sugiere reemplazamientos metasomáticos o rellenos de disolución hidrotermal, elongados según la estratificación.

De escasa importancia en el Valle de Arán, dan lugar, sin embargo, en el sector francés al principal yacimiento (Bentallou) del Anticlinorio de Bossost, donde la mineralización, a techo de la

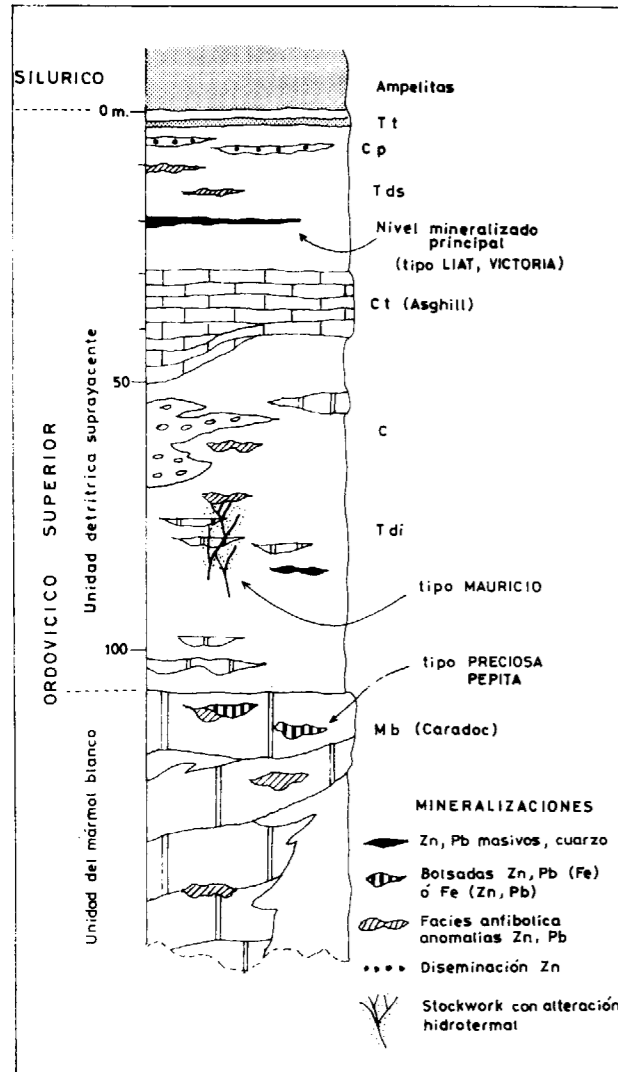


Figura 5.—Serie litoestratigráfica y mineralizaciones del sector de Liat. Tt: Tramo de transición. Cp: «Conglomerado polimíctico» de techo: Tds: «Tramo detrítico superior». Ct: «Calcarenita tableada». C: «Conglomerados, microconglomerados y grauwacas» polimícticos. Tdi: «Tramo detrítico inferior». Mb: «Mármol blanco».

caliza, se dispone según una corrida («run») E-O de 3 Km. de largo y 300-400 m. de ancho (POUIT, 1986), acompañado de «stockwork» y bolsadas discordantes.

Tipo 3.—Diseminaciones débiles (800 ppm a 2 por 100 Zn) con recristalizaciones de cuarzo, situadas en el conglomerado polimíctico (0,6 a 1,5 m. de potencia) del techo del Ordovícico. Presentes en Liat, La Estrella, Plá de Tur y Urets.

Tipo 4.—«Stockwork» y bolsadas mineralizadas (pirita, blenda, galena), con intenso desarrollo de la ganga anfibólica, sobreimpuestas discordantemente sobre la serie cuarcítica con lentejones carbonatados. Localizada sólo puntualmente en el sector de Mauricio-Reparadora (fig. 15), este tipo de mineralización se ha descrito con cierta frecuencia en el sector francés (POUIT, 1986).

#### 4. YACIMIENTO DE LIAT

Es el segundo yacimiento importancia del Valle de Arán (fig. 3), después del de Victoria, y el que hemos investigado con mayor detalle tanto por la accesibilidad total de sus labores como por la ejecución de sondeos de reconocimiento.

##### 4.1. LA SERIE LOCAL (ASHGILL - CARADOC)

Está constituida por metasedimentos finos, cuarzo-arcillosos, con lentejones detríticos groseros y niveles calcáreos, y con un tránsito gradual y rápido a las ampelitas silúricas. No hay evidencia de rocas volcano-sedimentarias en los 300 m. de serie examinados. Tan sólo algunos niveles conglomeráticos encierran clastos de dudosa y lejana procedencia ígnea, como veremos más adelante.

Esta serie constituye una secuencia sedimentológica continua, si bien para facilitar la descripción de los 150 m. finales, que contienen las mineralizaciones, la hemos dividido en dos unidades: la unidad basal de *mármol blanco* y la *unidad detrítica suprayacente* (figs. 5 y 6).

— Unidad de *mármol blanco* (Mb): Constituida por calizas recristalizadas, cipolínicas, con impurezas detríticas (clastos de cuarzo y, en menor proporción, de plagioclasa). Un mayor desarrollo de estas impurezas se traduce en niveles calcoesquistosos, formados por clastos de cuarzo y plagioclasa y porfiroblastos de biotita, moscovita y grafito en una matriz arcilloso-carbonatada. Su potencia media original, multiplicada por el plegamiento, puede estimarse en 50-60 m.

Presenta cambios rápidos de espesor que traen controles paleogeográficos cuyo análisis

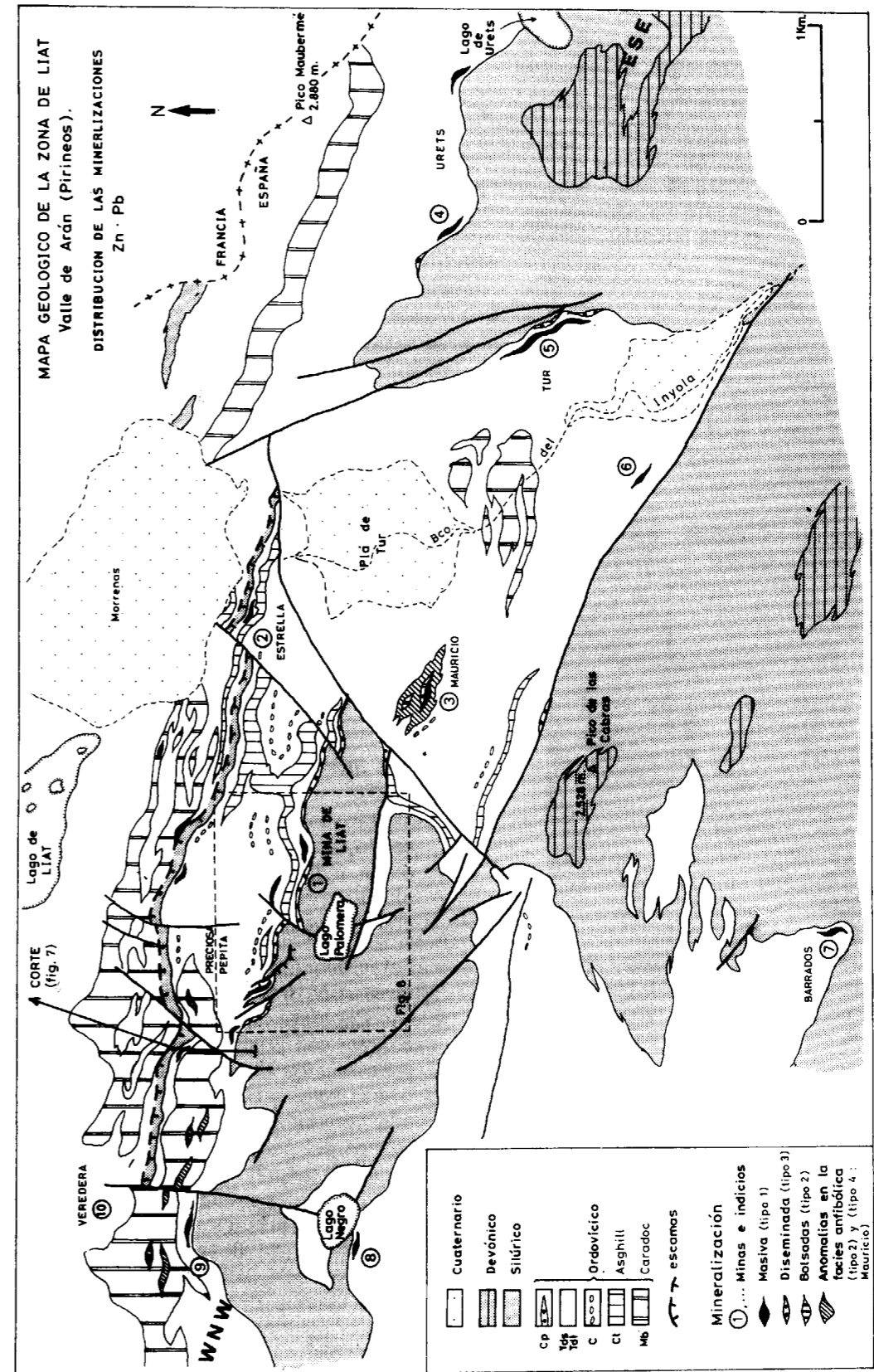


Figura 6.—Mapa geológico de la zona de Liat-Urets. Alineación ONO-ESE: posible zona estrecha de fractura (aprox., 1 Km. de anchura), con actividad hidrotermal en el Ordovícico, controlando a lo largo de ella la concentración de mineralizaciones (incluyendo el tipo 4) y cambios sedimentológicos (nótese la desaparición de los horizontes carbonatados Ct y Mb al sur de la misma).



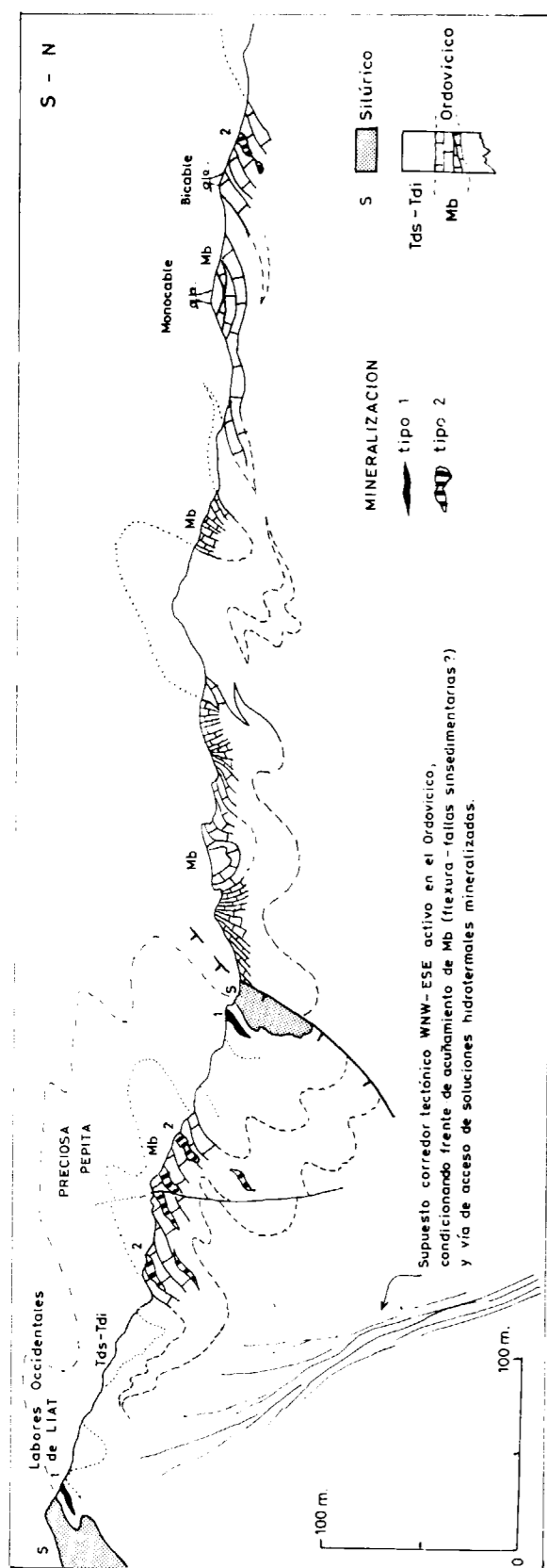


Figura 7.—Corte geológico de la zona de Liat. Situación en figura 6.

sis, tal como presentaremos al final, puede dilucidar también los controles de la mineralización.

Esta unidad, de gran extensión regional, es denominada en las descripciones geológicas, «caliza de Bentaillou», «caliza metalífera» o «caliza blanca», siendo atribuida por varios autores al Caradoc. Contiene las mineralizaciones del tipo 2.

— *Unidad detrítica* (cuarcitas, esquistos, metaconglomerados): De unos 100 m. de espesor, se extiende hasta la base del Silúrico, pudiendo subdividirse en dos tramos, a techo y muro de un típico nivel-guía de *calcarenita tableada*:

\* El *tramo detrítico inferior* (Tdi) lo forman metasedimentos lutítico-arcillosos con materia orgánica, presentando intercalaciones de lentejones métricos carbonatados con contaminación clástica, y más hacia arriba pasos de *conglomerados*, *microconglomerados polimícticos* y *grauwacas* (C). Presenta nivelillos mineralizados de escasa importancia y localmente facies anfibólicas asociadas a lentejoncillos carbonatados.

Los niveles conglomeráticos, de granulometría variable (diámetro <1-2 cm.), presentan una mesostásis granolepidoblástica de clastos de cuarzo estirados, plagioclasa y biotita en una matriz sericítico-clorítica, con circón, epidota y turmalina como accesorios.

Estos conglomerados contienen los únicos elementos ígneos identificados en la serie. Consisten en granos de plagioclasa y cuarzo, con posibles bordes de corrosión, y en clastos de agregados plagioclásicos o cuarzo-plagioclásicos. Su origen, bien sea heredado de la erosión de rocas cristalinas del paleocontinente, o bien de procedencia volcánico-detrítica, nos parece confuso. En una posición litoestratigráfica similar y en el sector oriental francés del anticlinorio de Bossost se citan (POUIT, 1975, 1979; POUIT et al., 1979; POUIT, 1986) clastos riolíticos en conglomerados intraformacionales, e incluso algunas intercalaciones riolíticas (Pale de Rase). En

el anticlinorio de Lys-Caillouas no se han identificado facies volcánico-clásticas (BRAUX, 1980).

\* La *calcarenita tableada* (Ct) es una caliza con impurezas detríticas, en lechos alternantes centimétricos a decimétricos, con desigual granulometría y proporción clásica. Encierra fragmentos de carbonatos (de hasta 1 cm.), cuarzo, clorita y porfiroblastos calizo-organógenos. P. GUERIN (1979) cita Equinodermos. En el yacimiento de Liat está afectada localmente por una epigénesis parcial, dando agregados de anfíbol tremolítico.

Este típico nivel-guía presenta gran extensión a escala regional. Atribuido al Ashgill, es la única datación faunística cierta de todo el Ordovícico. Se ha descrito con diferentes nombres: «sandwich limestone», «caliza o grauwaca de Orthis», «calcaire troué» y «caliza Crabère».

\* El *tramo detrítico Superior* (Tds), de 6 a 10 m. de potencia, consiste en cuarcitas esquistosas, con fina diseminación de piritita, presentando textura esquistosa granolepidoblástica con granos detríticos de cuarzo, mica incolora y biotita y, como minerales accesorios, moscovita y plagioclasa detríticas, epidota, circón y turmalina.

Dentro de este último tramo se sitúa la mineralización principal del yacimiento de Liat.

\* Finalmente, un nivel *conglomerático polimíctico* (Cp), con cemento carbonatado, de débil potencia (1 m.) y gran extensión, cierra la sedimentación detrítica del Ordovícico, señalando el paso, mediante un tramo de transición, a las ampelitas silúricas. Está constituido por clastos redondeados de cuarzo y de caliza, con frecuencia organógena (entroques, corales) y, en menor proporción, de clastos de plagioclasa, de arcosas, grauwacas, cuarcitas y esquistos, en una matriz granolepidoblástica de carbonato, clorita y cuarzo. Presenta a veces (Liat, Estrella, Plá de Tur) una débil diseminación de sulfuros (tipo 3).

\* El *tramo de transición* (Tt), de 3 a 7 m.

de espesor, lo forman intercalaciones de cuarcitas, conglomerados y ampelitas. Está ausente en ciertos sectores debido a despeques tectónicos.

\* Las *lutitas carbonosas* del Silúrico están metamorfizadas en esquistos grafitosos con quiaistolita. Presentan abundante piritita en diseminaciones y en hiladas interesquistosadas.

— Observación cartográfica sobre la serie (figuras 6 y 7): A 600 m. al N de la mina de Liat aflora una estrecha banda (5-14 m.) de cuarcitas y filitas grafitosas. P. GUERIN (1979) las correlaciona con el nivel de esquistos «pseudo-carburados» intraordovícicos identificado por otros autores en el anticlinorio de Bossost (miembro O2b de POUIT, 1986) y de Lys-Caillouas (BRAUX, 1980). En nuestra opinión, esta banda corresponde al Silúrico, pinzado en un sinclinal apretado, cabalgante sobre su flanco norte.

#### 4.2. PARAGENESIS Y TEXTURAS

La mineralización consiste en blenda masiva y en menor proporción galena, calcopirita, pirrotina y magnetita. Los elementos minoritarios (CARDELLACH et al., 1979; GUERIN, 1979) son: arsenopirita, cobaltita, pequeñas inclusiones de freibergita, casiterita y estannina en la blenda. La ganga es cuarzosa, dispuesta en bandas, y la facies anfibólica sólo aparece localmente (fig. 11), reemplazando difusa y parcialmente a la *calcarenita tableada*. A escala microscópica (CARDELLACH et al., 1977) los sulfuros han sufrido cambios texturales y mineralógicos. La composición química del nivel mineralizado s. sr. (mineral + ganga silícea) se indica en la figura 9.

#### 4.3. MORFOLOGIA

La mineralización se concentra en un nivel principal, raramente en varios nivelillos, constituyendo un cuerpo estratoide de contactos netos con la serie metamórfica encajante.

El envolvente geométrico del yacimiento aparece elongado «grosso modo» según la dirección E-O (fig. 8). Se presenta dividido en dos cuerpos

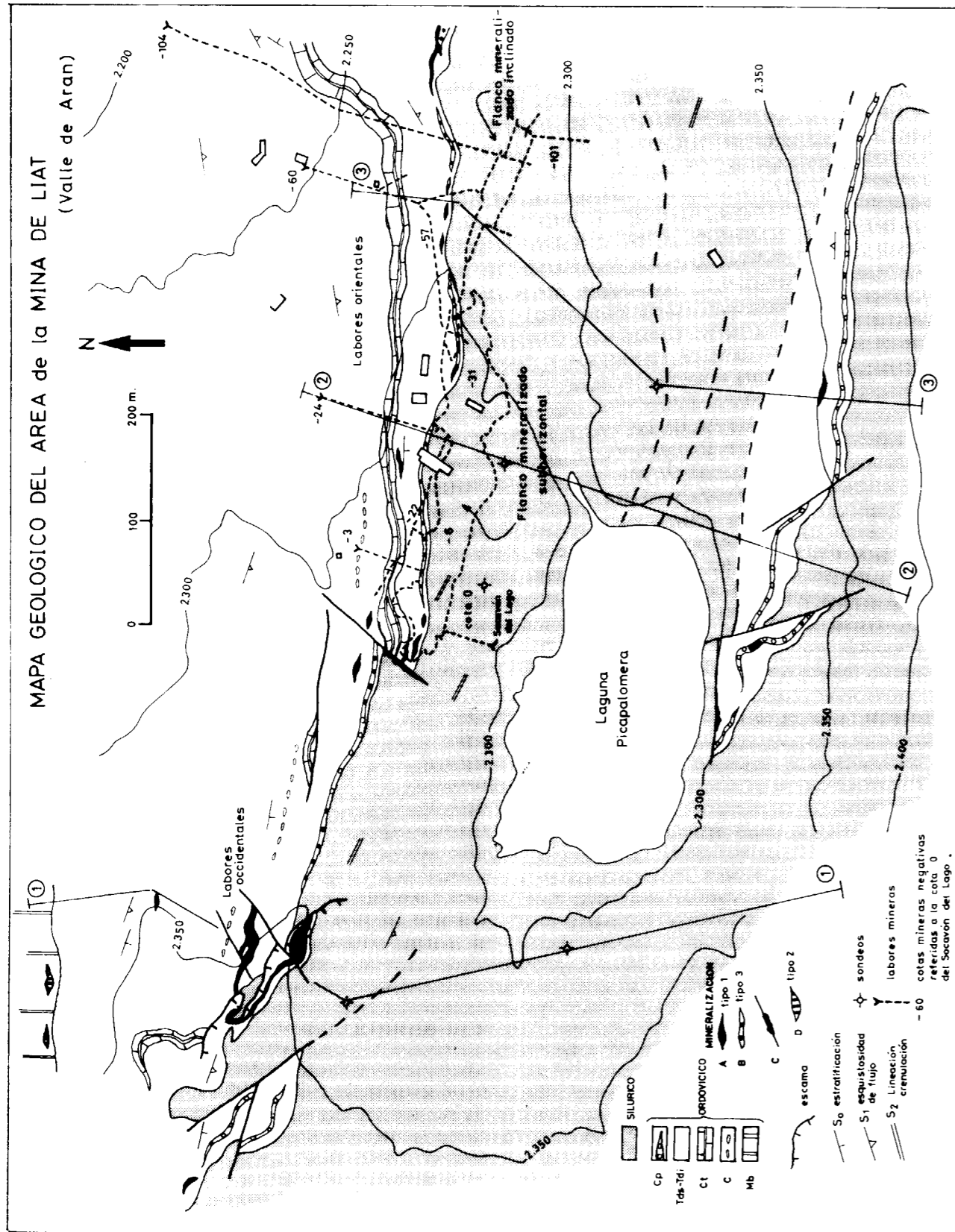


Figura 8.—Mapa geológico de la mina de Liat, con representación de las labores de interior. A: Nivel mineralizado principal; B: Mineralización diseminada en conglomerado de techo; C: Mineralización removilizada en fracturas; D: Bolsadas mineralizadas con ganga anfibólica.

	%		ppm		ppm
Zn	19,61	Cd	500	Co	38
Pb	6,28	Sn	138	Ni	142
Cu	0,20	WO <sub>3</sub>	56,7	Sb	≤ 5
Fe	5,59	Ag	20,7	Ge	≤ 5
SiO <sub>2</sub>	44,85	Au	0,2-0,3	Ga	≤ 10
				As	< 100

Espesor medio nivel mineralizado : 1,14 m.

Figura 9.—Leyes del nivel mineralizado s.s. de Liat. Datos de desmuestra (33 rozas) repartido regularmente sobre el conjunto del yacimiento

(labores orientales y occidentales), sobre una longitud de 900 m., una anchura variable de 50 a 200 m., y un espesor de 0,2 a 3,2 m. Esta morfología en corridas estrechas (de 100 a varios centenares de metros), y relativamente largas (1 kilómetro o más), se ha descrito para algunas mineralizaciones ordovícicas del sector francés (OUDIN et al., 1988).

A escala del afloramiento el nivel mineralizado presenta paralelismo con la esquistosidad de flujo, resaltando cartográficamente su concordancia con las unidades litológicas.

Con respecto a la secuencia litoestratigráfica descrita, la mineralización principal se sitúa en el *tramo detrítico superior*, por encima de la *calcarenita tableada*, y en una posición variable entre 2 y 10 m. por debajo del contacto con el Silúrico. Infrayacentes a este nivel principal, y dentro del *tramo detrítico inferior*, aparecen ocasionales nivelillos mineralizados, detectados en los sondeos.

#### 4.4. ESTRUCTURA DEL YACIMIENTO

El cuerpo mineralizado presenta una morfología conforme con el plegamiento de las rocas encajantes (fig. 10). La reconstitución de su geometría conduce a interpretarlo estructuralmente como un sinclinal tumbado, de dirección N 110° y vergencia norte (fase D1), complicado por un repliegue superpuesto coaxial (fase D2) y de vergencia opuesta (sur), acompañado de despe-

gues y escamas tectónicas menores, favorecidas por la plasticidad de las ampelitas silúricas (figura 12).

El yacimiento presenta, por tanto, un flanco mineralizado superior, subhorizontal, localmente truncado y cabalgante sobre las ampelitas (visible en las labores occidentales y en el nivel superior de las labores orientales) y un flanco inferior invertido que se prolonga en profundidad con fuerte inclinación (niveles inferiores de las labores orientales).

En relación con las zonas de charnelas o escama no se observa, a escala de la mina, una distribución significativa de espesores y de acumulación metal del cuerpo explotado que refleje una movilización y reconcentración importantes de la mineralización por flujo plástico durante la deformación, salvo quizá localmente (fig. 11). Las removilizaciones quedan limitadas a algunos planos de discontinuidad (esquistosidad, fracturas) próximos o conectados al cuerpo mineralizado (fig. 8).

El subparalelismo local de la mineralización con el contacto de cabalgamiento ha inducido a otro autor (ALONSO, 1979) a ligar la concentración y emplazamiento del yacimiento con este accidente hercínico. Su esquema geológico (fig. 13) exagera las proporciones del mineral «asociado» a la escama y el desplazamiento horizontal de la misma, y omite la extensión en profundidad, bajo aquélla, del flanco mineralizado inclinado.

#### 5. OTRAS MINERALIZACIONES DE LA ZONA DE LIAT - FORCALL

En el sector oriental español del anticlinorio de Bossost (figs. 4 y 6) y en un contexto litoestratigráfico similar al de Liat, se distribuyen otros depósitos, entre los que destacan los de Tur, Mauricio-Reparadora, Urets y Forcall.

Los principales depósitos corresponden al tipo 1, situándose indistintamente entre los 0 y 50 m. finales del Ordovícico, dentro del *tramo detrítico superior* y localmente asociados a lentejones carbonatados de escasa potencia (0,5-1 m.). Todas las facies anfibólicas detectadas (indicio de Coma d'Orla, Forcall...), presentan siempre mineralización, ya sea en concentraciones visibles

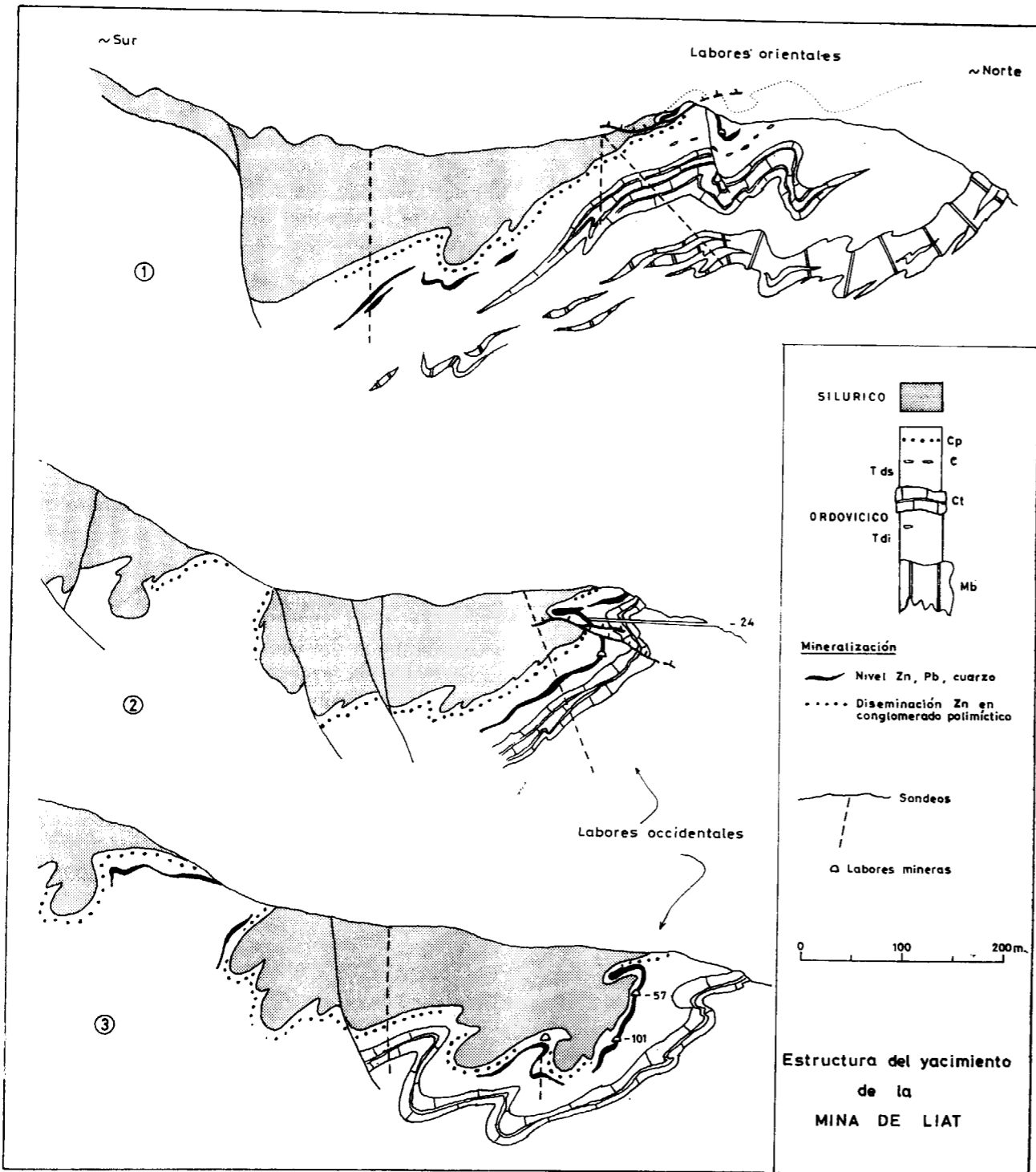


Figura 10.—Estructura del yacimiento de Liat. Situación de los cortes en figura 8.

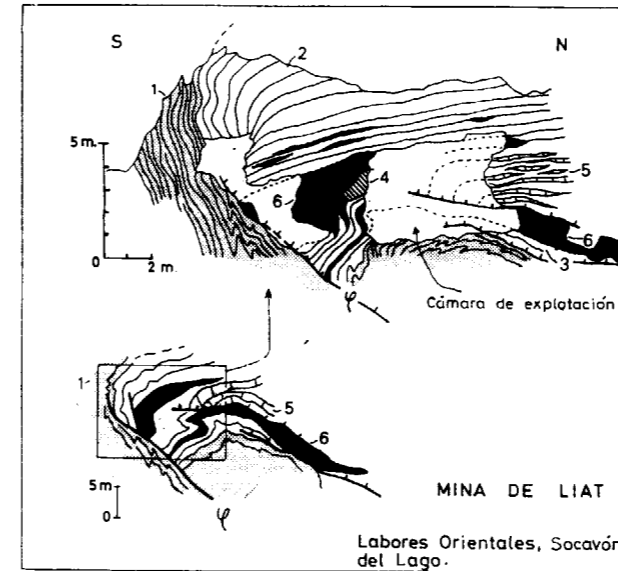


Figura 11.—Cierre en charnela, con despegues, del nivel mineralizado. Silúrico: 1. Esquistos grafitosos crenulados. Ordovícico: 2 y 3. Micasquistos cuarcíticos grises y cuarzitas negras con pirita abundante (Tds). 4. Facies anfibólica. 5. Calcarenita tableada. 6. Nivel mineralizado masivo.

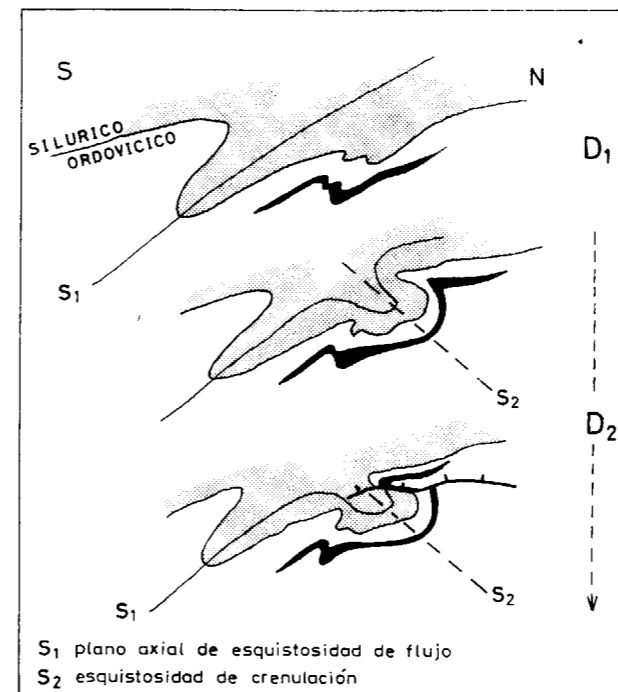


Figura 12.—Evolución de la deformación del sinclinal de la mina de Liat.

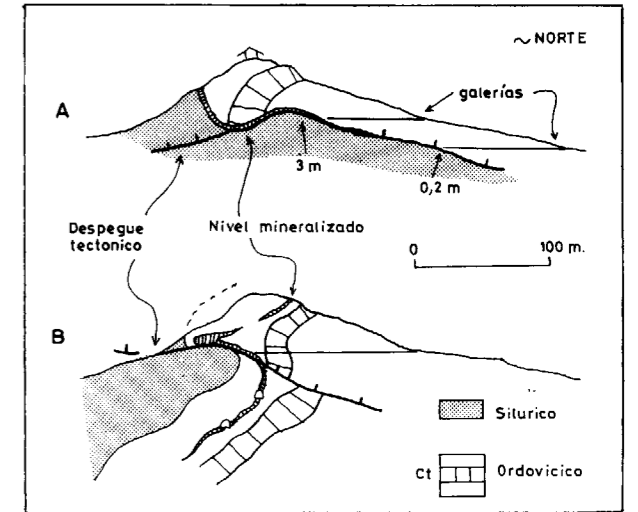


Figura 13.—Interpretaciones de la estructura del yacimiento de Liat. A: Según J. L. ALONSO (1979). B: Según el autor.

o a nivel de anomalías geoquímicas (hasta 4.000 ppm Zn).

El tipo 2 de mineralización se presenta en la zona de Veredera-Preciosa Pepita, donde el *mármol blanco* del Caradoc encierra pequeñas bolsadas (0,5-2 m. de potencia, 200 a 3.000 t.), concordantes con la estratificación, y deformadas y aboudinadas por el plegamiento hercínico (figura 14). Están constituidas esencialmente por la facies anfibólica, con cuarzo y turmalinizaciones locales y escaso contenido en magnetita, pirrotina, pirita, blenda y galena. A este tipo pertenecen las explotaciones de Preciosa Pepita, donde se ha detectado también (GUERIN, 1979) arsenopirita, calcopirita, cobaltita y oro nativo en inclusiones.

En este mismo tramo, a 3 Km. al N, se encuentra el yacimiento de Bentailou, cuya mineralización (blenda, galena, pirrotina, pirita, calcopirita, mispíquel y cobre gris) con ganga silíceo-anfibólica se sitúa a techo de los mármoles del Caradoc.

El tipo 4 aparece exclusivamente en la zona de Mauricio-Reparadora (fig. 15).

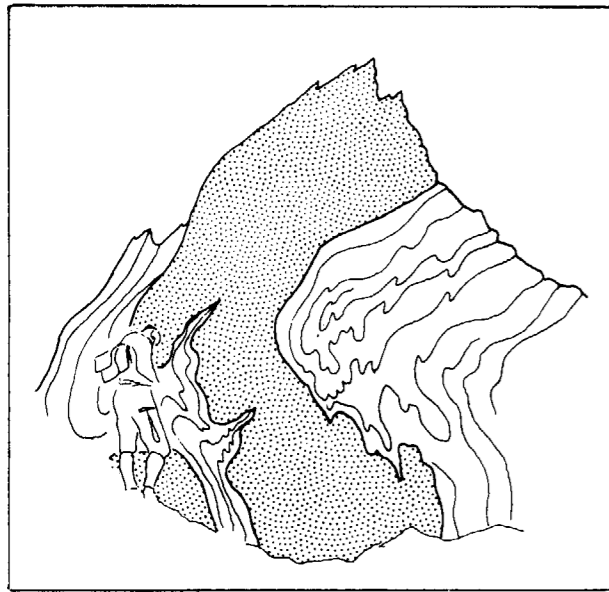


Figura 14.—Mineralización tipo 2: Bolsa ferruginosa (magnetita, pirita, pirrotina) con blenda y galena minoritarias y ganga anfibólica, replegada concordantemente con el «mármol blanco» (Caradoc). Indicios entre Preciosa Pepita y Veredera. El personaje da la escala.

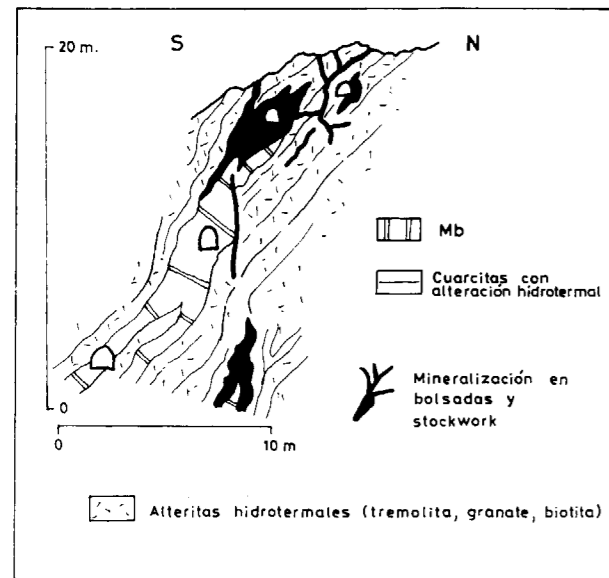


Figura 15.—Mineralización tipo 4: Labores en las concesiones Mauricio-Reparadora.

### 6. YACIMIENTOS DE VICTORIA Y MARGALIDA

El sector occidental del Anticlinorio de Bossost presenta solamente los yacimientos de Victoria y Margalida y algunos pequeños indicios (Solitaria...) (fig. 16).

La serie local está constituida por los mismos términos cuarcítico-pizarrosos del sector oriental, pero con escasa presencia de las facies carbonatadas, representadas por afloramientos aislados: *calcarenita tableada* en Solitaria, *mármol blanco* en Margalida. La influencia del granito de Bossost se traduce en una aureola metamórfica (grandes cristales de andalucita en el área de Victoria) y en diques y sills pegmatíticos.

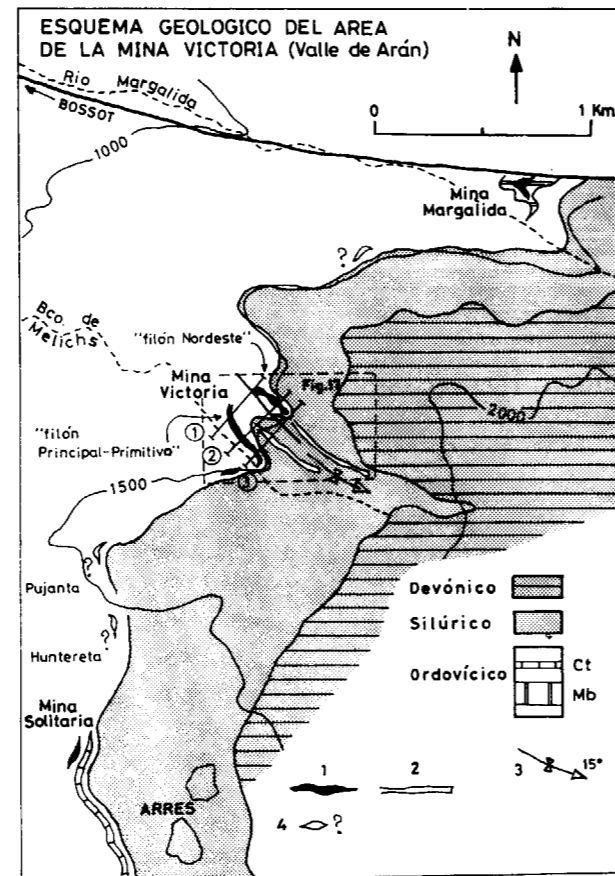


Figura 16.—Posición geológica de las mineralizaciones de Victoria, Margalida y Solitaria. 1: Afloramiento del nivel mineralizado. 2: Extensión del nivel mineralizado explotado en profundidad en mina Victoria. 3: Sinclinal de la mina Victoria. 4: Indicios antiguos no localizados.

### 6.1. VICTORIA

Es el segundo yacimiento en importancia del Anticlinorio de Bossost, después del de Bentailou (fig. 3). Presenta una mineralización del tipo 1. Esta constituye un nivel estratiforme, de potencia variable (hasta 4 m.), a veces subdividido en varios nivelillos. Está formado por blenda masiva con ganga silíceo y por galena, calcopirita, pirita y pirrotina como sulfuros minoritarios, con trazas de Ag (860 g/t. Pb), Cd y Ge (15.000 y 38 g/t. Zn, respectivamente). En la misma mineralización (CLOSAS, 1949) y en las rocas encajantes (ALVAREZ et al., 1974) se cita gahnita ferrífera (espinela zincífera).

A escala microscópica, la mineralización de Victoria, así como la de Solitaria, presenta cambios texturales y mineralógicos interpretables como de origen metamórfico (CAMPA et al., 1976; ALVAREZ et al., 1977): cataclasis y deformación

plástica de sulfuros, generación de nuevas fases minerales (ortosa, granate, biotita, clorita...).

El nivel mineralizado principal presenta una posición variable, de 0 a 15 m., por debajo del contacto con las ampetitas silúricas, existiendo puntualmente otros nivelillos («filón Milagrillo»), hasta 60 m. por debajo del nivel principal. A escala métrica, aparece concordante con la esquistosidad principal, ambos afectados localmente por repliegues de la segunda fase de deformación.

A escala del yacimiento, la cartografía del nivel mineralizado nos conduce a interpretarlo como una estructura plegada en sinclinal, de plano axial vertical, de eje NO-SE e inmersión 15° SE, debida, probablemente, a la segunda fase de deformación (D2). La explotación minera ha seguido los dos flancos («filón Nordeste» y «filón Principal-Primitivo») sobre sendas alturas de 250 m., sin alcanzar la supuesta zona de char-

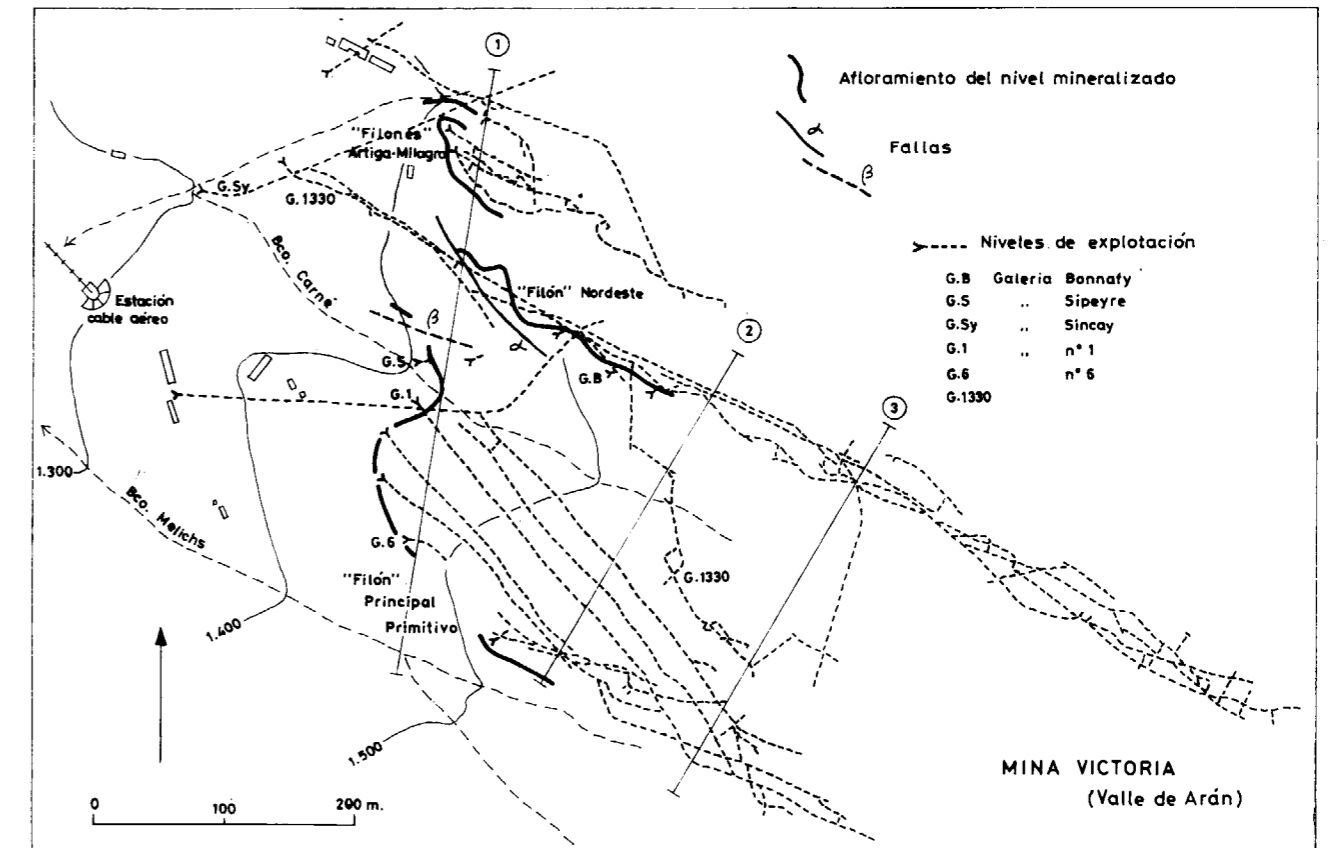


Figura 17.—Mina Victoria: afloramientos mineralizados y labores de interior. Plano de labores mineras simplificado a partir de documentos internos de Peñarroya.

nela en profundidad (cortes 2 y 3, figs. 17 y 18). Esta zona de charnela, dislocada por fracturas, se hace, sin embargo, patente en los afloramientos y labores del extremo noroccidental del yacimiento (corte 1).

## 6.2. MARGALIDA

La mineralización pertenece al tipo 2, presentándose en forma de bolsadas de potencia variable (0,1 a 2 m.), englobadas concordantemente en el mármol blanco del Caradoc y deformadas por las dos fases de deformación, D1 y D2. La mineralización consiste en blenda masiva, acompañada de galena (Zn/Pb=4,5), pirita y pirrotina y ganga cuarzo-clorítica a cuarzo-anfibólica.

A escala microscópica (ALVAREZ, 1975; ALVAREZ et al., 1977; MONTORIOL et al., 1974) la mineralización ha experimentado los efectos del dinamometamorfismo.

## 7. COMPARACION CON OTROS YACIMIENTOS

Estos depósitos comparten similitudes con ciertos yacimientos paleozoicos, algunos de ellos entre los grandes depósitos mundiales (hasta 8,4 Mt. metal), caracterizados por la relación Zn/Pb > 1, y por su implantación dentro de cuencas sedimentarias en contexto geodinámico inestable y carentes de volcanismo próximo.

Dentro del Ordovícico de la Península Ibérica pueden correlacionarse con el pequeño distrito Zn-(Pb)-Ba de Sierra Morena oriental (JACQUIN et al., 1980), y con las mineralizaciones Pb-Sb de la Sierra del Caurel (GUILLOU, 1969), ambas asociadas a niveles dolomíticos de la caliza del Ashgill y a términos detríticos, con algunos tramos volcánico-clásticos en el primer sector (figura 1).

A escala mundial, otras mineralizaciones paleozoicas Zn > Pb más o menos comparables, se conocen en el Silúrico (Howard Pass, Canadá), Carbonífero (Silvermines, Irlanda) y Devónico (Rammelsberg y Meggen, Alemania). De edad ordovícica sólo cabe destacar los yacimientos de la caledónides escandinava, aunque diferentes por su carácter de sulfuros masivos, su paragénesis (Zn-Cu-Pb) y su contexto volcánico-sedimentario.

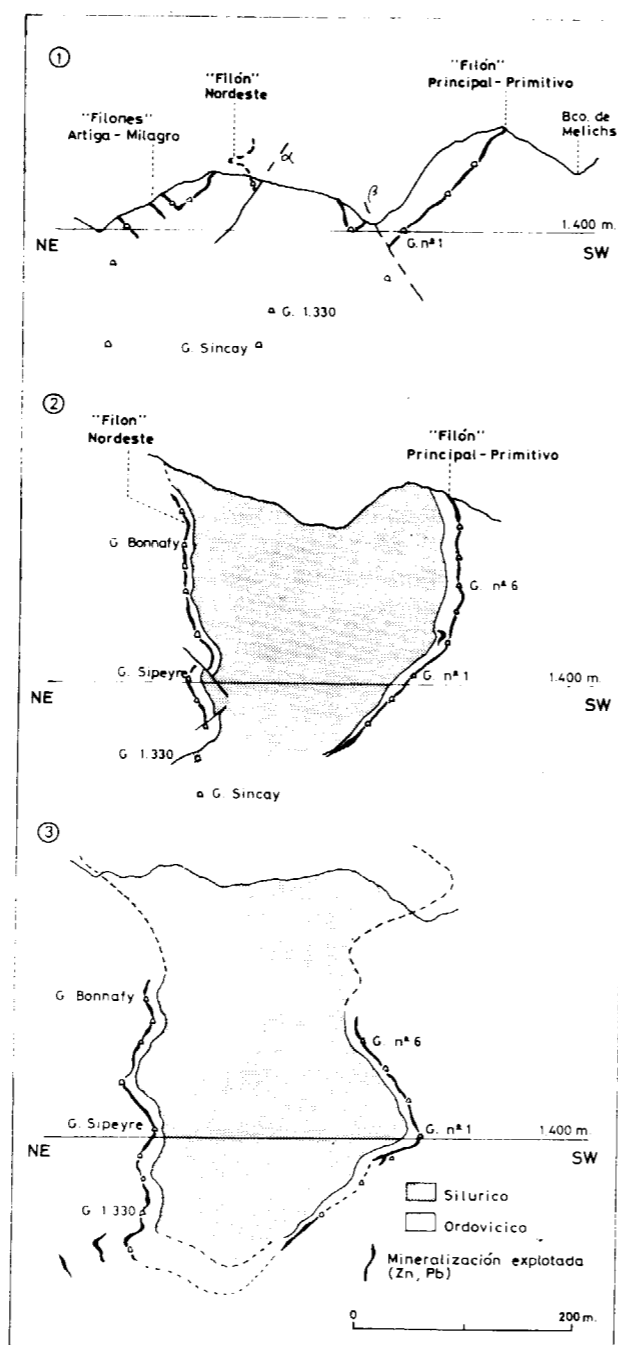


Figura 18.—Mina Victoria. Estructura del nivel mineralizado. Situación de los cortes en figuras 17 y 18.

## 8. DISCUSION E INTERPRETACION

Las mineralizaciones del Valle de Arán presentan la misma incógnita que otros depósitos paleozoicos integrados en una serie sedimentaria

aparentemente irrelevante, en el sentido de estar desprovista de fenómenos metalogénicamente significativos (volcanismo, plutonismo). Además, la sobreimposición del dinamometamorfismo oscurece el carácter original del depósito y dificulta, en consecuencia, su interpretación.

El examen que sigue tratará de filtrar los efectos de la orogenia hercínica y de analizar: 1) la morfología; 2) paragénesis; 3) gangas y alteraciones de las mineralizaciones, y 4) zonalidades metálicas. Seguidamente, trataremos de extraer las pruebas indirectas que aporta la misma secuencia sedimentológica que alberga las mineralizaciones, y que puede constituir un elemento clave en la comprensión del reparto espacial de las mismas y de su génesis.

### 1. Morfología

Mineralizaciones y rocas encajantes experimentaron el metamorfismo y diastrofismo hercínico, desde la escala microscópica a la escala megascópica, traducido en plegamiento del nivel mineralizado: sinclinal de Victoria; repliegues superpuestos coaxiales de vergencias opuestas, con despegues tectónicos, en Liat.

Se presentan mayoritariamente como niveles masivos estratiformes, concordantes con las rocas encajante, y de geometría laminar elongada (escasa potencia: 0,1-4 m.; extensión hectométrica).

### 2. Paragénesis

La paragénesis principal (Zn-Pb) está acompañada de anomalías geoquímicas en ciertos elementos traza, significativos desde el punto de vista metalogénico: Sn (5-18' a 130''), Au (0,3'), Co (250-290' a 38''), Ni (25-50' a 142'') y Ag.

Nota.—Valores en ppm.

' : Yacimiento de Liat (OVEJERO, 1975-79).

'' : Yacimientos de Argut y Bentailou (OUDIN et al., 1988).

La presencia, escasa, de Sn y Au muestra afinidad con yacimientos de sulfuros masivos de afiliación volcánico-sedimentaria (AYE et al., 1976; PETERSEN, 1982).

La relación Co/Ni es variable: ampliamente superior a 1 en los yacimientos de Argut y Bentailou

e inferior (0,2) en Liat. No aporta, por tanto, pruebas concluyentes en cuanto al significado que a esta relación se le atribuye relativa a un origen hidrotermal (Co/Ni >> 1) o sedimentario (Co/Ni << 1). Pudiera entenderse que en ciertos sectores (caso de Liat) las condiciones geoquímicas composicionales del medio sedimentario (pirita o sulfuros sedimentarios) prevalecen sobre las aportadas por las soluciones hidrotermales.

La presencia de gahnita (CLOSAS, 1949; ALVAREZ et al., 1974) indicaría la existencia previa en la serie de compuestos de Zn, transformados por el metamorfismo. La gahnita se conoce en los yacimientos paleozoicos metamorfizados de Zn-Pb de Monteneve y Broken Hill (FRIZZO et al., 1982), estratiformes y sin volcanismo manifiesto.

### 3. Gangas y alteraciones

La ganga cuarzosa derivaría de exhalitas silíceas (tipo sedex) o de silicificaciones epigenéticas ligadas al hidrotermalismo ordovícico.

La ganga silicatada o facies anfibólica-(granatífera-biotítica-turmalinífera) derivaría del metamorfismo de las alteraciones y rellenos hidrotermales ordovícicos, explicación también sugerida por G. POUIT (1978). Su íntima asociación con anomalías o concentraciones metálicas Zn-Pb sugiere un origen común con el proceso mineralizador. Son comparables a los agregados anfibólicos de Pierrefitte interpretados por G. DAGALLIER (1981) como «alteritas» del hidrotermalismo volcánico-génico.

### 4. Zonalidades

(Ver apartado 1.3., «Dimensiones y zonalidades metálicas»).

El reparto regional de la Ag guarda paralelismo con el conocido en el modelo volcánico-génico Kuroko (COLLEY, 1976): mayor proporción de Ag en los depósitos proximales a los centros volcánicos (en nuestro caso, Pierrefitte) frente a los distales (nuestros yacimientos del Anticlinorio de Bossost).

La relación Zn/Pb, que presenta también un contraste marcado en función de su distribución regional, no coincide, sin embargo, con la de la



tipología mundial de los yacimientos volcanosedimentarios, donde la relación Zn/Pb decrece en función del alejamiento de los centros exhalativos productivos (BAUCHAU, 1971).

##### 5. Indicadores paleogeográficos-sedimentológicos

Todos los depósitos presentan una posición cronostratigráfica constante (Ashgill-Caradoc), situándose dentro de los 150 m. finales del Ordovícico, y preferentemente en dos tramos: a) parte superior de la serie detrítica, entre el entorno de la calcarenita y el contacto con las ampelitas del Silúrico (yacimientos de Victoria y Liat), y b) asociadas a los mármoles (Margalida y Bentaillou).

Las perturbaciones sedimentológicas de esta formación (cambios de facies y espesores, conglomerados) reflejan una inestabilidad tectónica distensional, que deducimos a tres escalas de organización:

A escala regional el mapa de la figura 2 sugiere que las mineralizaciones de los Anticlinorios de Bossost y Lys-Caillouas se concentran en apariencia en dos bandas norteadas (AA' y BB'), pudiendo reflejar áreas de mayor inestabilidad cortical. A modo de hipótesis pudieran corresponder a paleo-estructuras extensionales de primer orden (¿de tipo rift?).

A escala del Anticlinorio de Bossost, la mayor concentración de mineralizaciones corresponde a su sector oriental, que presenta precisamente el máximo desarrollo de rocas carbonatadas (fig. 4). Su configuración isópica refleja la intersección de dos direcciones (Norteadas y ONO-ESE), evocando una compleja paleogeografía de subcuencas de segundo y tercer orden, indicadoras, a su vez, de una paleoestructuración en horsts y grabens, y consecuentemente de una cierta densidad de fracturación.

Con mayor detalle, a escala de la zona de Liat-Urets (fig. 6), las mineralizaciones se agrupan definiendo una alineación ONO-ESE, que coincide también con un frente de acuñaamiento total del horizonte de *mármol blanco* hacia el SSO, pudiendo reflejar un corredor de flexura-fractura de esta dirección (fig. 7). En esta alineación se sitúa también precisamente la única mineralización del tipo 4.

Estos corredores tectónicos sinsedimentarios pudieron favorecer la canalización de las soluciones hidrotermales mineralizadas a la cuenca sedimentaria (fig. 19).

Los estudios de R. MIROUSE (1962) sobre las formaciones sedimentarias sinorogénicas en la zona axial pirenaica, sintetizados en A. PELHATE et al. (1980), son significativos. Definen la existencia de estrechas zonas longitudinales de inestabilidad precoz, desde el Ordovícico al Devónico. Elongadas según la dirección ONO-ESE a E-O, aparecen reflejadas a gran escala en la paleogeografía y acompañadas sectorialmente (Pierrefitte) de volcanismo.

G. POUIT (1986) ha llamado la atención sobre estos fenómenos. Señala la coincidencia de la mineralización de Bentaillou con un cambio brutal, hasta el acuñaamiento, del horizonte calcáreo que la engloba, explicándolo por la generación de altos-fondos en un ambiente sedimentario inestable. Resalta también el hecho de ciertas fracturas norteadas, preguntándose por su significado: una de las más importantes está espacialmente asociada a uno de los paneles mineros («Narbonne») mejor mineralizados del citado yacimiento. Las mineralizaciones en fracturas, estrechamente asociadas a las estratiformes, en éste y otros depósitos, son consideradas por este autor como penecontemporáneas.

D. LARGE (1988) ha observado también la correlación de varios yacimientos paleozoicos (Rammelsberg, Meggen, Silvermines, Tynagh) con episodios de fracturación distensiva, sin que se perfilase, al igual que para nuestras mineralizaciones, un ambiente sedimentario o litológico específico, salvo precisamente las propias estructuras sedimentológicas derivadas de la inestabilidad tectónica.

De esta forma, los varios tipos de mineralizaciones estudiados, aparecen superpuestos indistintamente sobre las diversas facies de la secuencia estratigráfica, adquiriendo, eso sí, su diferente tipología según el modo de emplazamiento (singenético, epigenético) y de las reacciones con las unidades litológicas encajantes, desiguales según se trate de rocas detríticas o carbonatadas.

Todos ellos pertenecerían, «grosso modo», a un mismo período mineralizador, en un intervalo de tiempo entre el Caradoc y el Ashgill. Sus dife-

a distintas alturas de la serie atravesada por la columna hidrotermal en ascenso.

## 9. CONCLUSION

Interpretamos estas mineralizaciones como de edad pre-hercínica y de emplazamiento precoz en la evolución sedimentario-diagenética de una cuenca de plataforma inestable, en relación con soluciones hidrotermales fini-ordovícicas (435 a 450 Ma.), habiendo dado origen a dos modos penecontemporáneos de emplazamiento (fig. 19):

- Niveles sinsedimentarios (ganga silíceo), de precipitación exhalativa en la interfase agua-sedimento, o/y debajo y próxima a ella, por impregnación de sedimentos permeables inconsolidados.
- Bolsadas epigenéticas (ganga anfibólica y silíceo) formadas por reacción metasomática de los horizontes carbonatados con la circulación hidrotermal, favorecida por las discontinuidades de la estratificación.

Las mineralizaciones se sitúan, por tanto, en litologías diversas, pero éstas, a su vez, condicionan los aspectos composicionales (alteraciones y gangas), texturales y morfológicos de aquéllas.

No se han localizado en el área estudiada estructuras claras de alimentación, con fracturas y halos de alteración hidrotermal, pudiendo indicar que se trata, en general, de mineralizaciones relativamente distales y dispersadas con respecto a los sistemas de emisión hidrotermal. Uno de estos sistemas, oculto parcialmente bajo el Silúrico, podría, sin embargo, localizarse en la zona de Liat-Urets, a lo largo de un corredor de fracturación precoz y dirección ONO-ESE (figs. 6 y 7), deducido por la agrupación y superposición de las mineralizaciones sobre él y por su coincidencia con los cambios paleogeográficos descritos anteriormente.

El origen del hidrotermalismo y de los metales es problemático y especulativo. Pudo estar conectado a una actividad ígnea (subvolcanismo o volcanismo distal). O bien, como se ha intentado explicar (RUSSELL et al., 1981) para depósitos comparables (Rammelsberg y otros), por circulación convectiva de metales, previamente lixiviados del substrato o de la misma serie sedi-

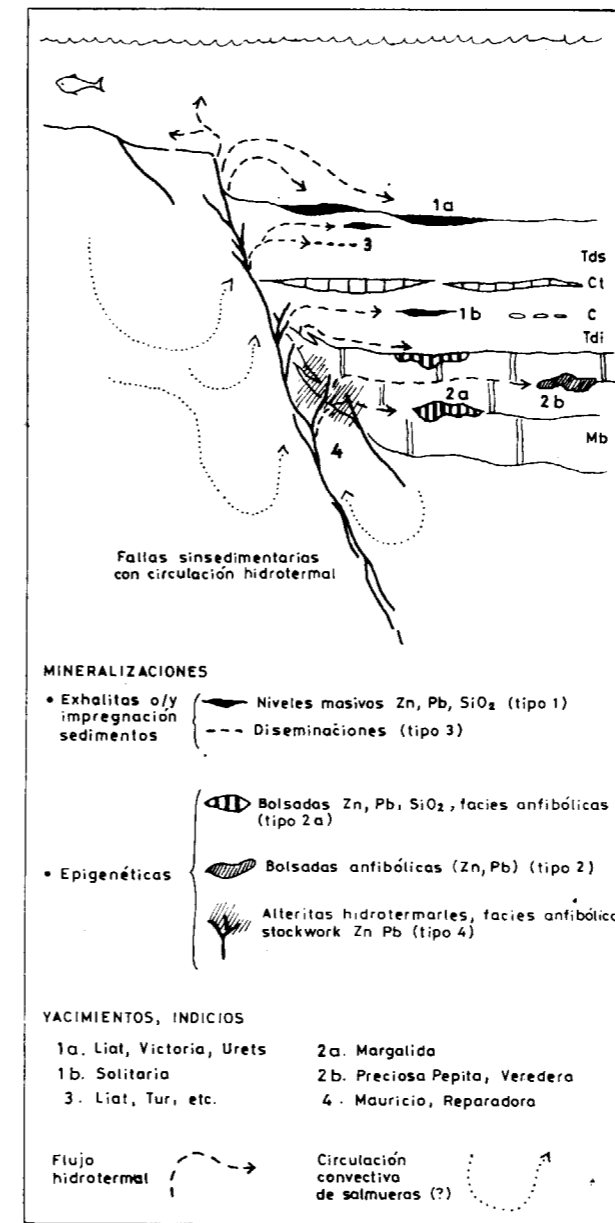


Figura 19.—Interpretación del modelo metalogénico. Canalización de soluciones hidrotermales por fallas sinsedimentarias ordovícicas, con formación penecontemporánea de depósitos sin-diagenéticos (exhalitas submarinas: 1a) o/y impregnación de sedimentos porosos; 1b) y de reemplazamiento epigenético (2a, 2b, 4).

rentes posiciones en la vertical de la serie estratigráfica podrían explicarse, bien por sucesivas intermitencias o pulsaciones hidrotermales, bien por su deposición, más o menos simultánea,

mentaria, favorecida por una fracturación importante y un alto gradiente geotérmico, derivado o no de una fuente magmática.

#### AGRADECIMIENTOS

A la Sociedad Minera y Metalúrgica de Peñarroya - España, por el permiso para la publicación de este trabajo. A Angel Garrote, por el estudio petrográfico, y a Pedro Giménez, por la delimitación. A Carlos Chamón y José Ignacio Manteca, por la lectura crítica del manuscrito. A Ignacio Pujals, por su hospitalidad en el Valle, y por sus observaciones sobre estos yacimientos, que constituyen el tema de su Tesis Doctoral en curso.

#### REFERENCIAS

- ALONSO, J. L. (1979): *Deformaciones sucesivas en el área comprendida entre Liat y el puerto de Orla. Control estructural de los depósitos de sulfuros (Valle de Arán, Pirineos Centrales)*. Tesis. Univ. Oviedo.
- ALVAREZ, A.; CAMPA, J. A., y MONTORIOL, J. (1974): *Sobre la presencia de gahnita ferrífera en Bossost (Vall d'Aran, Lérida)*. Acta Geológica Hispánica, IX, 3, 111-113.
- ALVAREZ, A. (1975): *Estudio de los yacimientos de galena y esfalerita del área de Bossost (Valle de Arán, Lérida)*. Tesis. Pub. Univ. Barcelona.
- ALVAREZ, A.; CAMPA, J. A., y MONTORIOL, J. (1975): *Estudio morfológico, mediante luz reflejada, de piritas procedentes de mina «Solitaria» (Arres, Vall d'Aran, Lérida)*. Acta Geológica Hispánica, X, 3, 104-108.
- ALVAREZ, A.; CAMPA, J. A., y MONTORIOL, J. (1977): *Mineralogénesis de los yacimientos del área de Bossost (Vall d'Aran, Lérida)*. Acta Geológica Hispánica, XII, 4-6, 123-126.
- AYE, F., y PICOT, P. (1976): *Sur les minéraux d'étain dans les amas sulfurés massifs: découvertes récentes, inventaire, géologie*. C. R. Acad. Sci. Paris, 282, D, 1909-1912.
- BERNARD, A., y FOGLIERINI, F. (1964): *A propos des «filons hydrothermaux» de Pierrefitte-Nestalas*. C. R. Acad. Sci., Paris, 258, 274-277.
- BOIS, J. P., y POUIT, G. (1976): *Les minéralisations de Zn(Pb) de l'anticlinorium de Pierrefitte: un exemple de gisements hydrothermaux et sédimentaires associés au volcanisme dans le Paléozoïque des Pyrénées centrales*. Bull. B. R. G. M., II, 11, 6, 543-567.
- BERNARD, A.; DAGALLIER, G., y SOLER, E. (1981): *The exhalative sediments linked to the volcanic massive sul-*

*phide deposits: a case history of European occurrences*. In: Amstutz, G. C., et al. (ed.): «Ore genesis, the State of the Art», Springer Verlag, 553-563.

B. R. G. M. (1972): *Carte géologique à 1/50.000, Pic de Maubermé*, núm. 1085.

BAUCHAU, C. (1971): *Essai de typologie quantitative des gisements de Pb et Zn avec la répartition de Ag*. Bull. B. R. G. M., II, 11, 3.

BRAUX, C. (1980): *Etude géologique des hautes vallées d'Aston et du Louron (Zone primaire axiale des Pyrénées centrales). Les minéralisations Zn(Pb-Cu) et Mn*. Thèse 3<sup>o</sup> cycle, Univ. Orléans.

CAMPA, J.; ALVAREZ, A., y MONTORIOL, J. (1976): *Sobre la presencia de una fusión local de sulfuros en mina «Solitaria» (Vall d'Arán, Lérida)*. Acta Geológica Hispánica, XI, 3, 79-83.

CARDELLACH, E., y ALVAREZ, A. (1979): *Interpretación genética de las mineralizaciones de Pb-Zn del Ordovícico Superior de la Vall d'Aran (Lérida)*. Acta Geológica Hispánica, 14, 117-120.

CARDELLACH, E.; PHILLIPS, R., y AYORA, C. (1982): *Metamorphosed stratiform sulphides of the Liat area. Central Pyrenees, Spain*. Trans. Instn. Min. Metall. (Sect. B: Appl. earth sci.).

CLOSAS, J. (1949): *Reconocimiento de una espínela cincífera en las blendas del Valle de Arán*. Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat., 47, 3-4, 227-230.

COLLEY, H. (1976): *Classification and exploration guide for Kuroko-type deposits based on occurrences in Fiji*. Trans. Instn. Min. Metall., B190-199.

DAGALLIER, G. (1981): *L'environnement volcano-sédimentaire et les minéralisations à Fe-Zn-Pb de l'Ordovícien terminal de Pierrefitte-Nestalas (Hautes-Pyrénées, France)*. Sci. de la Terre, XXIV, 3-4, 262-366.

FRIZZO, P.; MILLS, S., y VISONA, D. (1982): *Ore petrology and metamorphic history of Zn-Pb ores, Monteneve, Tyrol, N. Italy*. Mineral. Deposita, 17, 333-347.

GUERIN, P. (1979): *Les minéralisations zincifères de l'Ordovícien de la région de Liat (Vall d'Aran, Prov. de Lérida, Espagne)*. Thèse 3<sup>o</sup> cycle. Univ. Paris VI.

GUILLOU, J. J. (1969): *Contribution à l'étude des minéralisations ordoviciennes en antimoine de la Sierra del Cau-rel (prov. de Lugo et d'Orense, Espagne)*. Sci. de la Terre, XIV, 1, 5-26.

HUTCHINSON, R. W. (1980): *Massive base metal sulphide deposits as guides to tectonic evolution*. Geol. Ass. of Canada, 20, 660-684.

JACQUIN, J. P., y PINEDA, A. (1980): *Sobre la metalogenia del subdistrito de La Carolina (Sierra Morena oriental, España). Una nueva interpretación posible. Reflexiones sobre su investigación*. Stud. Geol. Salmant., XVI, 59-70.

LARGE, D. (1988): *The evaluation of sedimentary basins for massive sulfide mineralization*. In: Base Metal Sulphide

*Deposits*. G. H. Friedrich y P. M. Herzig (Eds.), Springer-Verlag, Berlín, Heidelberg.

MIROUSE, R. (1962): *Recherches géologiques dans la partie occidentale de la Zone primaire axiale des Pyrénées*. Thèse Sci. Toulouse et Mém. Carte Géol. Fr., 1966.

MONTORIOL, J.; CAMPA, J. A., y ALVAREZ, A. (1974): *Sobre el origen sedimentario-diagenético de la mineralización del yacimiento «Margalida» (Bossost, Vall d'Aran)*. Est. Geol., XXX, 481-484.

LOUDIN, E.; POUIT, G., y TOLLON, F. (1988): *Les minéraux en trace de Ni-Co, Sn, Ge-Ga, Pb-Sb, Ag et Au, témoins de l'évolution de l'hydrothermalisme de l'Ordovícien au Dévonien dans les minéralisations zincifères des Pyrénées Centrales*. Bull. Minéral., 111, 49-63.

OVEJERO, G. (1975-1979): *Investigaciones mineras en el Valle de Arán. Informes internos*. Sociedad Minera y Metalúrgica Peñarroya-España, S. A.

OVEJERO, G. (1987): *Mineralizaciones Zn-Pb del Ordovícico Superior del Valle de Arán (Anticlinorio de Bossost). Pirineo de Lérida (España)*. Bol. Soc. Esp. de Mineralogía, 10-1, 35-37.

PELHATE, A., y MIROUSE, R. (1980): *Formations sédimentaires synorogéniques de France: quelques exemples relatifs au cycle varisque*. In: *Géologie de la France, Colloque C 7, 26<sup>o</sup> CGI*, B. R. G. M.

PETERSEN, E. (1982): *Tin in volcanogenic massive sulfide*

*deposits: an example from the Geco Mine, Manitowadge district, Ontario, Canada*. Econ. Geol., 81, 323-342.

POUIT, G. (1975): *Les minéralisations Zn-Pb ordoviciennes et dévoniennes des Pyrénées centrales*. Bull. B. R. G. M., II, 11, 1, 57-58.

POUIT, G. (1978): *Différents modèles de minéralisations «Hydrothermale Sédimentaire» à Zn(Pb) du Paléozoïque des Pyrénées Centrales*. Mineral. Deposita (Berl.), 13, 411-421.

POUIT, G.; BOUQUET, C., y BOIS, J. P. (1979): *Les principaux niveaux minéralisés (Zn, Pb, Cu, Ba) du Paléozoïque des Pyrénées centrales: éléments de synthèse*. Bull. B. R. G. M., II, 1, 23-34.

POUIT, G. (1986): *Les minéralisations Zn-Pb exhalatives sédimentaires de Bentailou et de l'anticlinorium paléozoïque de Bossost (Pyrénées ariégeoises, France)*. Chron. rech. min., 485, 3-16.

RUSSELL, M. J.; SOLOMON, M., y WALSHE, J. L. (1981): *The genesis of sediment-hosted, exhalative Zinc+Lead deposits*. Mineral. Deposita, 16, 113-127.

SITTER, L. U. DE, y ZWART, H. J. (1962): *Geological map of the Paleozoic of the Central Pyrenees*. Sheets 1 and 2. Leidse Geol. Med., 27, 191-236.

VISVANATH, S. N. (1957): *Etude géologique de la région minière de Sentein (Pyrénées ariégeoises)*. Thèse Univ. Nancy, 1955, Sci. de la Terre, V, 2-3, 137-244.

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

## AGUAS SUBTERRANEAS

# Las sequías. Repercusiones especialmente en aguas subterráneas.

Por A. NAVARRO ALVARGONZALEZ (\*)

## RESUMEN

Se analiza el concepto de sequía como una situación hidrológica en la que se producen aportaciones meteóricas inferiores a las medias durante períodos de tiempo dilatados, con la consecuencia de que el sistema de infraestructuras disponibles no es capaz de satisfacer las demandas. Se estudia el efecto según diferentes demandas y situaciones, extendiéndose en el efecto, en la cantidad y calidad de las aguas subterráneas.

Se concluye aconsejando, frente a posibles sequías, una planificación anticipatoria más que un manejo de emergencias.

*Palabras clave:* Sequía, Aguas subterráneas, Agricultura, Abastecimientos.

## ABSTRACT

The concept of drought, as a shortage of rainfall for a period of time long enough to prevent adequate water supply is analyzed. Drought impact is examined in relation with forest and bush vegetation, agriculture production, hydroelectric power output, urban water supply, and quantity and quality of groundwater.

The conclusion is that we should avoid the spirit of crisis management and to move instead into a risk management emphasis, an anticipatory contingency-oriented planning approach.

*Key words:* Drought, Groundwater, Agriculture, Water supply.

Recientemente han tenido lugar en Madrid unas Jornadas sobre las Sequías. La mayor parte del material utilizado en el presente trabajo ha sido tomado de aquellas Jornadas, y en su lugar se hace la debida referencia a los específicos autores.

## 1. DEFINICION Y TIPOS

La primera dificultad cuando se habla de sequía es ponernos de acuerdo los diversos interlocutores sobre lo que se entiende o se debería entender por esa calificación.

En principio (1), la idea de sequía se relaciona con una carencia de agua de carácter temporal debida en su mayor parte a un desequilibrio meteorológico, sea de lluvias, sea de temperaturas

o de varios de estos y otros factores simultáneamente.

Pero cuando se intenta analizar la cuestión a través de datos climatológicos, especialmente de la precipitación, nos encontramos que los enfoques pueden ser múltiples, ya que tales datos deben correlacionarse con los efectos, y estos efectos, aun a grandes rasgos, son muy diferentes.

Basándonos en los fenómenos de escasez de alimentos, es decir, una reducción drástica en la obtención de productos alimenticios, tenemos la que podríamos llamar *sequía agronómica*, por depender de la acción sobre las especies cultivadas en secano, que suponen la parte más importante de las superficies de cultivo.

Dada la extensión de las superficies regadas, muy incrementadas en muchas partes del mundo, en las dos últimas centurias, basándose precisa-

mente en la necesidad de que las altas y más constantes producciones obtenidas bajo riego permitan paliar las fuertes oscilaciones del secano, han dado lugar a la proliferación de embalses con tal finalidad, aunque, simultáneamente, se hayan desarrollado para éstos otras fuertes demandas tales como el uso urbano y el industrial. Sobre los embalses actúa también la escasez de precipitaciones, aunque sea en formas distintas, y como no todos son de regulación interanual, pueden producirse déficits que afectan no sólo a la producción de alimentos, sino a las nuevas demandas urbana e industrial, con impactos muy negativos. A éstas podríamos llamarlas *sequías hidráulicas*.

Si analizamos el impacto de la sequía sobre la vegetación en general, y como consecuencia sus repercusiones en la fauna, podemos tomar como efecto la materia seca producida en el período vegetativo y establecer unos límites según sus posibilidades de regeneración posterior o de alimentar una cierta población animal. Con este enfoque podríamos hablar de una *sequía ecológica*, tal vez la más claramente relacionada con los fenómenos de erosión y desertificación.

Finalmente se trataría de considerar el propio fenómeno pluviométrico, para tratar de establecer las condiciones objetivas que corresponden al fenómeno de la sequía, que en este caso podríamos llamar *sequía meteorológica*.

La *sequía meteorológica*, tras analizar datos estadísticos, y definida como aquella que presenta precipitaciones con una desviación típica del orden del 30 por 100, resulta aparecer un año de cada ocho, es decir, no es un fenómeno extraordinario.

La sequía hidráulica representa el rendimiento de la sequía respecto a los embalses. Puede producirse en un año meteorológicamente normal o ligeramente seco, si los aguaceros individuales han sido cortos y numerosos, espaciados en el tiempo de forma que el suelo llegue a secarse en sus horizontes superficiales, que son los que gobiernan la escorrentía directa. El solo hecho de que sean altas las lluvias de verano y bajas las de otoño o primavera puede dar lugar a una sequía hidráulica con un año que pueda considerarse meteorológicamente normal.

La *sequía agronómica* representa el efecto sobre la agricultura de una disminución de cosechas.

Pero al precisar algo más, el propio agricultor se dio cuenta de que muchas veces no era simplemente la escasez de agua el factor dominante, sino la oportunidad de las precipitaciones en relación con el ciclo vegetativo de cada una de las especies que se cultivan. Por ejemplo:

- La cosecha de 1977, prácticamente igual a la más baja de 1974, falló por no tener humedad suficiente durante la polinización (1,6 mm.).
- Por exceso de humedad o lluvia abundante en los pocos días que dura el proceso, fallaron las cosechas en los años de 1971, 1974 (la mínima) y 1981, afectando algo la del año 1976.
- Los años mejores corresponden a lluvias moderadas en abril y a valores medios de la precipitación anual o ligeramente inferiores.

Considerando, por ejemplo, que los años 80-82 fueron de sequía general en España, sin embargo el rendimiento medio en este trienio fue de 1.475 Kg/Ha, un 27 por 100 superior a la media general del período considerado, siendo, además, 1980, el año de máxima producción.

De todo ello es fácil deducir la simple conclusión de que la *sequía agronómica* sólo en escasas ocasiones coincide con la *sequía meteorológica*.

## 2. EFECTO DE LA SEQUIA EN LA CUBIERTA VEGETAL

Se hace notar al considerar las posibilidades de desarrollo de la vegetación natural que, además del interés que ofrece en cuanto a su permanencia a lo largo del tiempo con vistas a la conservación de las especies, resulta fundamental para el mantenimiento de la fauna en condiciones de que, a su vez, no pueda inducir la desaparición de especies animales.

Esta sería la presentación global del problema que en su límite encuentra la desertificación por destrucción del primitivo ecosistema. Lo normal, cuando no se está en condiciones extremas, es conocer la importancia de las variaciones y si éstas amenazan seriamente la supervivencia del ecosistema.

(\*) Instituto Tecnológico GeoMinero de España.

Si partimos de la base que nos proporciona el primer análisis meteorológico, no se ven síntomas de cambios de carácter climático, aunque el número de años es muy corto para entrar en la cuestión, pero lo que sí se observa claramente es la extraordinaria variabilidad de las magnitudes que se manejan, y que a nivel mensual es todavía más acusada, por tanto la vegetación presente, si no hay intervenciones externas, es precisamente la adecuada para hacer frente a esta variabilidad, lo cual no excluye oscilaciones muy amplias a lo largo del tiempo en cuanto a la composición florística, ya que cada especie tiene su propia capacidad de respuesta a los factores meteorológicos.

Bajo este punto de vista, lo más lógico es analizar la producción de materia seca, es decir, la denominada producción primaria neta, como indicador de la productividad primaria del ecosiste-

ma y comparar los valores medios con los que corresponden a años singulares.

Para ello disponemos de dos metodologías que, si bien tienen el mismo punto de partida, se adapta mejor una a la vegetación herbácea y otra a la arbórea. Se trata del modelo de Rosenzweig para el cálculo de la producción primaria neta en función de la evapotranspiración real y el otro es el de los Diagramas Bioclimáticos de Montero de Burgos, relativos a la producción vegetal.

El cuadro siguiente presenta los datos pluviométricos medios y de los dos años considerados en las diez estaciones utilizadas, y cuyo único inconveniente es el de corresponder a núcleos importantes de población y, por tanto, no ser perfectamente representativas de lo que realmente ocurre en pleno campo, pero que, de todos modos, dan unos términos de comparación suficientes.

#### Datos pluviométricos utilizados

Estación	Precipitación anual (sep.-oct.) en mm.				
	Normal	1980-81		1981-82	
		P	%	P	%
Lugo	1.053,8	873,5	83	917,4	87
Burgos A.	603,0	427,0	71	390,9	65
Madrid Getafe	445,0	287,1	65	339,9	75
Badajoz	530,1	294,4	56	330,9	62
Pamplona Noain	1.078,5	843,3	78	624,8	58
Cuenca	571,1	345,8	61	514,5	90
Barcelona	593,2	488,0	82	534,4	90
Murcia	305,4	208,4	68	117,7	39
Jaén	601,1	408,5	68	387,9	65
Almería	231,1	103,1	45	95,9	41

En el cuadro siguiente se presentan los resultados de los cálculos realizados para la obtención de las producciones de materia prima neta por el método de Rosenzweig.

La simple comparación de los porcentajes de ambos cuadros nos pone de manifiesto la diferencia entre las que hemos denominado sequías meteorológica y ecológica. No se observa que tales diferencias respondan a un patrón determi-

nado, y ello se debe a que la auténtica variación a efectos de la vegetación es la que se produce en aquellos períodos, en general muy cortos, que resultan críticos para el desarrollo vegetativo y que, por tanto, exigiría un análisis simultáneo de las precipitaciones y temperaturas diarias, lo cual nos haría perder la posibilidad de comparar con valores medios.

Si aceptamos el índice ecológico de Whittaker,

#### Producción primaria neta (en g. secos/m<sup>2</sup>/año)

Estación	Normal PPN	1980-81		1981-82	
		PPN	%	PPN	%
Lugo	828,7	597,2	72	832,6	100,5
Burgos A.	618,2	452,7	73	430,8	70
Madrid Getafe	463,9	267,5	58	308,2	66
Cuenca	626,6	336,7	54	439,9	70
Badajoz	501,1	310,9	62	218,4	43
Pamplona Noain	1.007,1	632,4	63	522,7	52
Barcelona	878,3	727,8	83	508,7	58
Murcia	294,4	178,4	61	94,4	32
Jaén	512,9	427,9	83	291,7	57
Almería	83,7	59,1	32	57,1	31

según el cual la sequía adquiere carácter de gravedad por bajo de los 250 gr. secos/m<sup>2</sup>/año, vemos que la sequía grave se produjo en ambos años en Murcia y Almería, y en el 81-82 en Badajoz. A ello se podría añadir que Almería sufre sequía grave con carácter permanente, es decir, que sus ecosistemas están constantemente amenazados y que Murcia se encuentra muy próxima a tal situación.

La simple observación de que caídas de la PPN del orden del 50 por 100 no llegan a merecer el carácter de sequía grave cuando la media supera los 500 gr. secos/m<sup>2</sup>/año, hace dudar de la bondad del criterio, ya que parece ignorar que el conjunto florístico de cada ecosistema está adaptado a unas variables meteorológicas y oscilaciones tan amplias parece lógico que puedan tener influencias notables al menos sobre alguna o algunas especies determinadas.

El enfoque dado a este tema por MONTERO DE BURGOS, con sus índices bioclimáticos, parece ser bastante más adecuado, ya que tienen en cuenta las temperaturas, el suelo y la pendiente, además de las precipitaciones. Ello permite para un biotipo determinado conocer las posibilidades de desarrollo de una especie a través de los valores medios de los índices, así como los valores letales que permiten fijar, no sólo las características meteorológicas del año en el cual la especie no puede sobrevivir, sino el conocer estadísticamente cada cuántos años es de esperar que exista un año de carácter letal.

De esta forma sería posible determinar qué especies pueden desarrollarse sin peligro sobre un

biotipo determinado, y, por otra, saber qué grado de peligro tiene la sequía de un año meteorológico determinado para una especie también determinada. Este método, ya operativo para las especies arbóreas más comunes en nuestros montes, es de desear que se amplíe para nuevas especies arbóreas y se aborde su aplicación a especies herbáceas.

#### 3. EFECTO DE LA SEQUIA EN LA AGRICULTURA

La mayoría de las áreas españolas se sitúan dentro de un clima mediterráneo (2). Climas mediterráneos existen con una amplia gama de precipitaciones anuales, desde los 250 mm. en estaciones costeras frescas, 350 mm. en zonas templadas interiores, hasta los 900 mm. en la frontera húmeda. Hay, pues, climas mediterráneos secos, subhúmedos y húmedos, para cuya delimitación se han propuesto muy diversas calificaciones. Lo particular del clima mediterráneo es la coincidencia desplazada de los extremos de precipitación y temperatura, lluvia en época fría, sequía con calor, que contribuye a acentuar los efectos de esa sequía. La distribución de las lluvias hace que se tienda a considerar estas regiones con menor precipitación de la que tienen: en Madrid llueve tanto como en Berlín (RUIZ, 1989, citado por J. A. PARDOS CARRION).

En términos genéricos de humedad, este tipo de régimen se acompaña de una extrema variabilidad. El carácter montañoso de las regiones mediterráneas favorece la variabilidad climática en

el espacio y en el tiempo. A veces, la distribución de precipitaciones varía drásticamente en el transecto de un mismo valle. Y, asimismo, la irregularidad del régimen pluviométrico da lugar a largos e impredecibles períodos de sequía, anuales e interanuales, interrumpidos por fuertes aguaceros, origen de grandes avenidas e inundaciones.

A partir de los datos contenidos en las series pluviométricas más largas de que se dispone, 130 años en veinte observatorios, no ha sido posible hallar tendencias o ciclos para los períodos de sequía ocurridos. En palabras de GARCIA DE PEDRAZA (cita *ibid.*), «nuestra sequía tiene por norma la anormalidad». A continuación se da una lista de las sequías más destacadas.

**Referencia cronológica de sequías más importantes en el interior de España (Castillas, Extremadura, Aragón) (1860-1982) (GARCIA VEGA, 1985)**

Décadas	Sequías más destacadas
1860-69	1867-68-69. Sequía acusada: Otoño 1866 a primavera 1869.
1870-79	1872-73-74.
1880-89	1881. Década lluviosa y templada.
1890-99	1897-98-99.
1900-09	1906-07-08.
1910-19	1917-18. Olas de frío en diciembre de 1918.
1920-29	1921-22-23.
1930-39	1931, 1934-35. Olas de frío en enero de 1939.
1940-49	1943-44-45 y 1948-49. Década más seca del registro. Años del hambre. Pertinaz sequía.
1950-59	1952-53-54. Ola de frío en febrero de 1956.
1960-69	1964. Década lluviosa y templada. Ola de frío en diciembre de 1962.
1970-79	1970-71, 1973-74-75. Heladas en marzo de 1977.
1980-89	1980-81-82-83. Sequía persistente.

Un período de sequía puede inducir o no déficits hídricos sobre los cultivos, en función de la disponibilidad de agua del suelo y de la demanda evaporativa de las plantas. Suelos con gran capacidad de retención de humedad, como son los profundos de textura fina, toleran mejor períodos de falta de lluvia que suelos superficiales y de textura gruesa. Si un período de sequía coincide con una época crítica de desarrollo del cultivo, por ejemplo, el principio de la floración tendrá un efecto mucho mayor sobre el rendimiento que en períodos en que las plantas tienen menor demanda hídrica.

La sequía afecta a la producción de los cultivos siempre y cuando induzca déficits hídricos en los mismos. Los efectos de los déficits hídricos en la morfología y fisiología de las plantas son múltiples. Dichos efectos se manifiestan primero a nivel molecular y celular y son integrados a lo largo de los diferentes niveles de organización biológica hasta llegar al nivel de comunidad de plantas cultivadas, que es el relevante en la producción agrícola.

Además de este efecto, más o menos directo de la sequía sobre los cultivos, que afecta fundamentalmente a la agricultura de secano, la ausencia de lluvias tiene un efecto sobre la agricultura de regadío, si el período de sequía es prolongado, de forma que se reduce la escorrentía superficial que recarga los embalses reguladores de los recursos superficiales o disminuye la percolación profunda que recarga los acuíferos subterráneos, disminuyendo de esta forma la disponibilidad de agua para los regantes.

En la última década ha habido tres períodos de sequía que afectaron principalmente a las cuencas del Guadiana y del Guadalquivir. Actualmente la escasez de lluvias está afectando a los regadíos del Duero y del Ebro, así como a la agricultura de la cornisa cantábrica.

La existencia de déficits hídricos tiene un efecto directo sobre el rendimiento de los cultivos (3), que afecta directamente a la producción agrícola y, por tanto, a la renta de los agricultores y al empleo en el medio rural. Indirectamente afecta a la industria que suministra insumo —semillas, abonos, productos químicos, etc.— y a las industrias de transformación y comercialización de productos agrícolas.

Los déficits de precipitación tienen una repercusión diferente para la agricultura de secano que para el regadío. En la agricultura de secano tiene una importancia mayor la regularidad en la distribución de las lluvias que la precipitación total, mientras que el regadío depende de la disponibilidad de recursos hidráulicos regulados, que es función de la escorrentía, que, a su vez, depende, en mucha mayor medida, de la precipitación total y de la concentración de las lluvias en períodos de baja evaporación.

En la tabla se muestran los datos de precipitación media del total de las cuencas hidrográficas de la España peninsular en el último decenio y los rendimientos medios de algunos cultivos. Se incluye también la precipitación media de la cuenca del Guadalquivir, por su significado en la producción agrícola y por hacerse referencia posteriormente al analizar la incidencia de las sequías en las zonas regables.

No se distingue claramente una relación signifi-

**Datos de precipitación y rendimientos de algunos cultivos (MAPA, 1989)**

Años	P (mm.) Media cuencas	Guadal- quivir	Rendimiento (t/Ha)						
			Trigo	Cebada	Arroz	Maíz	Remo- lacha	Algodón	Girasol
1943-70	702	645	—	—	—	—	—	—	—
1979	—	—	1,60	1,80	6,23	4,74	35,3	2,72	0,79
1980	472	317	2,24	2,43	6,33	5,09	37,7	3,27	1,00
1981	439	325	1,29	1,36	6,43	5,03	36,5	2,84	0,51
1982	500	350	1,65	1,46	5,94	5,57	35,0	3,21	0,91
1983	472	265	1,64	1,78	5,49	5,09	38,6	3,05	0,81
1984	586	642	2,62	2,68	6,03	5,75	36,8	2,74	1,09
1985	469	479	2,61	2,52	6,20	6,49	36,7	3,20	0,93
1986	476	394	2,08	1,71	6,32	6,53	39,4	3,20	0,93
1987	559	640	2,61	2,23	6,12	6,52	44,2	3,16	1,01
1988	481	357	2,79	2,89	6,25	6,43	47,5	2,60	1,22

cativa entre la precipitación total y los rendimientos de los cultivos, especialmente en los de regadío —maíz y algodón—, que no dependen tan directamente de las lluvias como los de secano. En los cereales de invierno se aprecian rendimientos inferiores en el período más seco de 1981 a 1983.

Esta falta de relación puede ser debida a que estos datos medios se refieren a todas las cuencas, cuando el impacto de las sequías en este período fue más acentuado en las cuencas de la mitad sur, y también a causa de que en el rendimiento influyen otros factores además de la precipitación.

El efecto de las sequías sobre la agricultura ha sido más estudiado en lo que se refiere al regadío, por la importancia que éste tiene en la producción agrícola —en España, tres millones de hectáreas de tierras regables contribuyen a la

producción total, aproximadamente en la misma cuantía que 17 millones de hectáreas de secano—, y también debido a que en el manejo de las zonas regables existen más posibilidades para hacer frente al impacto negativo de las sequías.

Así ha sido en la cuenca del Guadalquivir, donde la Confederación Hidrográfica elaboró un detallado informe sobre la incidencia del período de sequía 1979-1983 sobre los regadíos de la cuenca y el IRYDA otro similar correspondiente al período 1980-1990. Como ejemplo del impacto de las sequías sobre la agricultura de regadío se resume a continuación la información procedente de estos trabajos.

Durante el último decenio se han producido en Andalucía tres graves sequías, con distintas consecuencias para la agricultura; la del período 82-83, que fue la más grave; la de 1989, la más



leve. Estas sequías afectaron a los regadíos del Guadalquivir, Guadalete y Barbate.

En 1982 ya hubo escasez de recursos hidráulicos, lo que obligó a reducir la dotación de las zonas regables a 6.000 m<sup>3</sup>/ha, cuando las dotaciones anteriores eran de 16.000 m<sup>3</sup>/ha en el valle superior y de 12.000 m<sup>3</sup>/ha en el Bajo Guadalquivir. Los rendimientos de los cultivos disminuyeron, especialmente en el arrozal, donde se alcanzaron producciones de 3.000 kg/ha —menos de la mitad del rendimiento normal en la zona—, debido a que la superficie sembrada no disminuyó y, por tanto, hubo riego insuficiente.

La sequía de 1983 fue mayor aún y provocó graves restricciones en el suministro de agua. Los recursos disponibles al principio de la campaña de riego eran un 40 por 100 de los recursos medios, lo que supuso que la dotación disponible fuera de 2.700 m<sup>3</sup>/ha, y el caudal en el tramo inferior del río de 5 m<sup>3</sup>/s. Esto motivó que no se sembrara arroz y que se redujera la superficie regada en las zonas dependientes de regulación general a una cuarta parte, prohibiéndose las siembras de segundas cosechas.

En otras zonas regables la situación fue más grave, por ejemplo en el Bembézar, donde sólo se dispuso de un 10 por 100 de la dotación normal, lo que permitió atender solamente las 1.400 hectáreas de cultivos permanentes —frutales y cítricos—, dejándose de regar las 14.000 hectáreas restantes. En todas las zonas regables la campaña de riegos terminó a final de agosto.

La experiencia de estos años fue, en cierto modo, positiva, ya que los regantes fueron conscientes del uso en exceso del agua, por lo que a partir de entonces las dotaciones se fijaron en 7.500 m<sup>3</sup>/ha, penalizándose económicamente a las comunidades de regantes que sobrepasaran esa cifra.

En 1989 los embalses que suministran agua a los regadíos de la cuenca embalsaron solamente un 24 por 100 de su capacidad (790 h<sup>3</sup>), cuando las necesidades de riego se cifran en el 50 por 100 (1.600 h<sup>3</sup>). Como consecuencia de ello, las dotaciones se fijaron en 2.500 m<sup>3</sup>/ha, y el caudal disponible para el arrozal en 9 m<sup>3</sup>/s. Esto supuso que en las zonas regables con escasa dotación sólo se sembró el 25 por 100 de la superficie, prohibiéndose el riego provisional —en regadíos

sin concesión administrativa— y las segundas cosechas. Esto ocasionó que se redujera la superficie sembrada de algodón a un 18 por 100 y de maíz a un 3 por 10, aumentando la superficie sembrada de girasol. En el arrozal solamente se sembró un 30 por 100 de la superficie en aquellas tierras que permitieron un mejor aprovechamiento del agua disponible, obteniéndose rendimientos aceptables.

En 1990 también la sequía ha afectado a los embalses de regulación general, por lo que las dotaciones se han limitado a 6.000 m<sup>3</sup>/ha y el caudal para el arrozal a 25 m<sup>3</sup>/s., siendo el normal de 30 m<sup>3</sup>/s. Por tal motivo ha aumentado la superficie sembrada de girasol y no ha habido segundas cosechas. En el arrozal se había sembrado toda la superficie, pero se limitaron los riegos a cinco días por semana, lo que produjo disminución de los rendimientos.

Las consecuencias económicas de los efectos de la falta de recursos hídricos para el riego son difíciles de calcular. La estimación efectuada en el informe de la Confederación Hidrográfica (REIN, 1984) alcanzaba, para 1983, una pérdida de la producción agrícola en las zonas regables de un 37 por 100 sobre una producción agrícola bruta valorada en 38.554 millones de pesetas, siendo las pérdidas de jornales acumuladas en el período 1982-83 de aproximadamente 1.150.000. Los efectos indirectos sobre las industrias de suministros y transformación no se determinaron, dada la dificultad de la evaluación.

En España, desde principios de siglo (4), se han ensayado fórmulas de cobertura de las producciones agrarias frente a los riesgos climatológicos, tanto por la iniciativa privada como por la pública.

El actual sistema español de seguros agrarios combinados fue creado por la Ley 87/1978, de 28 de diciembre de 1978, y el Reglamento que la desarrolla aprobado por Real Decreto 2.329/79, de 14 de septiembre de 1979; del análisis de ambos textos se podría concluir que el legislador ha diseñado un sistema muy ambicioso en cuanto a las coberturas y con un fuerte intervencionismo de la Administración en su diseño, circunstancias que hacen necesariamente compleja la gestión.

Parte del recibo de prima es subvencionada por

el Estado; la Ley establece la participación estatal en el precio del seguro con el límite máximo del 50 por 100 y mínimo del 20 por 100 del total de las primas.

La sequía se cubre únicamente en los seguros denominados integrales. Con todo, tanto la importancia del cultivo en nuestro país, como el nivel de implantación del seguro, hacen que nuestro análisis se centre en el Seguro Integral de Cereales de Invierno.

Este seguro cubre exclusivamente en cantidad la cosecha de cereales de invierno en secano simultáneamente contra:

- La diferencia que se registre, en la explotación en su conjunto, entre la producción garantizada y la producción final. Esta pérdida deberá producirse como consecuencia de cualquier causa o factor que obedezca a fenómenos que no puedan ser normalmente controlados por el agricultor, excepto el pedrisco e incendio.
- Los daños que en cantidad ocasione el pedrisco y/o incendio sobre la producción real esperada en cada una de las parcelas que componen la explotación.

Si bien con la definición de cobertura del apartado a) anterior se pretendía cubrir fundamentalmente la sequía, el golpe de calor que en primavera impide la correcta granazón de la espiga y la helada. Lo cierto es que el planteamiento de este seguro como cobertura integral en lugar de como multirriesgo ha generado no pocos problemas desde el punto de vista técnico y financiero:

- La sequía, al igual que la helada, presenta exacerbado el problema de cúmulos de siniestrabilidad, ya que el acaecimiento del riesgo puede afectar a amplias regiones.

Aunque el nivel de desagregación de los datos disponibles en la Agrupación para este seguro, dada la configuración del mismo, sólo distingue como causas de siniestro entre pedrisco, incendio y resto de riesgos, la experiencia nos dice que en estos últimos cuatro años prácticamente el 90 por 100 de los siniestros calificados como ocasionados por el resto de los riesgos se deben a sequía o a «asurados» provocados por vientos cálidos en la época de formación de la espiga. En

este sentido, cabe destacar que 16 comarcas situadas en seis provincias aportan el 60 por 100 de la siniestralidad total del Estado imputable a riesgos distintos del pedrisco y del incendio, durante los últimos cuatro años, con 12.660 millones, frente a los 21.170 millones de pesetas del total nacional (tabla 1).

#### 4. EFECTO DE LA SEQUIA EN LA PRODUCCION HIDROELECTRICA

El efecto de la sequía en la producción hidroeléctrica se resume en el diagrama de la página siguiente (5).

#### 5. INFLUENCIA EN LA CALIDAD DE LAS AGUAS SUPERFICIALES

La hipotética influencia de los períodos de sequía meteorológica sobre la calidad de las aguas, aumentándose su carga contaminante por disminución de los caudales circulantes, no ha podido ser comprobada en los ríos españoles desde el sistema de control disponible (6).

De todos los parámetros físico-químicos que se emplean para definir la composición de las aguas fluviales, y, por tanto, para estimar su calidad, únicamente las sales solubles podrían presentar algún tipo de relación estadística con el caudal fluyente. No así los parámetros influidos por la fotosíntesis o la oxidación espontánea. Los índices de calidad integrados por estos constituyentes del agua tampoco presentan relaciones significativas con el caudal.

En España el aprovechamiento racional de las aguas de los ríos exige un alto grado de regulación por embalses. Por ello los caudales circulantes no son los que cabe esperar de la hidraulicidad natural, siendo más discrepante de ella la circulación de aguas bajas que la de períodos de avenida.

Los resultados obtenidos de los datos disponibles corroboran estas manifestaciones. Las regresiones cuya representación gráfica se ha aportado, presentan nubes de puntos en la zona de caudales reducidos, para las cuales el ajuste es poco menos que ilusorio.

**TABLA 1**  
**Porcentaje de indemnización respecto a valor asegurado**

Provincia / Comarca	Año 1986	Año 1987	Año 1988	Año 1989	Media ponderada
<b>Huesca:</b>					
Hoya de Huesca	12.59	21.28	0.01	16.61	13.14
Monegros	36.26	21.52	0.00	22.81	22.44
Bajo Cinca	30.99	15.20	0.00	9.46	17.59
<b>La Rioja:</b>					
Rioja Baja	22.01	20.59	0.18	6.42	11.78
<b>Navarra:</b>					
Media	4.74	3.90	0.11	16.08	7.14
La Ribera	18.54	17.11	0.19	10.92	10.67
<b>Palencia:</b>					
El Cerrato	17.87	6.78	0.04	13.72	9.27
Campos	6.13	1.53	0.00	15.37	9.45
<b>Valladolid:</b>					
Tierra de Campo	17.15	0.75	0.43	17.41	9.19
Centro	17.22	7.42	0.00	26.02	12.72
Sur	28.76	5.05	0.00	20.54	11.20
Suroeste	21.95	7.72	0.00	16.29	9.78
<b>Zaragoza:</b>					
Egea Caballeros	16.42	10.47	0.16	38.13	17.87
Borja	28.73	23.88	0.00	3.00	17.47
Zaragoza	25.52	14.41	0.12	11.07	14.38
Caspe	19.25	14.34	0.00	1.40	10.17
<b>TOTAL NACIONAL</b>	<b>11.06</b>	<b>4.41</b>	<b>0.47</b>	<b>7.49</b>	<b>5.88</b>

FUENTE: Agrupación Española de Entidades Aseguradoras de los Seguros Agrarios Combinados, S. A.

Mientras la regulación domine el régimen de caudales no puede haber relaciones entre sequía y calidad. Si la sequía fuese tan prolongada que se agotase la capacidad de regulación de los embalses, no sólo disminuirían los caudales fluyentes, sino también los vertidos contaminantes. Pero estas disquisiciones son puramente teóricas, a las que no se puede extrapolar lo comprobado en la realidad.

**6. INFLUENCIA EN EL AGUA SUBTERRANEA**

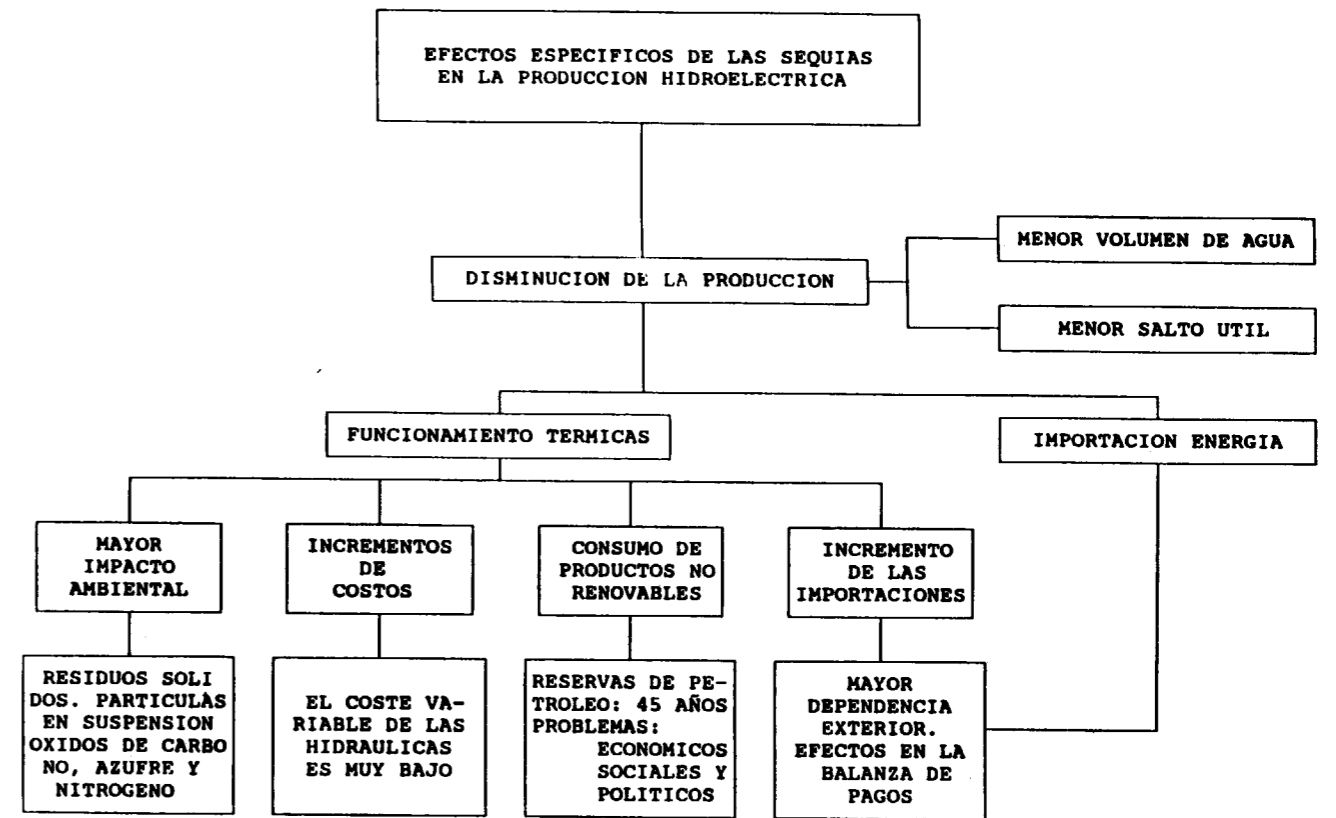
Las aguas subterráneas (7) parecen tener una especial sensibilidad frente a las sequías de invierno, ya que es en esta estación cuando hay lluvias más intensas y los embalses subterráneos se recargan mayoritariamente. En primavera, sólo sequías prolongadas, o con comienzo en el invierno anterior, originan déficits importantes; las sequías de otoño tienen el efecto de retrasar la recarga de los acuíferos.

De todas formas, como hay siempre un umbral para la infiltración, si la sequía hace que las lluvias no sobrepasen ese umbral, la recarga puede ser nula.

El desfase temporal existente entre el período de lluvias y el de recarga de acuíferos es también muy variable entre días, para acuíferos superficiales y karstificados, meses para la mayoría de los acuíferos libres, o años en el caso de acuíferos confinados.

Fundamentalmente, la sequía determina un cambio en el sistema de explotación-regulación. Estos sistemas son fundamentalmente dos: embalses de agua superficial y sistemas de bombeo de aguas subterráneas.

En el caso ideal de un sistema hidráulico ampliamente equipado, diversificado y con capacidad suficiente, el fenómeno de sequía ha de ser mínimo: ante un déficit de humedad, los sistemas de riego lo compensan: los caudales de es-



tiaje se incrementan a partir de los embalses o por bombeo de los acuíferos; en caso de depresiones intolerables en los acuíferos, se recargan artificialmente, etc.

La regulación de las aguas superficiales sólo es efectiva hasta un cierto punto denominado umbral de sequía. La capacidad de embalse se dimensiona, en principio, para unas demandas definidas, hasta un cierto nivel de garantía, definida por la capacidad de almacenamiento, de forma que frente a sequías repetidas se consigue no una total compensación, sino una amortiguación de efectos.

En ocasiones, como alternativa o ayuda frente a esta situación, es posible que el almacenamiento de agua subterránea disponga de grandes recursos de agua. La utilización más común es bombeo, para regadío y abastecimiento a núcleos urbanos. En alguna ocasión se efectúa bombeo a embalses o al río para mantener caudales de estiaje. Las consecuencias de los bombeos sobre los caudales de base se dejan notar, normal-

mente, al cabo de algunos meses, en los que frecuentemente la sequía ya ha desaparecido. Muchas veces los bombeos se efectúan en períodos de caudales nulos. En cualquier caso, el desfase en el tiempo entre la acción de bombeo y sus efectos sobre el caudal de base hace que éstos se amortigüen notablemente, llegando incluso a desaparecer en algunas ocasiones.

El efecto de las sequías sobre los elementos del balance supone una alteración, principalmente entre los términos de ingreso de agua y los de variación del agua almacenada. Si los efectos de las sequías han de ser paliados totalmente, la disminución de «ingreso» ha de compensarse exactamente con la disminución del «agua almacenada», ya sea ésta superficial o subterránea. Y los efectos de la sequía podrán evitarse sólo hasta el grado en que la disminución factible del almacenamiento pueda compensar el ingreso.

Si la utilización del agua almacenada es sólo posible a partir de las aguas subterráneas, el efecto primero que se detecta es una disminu-

ción de los niveles piezométricos que reflejan de algún modo la disminución de agua almacenada en los embalses subterráneos.

Pero también hay que advertir que la mera disminución de nivel no puede adscribirse sin más a una sequía. Como ese descenso no se detecta a veces hasta pasado cierto tiempo, es con frecuencia difícil de analizar, y puede deberse a otros motivos, como, por ejemplo, una expansión en la demanda agrícola.

El impacto en los acuíferos subterráneos por efecto de la disminución de la precipitación se refleja a través de un abatimiento de los niveles de agua. Este descenso, en general, presenta oscilaciones de tipo estacional, ligadas al año hidrológico, y se superpone en zonas de explotación intensiva a descensos acumulados importantes.

Igualmente se pone de relieve la importancia potencial, a la hora de paliar un déficit de agua superficial o de precipitación, de la reserva de agua subterránea almacenada, que hasta una profundidad de 75 metros se valoran en unos 300.000 hectómetros cúbicos.

El déficit de precipitación produce una disminución en la alimentación (infiltración, entradas laterales desde aguas superficiales y recarga desde acequias y por excedentes de riego) y un aumento de la explotación (mayor demanda urbana, complementar riegos existentes).

La incidencia de estos elementos en el comportamiento de los niveles piezométricos se puede agrupar en tres tipos mayores:

- Areas con sistemas acuíferos donde se producen descensos y ascensos estacionales correspondientes al año hidrológico. En esa circunstancia se encuentran la mayoría de los acuíferos. En general, las depresiones adicionales por la sequía no superan los 5 metros, y se recuperan rápidamente con las primeras lluvias.
- Areas con descensos acumulados en algunas zonas, donde la depresión adicional por sequía no se recupera fácilmente. Generalmente, corresponde a áreas con excesiva concentración de explotaciones, más que a vaciados generales de acuíferos (La Moraña, Esgueva, Villalpando, etc., en el Duero; Alcázar, Llanos,

Manzanares, Ossa de Montiel, etc., en el Guadiana; Moncófar, Sagunto, Denia, etc., en el Júcar; Carmona, Sanlúcar, Rota, etc., en el Guadalquivir; Torremolinos, Dalías, etc., en el Sur; etc.).

- Areas con descensos acumulados en todo el acuífero. Aquí el impacto de las sequías repercute enteramente sobre las reservas de agua subterránea (Valle del Guadalentín, Campo de Cartagena, Prebético de Murcia, etc.).

Por último, cabe indicar casos de uso de agua subterránea para satisfacer demandas punta, coincidentes generalmente con épocas estivales (abastecimientos de Sevilla, Morón de la Frontera, Ciudad Real, etc.).

Como puntos relevantes se pueden citar:

- La especial sensibilidad de los manantiales a las sequías, ya que al descender el nivel son los primeros afectados, hasta secarse, y por ello son los más necesitados de obras de regulación, dado que con lluvias su recuperación se hace con buena rapidez.
- Las grandes reservas de agua subterránea en el Duero y Ebro hace que las sequías puedan aliviarse aumentando la utilización de éstas, sin mayor afección salvo en zonas locales de alta concentración de labores, en el Duero.
- En los acuíferos principales del Tajo, por su inercia en la recarga, las sequías no producen efectos apreciables. Por su baja permeabilidad se utilizan sólo para abastecimientos locales de pequeña demanda.
- En la Cuenca Alta del Júcar la sequía del 80-83 produjo un déficit de alimentación de aproximadamente el 35 por 100 de infiltración, lo que, sumado a un aumento del 20 por 100 de la extracción, totaliza un déficit de 350 hectómetros cúbicos al año, que se refleja en descensos de varios metros de nivel piezométrico y el de las salidas a ríos, que también disminuyen (por ejemplo, Jardín y Lezuza). En el resto de la Cuenca del Júcar, en la Alta, las sequías, cuando producen descensos de hasta 7 y 10 metros en acuíferos carbonatados, se recuperan fácilmente. En la Baja, el impacto de la sequía en niveles es mínimo, pero repercute mucho en la zona costera de equilibrio agua dulce-agua marina, agravado por explotaciones crecientes regularmente.

- En las Cuencas Sur, Guadalquivir y Guadiana, donde hay acuíferos extensos, la sequía se aguanta bien, con descensos entre 1 y 3 metros, que se recuperan generalmente con las siguientes lluvias. El problema mayor consiste en la superposición del aumento en los volúmenes bombeados por crecimiento de demanda agrícola y urbana, que produce vaciado de reservas más difícil de reemplazarse.
- En el acuífero particular de Almonte-Marismas, los descensos de nivel por sequía son inapreciables, salvo en las zonas de intensa explotación agrícola, en donde hay descensos interanuales por concentración de pozos de extracción.
- En las islas, donde las aguas subterráneas se explotan al límite, la sequía produce descensos residuales pequeños pero significativos, que no se recuperan como no venga una temporada de lluvia o se disminuya el régimen de extracción un cierto tiempo.

#### a) Efectos directos de la sequía en la calidad del agua subterránea

El efecto «directo» de la sequía en la calidad del agua subterránea es el resultado de recibir en las áreas de infiltración de los acuíferos menos agua.

Desde esta perspectiva una falta de lluvias puede, paradójicamente, ya que no beneficiar la calidad de las aguas subterráneas, al menos sí impedir su deterioro. En efecto, en muchas áreas acuíferas, que subyacen explotaciones intensivas de agricultura, o donde hay vertidos de residuos industriales o urbanos, una gran cantidad de agua de lluvia puede disolver parte de los materiales potencialmente contaminantes de la superficie del terreno y a través del proceso de infiltración transportarlos al acuífero.

Un ejemplo bien conocido de tal hecho ocurre con los nitratos en muchas áreas agrícolas. Se puede mencionar como ejemplo al respecto algún estudio (SMITH-CARRINGTON, A. K.; BRIDGE, L. R.; ROBERTSON, A. S.; FOSTER, S. S. D., 1983), donde, de manera gráfica, se muestra la relación evidente entre el volumen de lluvia y el contenido de nitratos del agua subterránea en varias zonas de cultivos agrícolas del Reino Unido.

#### b) Efectos indirectos en la calidad del agua subterránea

Más importantes que los efectos directos de una sequía en la calidad son los efectos indirectos. J. PORRAS, citado por M. R. LLAMAS (LLAMAS, M. R., 1985), en su resumen sobre las comunicaciones del seminario «La evaluación del impacto de la sequía de los años 1980-82 en España» (Chinchón, 1983) los menciona en general de la forma siguiente:

«La incidencia de la sequía en las aguas subterráneas se ha manifestado en parte importante mediante un deterioro de su calidad. Este deterioro se ha producido por una parte mediante el aumento de su mineralización; y, por otra, a causa de la mezcla con aguas de composición química no deseables.»

«El primer fenómeno se ha evidenciado generalizadamente en todos los acuíferos, especialmente en los costeros, ya que gran parte de su alimentación procede del efecto combinado de infiltración de lluvia e infiltración de excedentes de riego, con aguas subterráneas y superficiales. Al disminuir tanto la infiltración de lluvia como los excedentes de riegos con aguas superficiales, aumenta necesariamente el volumen de aguas infiltradas fuertemente mineralizadas procedentes de los regadíos con aguas subterráneas, puesto que áreas que tradicionalmente se abastecían con aguas superficiales y/o mixtas han tenido que incrementar sus extracciones de agua subterránea. Este fenómeno reviste especial importancia en los sectores de los acuíferos próximos a límites de descarga.»

«Los fenómenos de mezcla con aguas de mala calidad se han intensificado como consecuencia de la disminución de los recursos renovables de los acuíferos y/o la disminución de su potencial hidráulico. De ellos, los más importantes son, sin lugar a dudas, los procesos de intrusión salina en acuíferos costeros, aunque también revisten importancia, pero con carácter más zonal, los de mezcla con aguas fósiles o con las procedentes de las proximidades de diapiros salinos. Ambos se han detectado mediante el aumento de ciertos iones característicos en las aguas procedentes del bombeo de pozos y de la descarga de manantiales.»

En algunos acuíferos del interior resulta muy di-

ficil detectar variaciones en la calidad que puedan relacionarse con la sequía, es decir, con variaciones en el nivel de explotación como consecuencia del aumento de bombeo necesario para paliar la falta de agua superficial. En cambio, en otros acuíferos de características especiales, como más adelante se comentará, repercute este cambio de nivel.

En general, los acuíferos del interior sólo presentan variaciones pequeñas de características químicas, incluso en series largas, entre los años 77 y 87. Un amplio repaso a series de análisis en acuíferos del interior de las Cuencas Sur, Segura, Júcar y Pirineo Oriental demuestra que, en general, cuando se detectan variaciones, suelen ser menores, y en relación con el ciclo anual natural de lluvias y/o de utilización. Cuando hay diferencias que se repiten en el tiempo aparecen, por ejemplo, entre mayo y septiembre (antes y después de los riegos importantes).

Es la zonalidad en vertical de los acuíferos subterráneos la responsable de las modificaciones de la calidad. Esta zonalidad, como se ha dicho, ocurre con mayor frecuencia en acuíferos detríticos, y más raramente en los carbonatados.

Por supuesto que los acuíferos costeros, sean detríticos o carbonatados, son ejemplos máximos de acuíferos con zonalidad extremada. Allí, en vertical, hay transición de agua dulce hasta agua marina.

Son numerosos los ejemplos de acuíferos costeros (Instituto Tecnológico GeoMinero de España, 1990) en los que, debido a la presencia de sequías, se realiza un mayor bombeo, que hace descender los niveles piezométricos y en donde se ve un empeoramiento claro de la calidad.

**7. EFECTOS EN LOS ABASTECIMIENTOS URBANOS**

Según la última encuesta de AEAS (Asociación Española de Abastecimiento y Saneamiento) de 1987, la proyección (8) de los datos obtenidos al conjunto nacional da los siguientes resultados: el agua suministrada había sido 4.140 hm<sup>3</sup>, correspondiendo el 74 por 100 a recursos superficiales y el 26 por 100 a recursos subterráneos, éstos últimos con muy superior incidencia en municipios de menos de 20.000 habitantes. La

dotación media en l/hab/día varía entre 230 y 313, con una media nacional de 282. Las pérdidas, fugas, fraudes y consumos no controlados alcanzaban un valor medio del 34 por 100 del agua suministrada.

Y, por último, la distribución de la demanda urbana era la siguiente: 68 por 100 en utilización doméstica, 21 por 100 en industrias y comercios, y el 11 por 100 restante en servicios públicos —establecimientos escolares, sanitarios, militares, institucionales, etc.— y servicios municipales controlados con aparatos de medida.

Según la última encuesta disponible, todavía el 3 por 100 de los hogares no tienen agua corriente, y un 15 por 100 sólo dispone de agua fría.

Estas cifras, que pretenden dar una panorámica nacional sobre el agua en los abastecimientos urbanos, deben tomarse con las reservas propias sobre la bondad de las encuestas disponibles en el país sobre este y otros temas.

Frente a una sequía, varios son los posibles remedios:

- Detección de pérdidas en todas las instalaciones de transporte (aducción) y distribución, para proceder a su inmediata reparación, comenzando por las más importantes.
- Detección del agua perdida en las estaciones de tratamiento por lavado de filtros, para proceder a un estudio del coste de recuperación de distintos porcentajes de ese agua; e, incluso, en una fase posterior, de la recuperación del agua de los lodos.
- Gestión de la explotación con máxima eficacia y supeditada al ahorro del recurso, no a consideraciones económicas.
- Aprovechamiento de fuentes no usuales, como manantiales y pozos abandonados que puedan ser rehabilitados al comienzo de la sequía, aunque proporcionen agua de peor calidad —siempre que sea sanitariamente tolerable—.
- Aprovechamiento de los volúmenes de agua embalsada por debajo de la cota de las tomas —embalse muerto—, por medio de bombas.
- Incremento de captaciones de agua subterránea.

— Utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas; con sobreexplotación de éstas últimas, mientras dure la sequía, por medio de bombeos superiores a la capacidad natural de los recursos renovables, aunque reduzcan los volúmenes acumulados en el terreno durante siglos. En estos casos es preciso conocer cuál es la capacidad máxima de bombeo para distintas situaciones, y es indispensable vigilar: el descenso de niveles piezométricos, la afección a captaciones próximas, a manantiales y a ríos, así como la posible degradación de la calidad por movilización de aguas profundas más mineralizadas.

El uso coordinado de aguas superficiales y subterráneas, siempre que unas y otras puedan incorporarse a la red de conducciones de transporte y distribución, puede ser una excelente solución ante episodios de sequía en abastecimientos urbanos. Los embalses superficiales se caracterizan por una alta irregularidad de las «entradas» mensuales, estacionales o anuales y por su limitación para almacenarlas en función del volumen disponible en cada momento. Los acuíferos, en cambio, presentan una irregularidad muy inferior en las «entradas», por la limitación natural de la recarga, y además su capacidad de almacenamiento será varias veces superior a la recarga anual. Precisamente por sus características contrapuestas y diferentes en cuanto al tiempo pueden utilizarse de forma coordinada. En años húmedos, el excedente de aguas superficiales se empleará en reducir bombeos, incrementando así las reservas en los acuíferos, e incluso, si es posible y el superávit es importante, en la recarga de los mismos. En años secos se cubrirá el déficit con bombeos suplementarios. Esta forma de explotación produce incrementos importantes de la garantía.

**8. LA SEQUIA DE 1988 EN NORTH DAKOTA (USA)**

Un ejemplo más de lo que puede afectar una sequía a una región agrícola (9) nos lo ofrece la de 1988 en el estado de North Dakota, en los Estados Unidos de Norteamérica.

La mayoría del territorio de North Dakota presentaba la primavera de 1988 suelos con déficit de humedad en el subsuelo. La sequía del 88

fue la más intensa desde 1934, y la más intensa al comienzo de la primavera de todas las que se tienen registros. Hacia la mitad de junio la sequía había causado un impacto enorme en los cultivos de grano y en los pastos.

Una valoración del impacto en la agricultura, hecha municipio a municipio, demostró que las pérdidas en cereales fue del 90 por 100 de la producción en las áreas central y oeste del Estado. Los pastos bajaron entre el 40 y el 90 por 100, teniendo que transportarse los rebaños fuera del Estado. La reducción respecto a cosechas normales se muestra en la siguiente tabla:

**Porcentaje de reducción respecto a rendimiento medio**

	%
Trigo duro ... ..	70
Otro trigo ... ..	59
Cebada ... ..	59
Centeno ... ..	62
Soja ... ..	61
Girasol ... ..	40
Leguminosas ... ..	36
Remolacha ... ..	10
Patatas ... ..	45

Para valorar la pérdida económica se tuvo en cuenta el menor rendimiento de las cosechas, y los mayores precios en tiempo de recolección. Se estimaron los beneficios de asistencia estatal y seguros, resumido todo ello en la siguiente tabla:

**Impacto en las granjas (en millones de dólares)**

Pérdida en ganadería ... ..	—225
Pérdida en cereales ... ..	—530
Otras cosechas ... ..	—131
Falta de pagos, quiebras ... ..	—472
Ganancia en recolección ... ..	+105
Seguros ... ..	+136
Condonación deudas ... ..	+ 35
Pagos ayudas desastres ... ..	+377

De forma que la pérdida directa para los agricultores fue de 706 millones de dólares, a la que

había que sumar pérdidas indirectas en otros sectores de la economía ligados a la agricultura, que fueron de 1.466 millones, lo que hizo un total de 2.172 millones de pérdidas. Hay que decir que en esta cantidad ya están contabilizados 1.100 millones de asistencia federal para mitigar desastres, sin la cual las pérdidas hubieran sido de 3.438 millones de dólares.

Aunque el Estado ya se ha recuperado, la sequía puso de relieve lo vulnerable de una economía tan dependiente de la agricultura y ganadería.

## 9. INDICE DE LA SEVERIDAD DE LA SEQUIA

La severidad de una sequía (10) está en asociación íntima con la intensidad y duración de la falta de humedad. Intensidad y duración se miden generalmente como desviación de un cierto índice del normal. Los índices más usados en USA para medir la severidad de las sequías son el porcentaje respecto a precipitación normal y el Índice de Palmer (PI o PDSI, Palmer Drought Severity Index), que es una indicación de la disponibilidad total de humedad del suelo en función de las condiciones del clima pasado. El PI se usa típicamente en los USA como índice para activar o desactivar planes generales de agencias estatales y federales para situaciones de sequía. Los valores normales del PDSI varían de +6 (época húmeda) a -6 (época seca). Un valor de -4 indica ya una sequía muy importante.

## 10. LA SEQUIA DEL SAHEL

Una sequía famosa (11) fue la del Sahel desde 1968 hasta 1974, que representó una de las mayores tragedias internacionales desde la Segunda Guerra Mundial. La sequía fue especialmente dramática en tres aspectos principales:

- 1) Produjo la muerte de decenas de millares de personas, y forzó un reajuste social mayor y la emigración de millones de otras.
- 2) Afectó a una gran parte de un continente.
- 3) Y persistió en muchas zonas hasta por seis años consecutivos.

Sin embargo, los Gobiernos de los países occi-

dentes prestaron poca atención al desastre, que fue tratado principalmente por la Organización de las Naciones Unidas con sus escasos medios.

## 11. CONCLUSION

¿Qué hacer frente a una sequía?

Las posibles acciones se resumen (12) en el diagrama siguiente.

### Características de la sequía: Naturaleza, extensión, duración, severidad

Medidas y respuestas:

— Existente:

- Almacenaje en superficie - subterráneo.
- Skimming de crecidas.
- Importación / trasvase.
- Derivación / multiuso.
- Mejora / conservación del sistema.

### I. Aumento oferta:

— Nuevo:

- Desalación.
- Modificación del tiempo.
- Minería agua subterránea.

— Mixto:

- Uso conjunto.
- Redes de transporte.
- Uso de nieve y hielo.
- Innovaciones tecnológicas.

— Activas:

- Medidas legales.
- Incentivos económicos de precios.
- Política uso suelo.
- Educación / participación pública.
- Priorizar demandas.

### II. Reducción demanda:

— Reactivas:

- Programa ahorro agua.
- Reducción usos no esenciales.
- Reciclaje / reutilización.
- Uso contadores.

— Ajustes:

- Cambios en agricultura.
- Reajustes urbanos.

— Estrategia anticipación:

- Sistemas predicción.
- Regulación consumo.
- Moderación en los usuarios.
- Acciones emergencia intercomunitarias.
- Conflictos en el uso.

### III. Minimizar impacto:

— Absorción pérdidas:

- Seguros.
- Dispersión del riesgo.
- Compensación daños.
- Ayuda contra desastres.
- Fondos de reserva.

— Reducción pérdidas:

- Modificar sucesos.
- Recuperación de los daños.
- Cambiar usos del agua.

El tratamiento de las sequías parece que no debe ser una respuesta paliativa a una crisis temporal. Al contrario, las oscilaciones climáticas, cambios socio-económicos y las interdependencias nacionales e internacionales exigen una política de mayor alcance y estrategias más integradas. Algunos han llamado la reciente sequía de 1988 «las primeras escaramuzas de una nueva guerra de las aguas» (US News and World Report, 30 de mayo de 1988). Como decía uno de los entrevistados allí: «Nos basamos en un ciclo hidrológico. Cuando sobra el agua hay apatía; cuando hay restricciones hay pánico.»

Ese es exactamente el espíritu de manejo de crisis que se desea evitar. Cambiar desde poner el énfasis en un manejo de emergencias hacia una planificación anticipatoria, orientada a las posibles contingencias en un sistema social, medioambiental y económico complejo. Aunque a

menudo se presenta un carácter de urgencia, no se debe caer en el pánico de respuestas espasmódicas o soluciones tecnológicas que no estén suficientemente probadas.

## REFERENCIAS

- (1) AGUILO BONIN, A. J.: *Sequía y erosión del suelo*. Jornadas sobre las sequías en España (19-21 de noviembre de 1990), p. 44. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Madrid.
- (2) PARDOS CARRION, J. A., y GONZALEZ ALONSO, S.: *Sequía, vegetación y fauna silvestre, ibid.*, p. 104.
- (3) FERERES, E., y MARTINEZ BELTRAN, J.: *Efectos de las sequías sobre la agricultura, ibid.*, p. 126.
- (4) TEJERA MONTALVO, E.: *El seguro agrario como acción mitigante de las consecuencias económicas de la sequía en los cereales de invierno. Experiencia en España, ibid.*, p. 179.
- (6) MINGO MAGRO, J.: *Cambios en la calidad de las aguas por efecto de las sequías, ibid.*, p. 58.
- (7) NAVARRO ALVARGONZALEZ, A.: *Cambios en la calidad y en la cantidad de las aguas subterráneas por efecto de las sequías, ibid.*, p. 79.
- (8) GARCIA-POVEDA, M.: *La sequía en los abastecimientos urbanos, problemas y acciones mitigantes, ibid.*, p. 200.
- (9) AAKRA, D.; LEHOLM, A., y LEISTRITZ, L.: *Assesing the severity of the 1988 drought on North Dakota Farms and the impact on the State economy*. Drought Water Management, ed. por N. S. Grigg y E. C. Vlachos, p. 125. International School for Water Resources, Colorado State University, febr. 1990.
- (10) ROSEMBERG, N. J., y WILHITE, D. A.: *Drought in the U. S. Great Plains*. Copins with drorhts, ed. por V. Yevjevich, L. da Cunha y E. Vlachos, cap. 11, p. 357. Water Resources Publications, P. O. Box 2841, Littleton, Colorado, 80161, U. S. A., 1983.
- (11) HIDROE, J. J.: *Coping with droughts in the Sahel. Ibid.*, cap. 9, p. 301.
- (12) GRIGG, N. S., y VLACHOS, E. C.: *Water Management to handle Drought: Government and Intergovernmental Responsibilities*. Droghr Water Management, ed. por N. S. Grigg y E. C. Vlachos, p. 13. International School for Water Resources, Colorado State University, febr. 1990.

Original recibido: Enero de 1991.

Original aceptado: Febrero de 1991.



## INGENIERIA GEOAMBIENTAL

# Características ambientales durante el Holoceno en las Pilas de Mojácar, Almería.

## Análisis polínico en la Cuenca del río Aguas (\*).

Por B. MARISCAL (\*\*)

## RESUMEN

Se estudia el contenido polínico en el yacimiento de las Pilas de Mojácar (Almería) perteneciente al Subboreal (Holoceno).

El trabajo enfoca el estudio paleopolínico a través de los espectros polínicos obtenidos. Las asociaciones de palinomorfos, así como las secuencias reflejadas en los palinogramas, indican las fluctuaciones de los diferentes taxones vegetales durante el inicio del Subboreal.

Se estudian los pólenes de plantas acuáticas que crecen en lugares húmedos, próximos a ríos y en corrientes lentas, así como los de las plantas xerofitas y los de las plantas que se desarrollan en terrenos baldíos, se deduce una pulsación climática.

*Palabras clave:* Polen, Subboreal, Paleoclimatología.

## ABSTRACT

The pollen content from the Subboreal (Holocene) materials in the las Pilas de Mojácar (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 palynographics would show the fluctuations of the different vegetal taxons during the early Subboreal.

It is studied pollens from aquatic plants that grow in humid places besides tranquil rivers, xerophilous plants which are from uncultivated lands, we deduct there is a pulsating climate.

*Key words:* Pollen, Subboreal, Paleoclimatology.

## INTRODUCCION

El análisis de las Pilas de Mojácar muestra el espectro polínico de unos sedimentos relacionados con una zona influenciada por el río Aguas.

Por tratarse de una zona sujeta a un régimen fluvial los pólenes estudiados corresponden, en

su mayoría, a diferentes familias botánicas acuáticas o relacionadas con medios en los que el agua interviene muy directamente, se trata, por tanto, de agrupaciones vegetales características de ambientes húmedos próximos a arroyos, canales, zonas de inundación, etc.

Las comunidades arbóreas aparecen con valores muy bajos en los palinogramas, siendo los árboles que se desarrollan en las riberas de los ríos los más representativos.

Las fitoasociaciones correspondientes a comuni-

dades poco exigentes respecto al suministro de agua se encuentran en la base del perfil del sondeo y las xerofitas, adaptadas a condiciones más extremas de sequedad figuran en el tramo superior.

Estas plantas están representadas por casi una treintena de familias botánicas diferentes, y las variaciones de estas especies vegetales muestran un cambio climático o una modificación en las características ambientales del medio.

De lo anterior se deduce que el clima sería cálido y seco, típico de la región mediterránea, pero afectado por lluvias torrenciales que ocasionarían desbordamientos estacionales en los márgenes del río Aguas. Este cambio queda registrado en el palinograma, como una etapa de mayor pluviosidad entre dos episodios de sequía.

## SITUACION Y EMPLAZAMIENTO DE LOS SONDEOS

La toma de muestras se ha efectuado en las Pilas de Mojácar, en la provincia de Almería, en la cuenca del río Aguas.

La altitud de la zona es de escasos metros sobre el nivel del mar.

Los limos muestreados corresponden a depósitos cuaternarios, que en esta zona están constituidos por gravas, arenas y limos. IGME, 1.015, Garrucha.

## ANALISIS POLINICO

Se ha seguido el método de separación por densidades para muestras arqueológicas, análisis polínico de DOHER, I. (1980) y de SUE FISH (1985), tratamiento químico para la extracción de palinomorfos.

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 ar-

bóreas, 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 la Palinoteca.

Las muestras procedentes del sondeo de Pilas de Mojácar han proporcionado un espectro polínico compuesto por veinticinco familias botánicas, integrado por más de setecientos granos de polen. Tabla I y gráficos 1 y 2.

En el nivel de base el contenido de pólenes arbóreos, Coníferas es de 2,41 por 100. Las Gramíneas, herbáceas características de praderas secas, se encuentran representadas en el palinograma por un 7,83 por 100. Las comunidades vegetales hidrofíticas o herbáceas que crecen en lugares húmedos, como: Aspleniáceas, Iridáceas, Juncáceas, Liliáceas, Ninfáceas y Tyfáceas, etc., presentan un elevado porcentaje del 62,05 por 100. Las plantas indicadoras de terrenos baldíos o malas hierbas ascienden a 15,66 por 100, pertenecientes a Boragináceas, Cariofiláceas, Compuestas, Chenopodiáceas, Malváceas, Plantagináceas, Primuláceas y Urticáceas.

En el nivel intermedio los pólenes arbóreos ascienden a un 4,76 por 100, pero éstos corresponden a Ulmáceas; en esta secuencia los olmos han desplazado a los pinos en el palinograma. Los bosques de olmos constituyen los bosques riparios propios de las vegas o niveles de las riberas. Las Gramíneas no permanecen y las comunidades vegetales de praderas y zonas húmedas ascienden a un 74,03 por 100; aparecen Alismatáceas y Ranunculáceas, y los valores restantes se mantienen sin grandes diferencias.

En el nivel superior dejan de aparecer los pólenes arbóreos, y asciende el número de palinomorfos relacionados con ambientes en los que se caracteriza la presencia de canales, acequias y zonas más o menos pantanosas, Apiáceas y Tyfáceas, junto con otras plantas de zonas húmedas, elevan el porcentaje de herbáceas a un 85,34 por 100. Las plantas indicadoras de sequedad, e incluso aridez, aparecen en este nivel minoritariamente, sólo un 1,72 por 100.

(\*) Este trabajo ha sido realizado con cargo al proyecto de investigación «El desarrollo cultural y aprovechamiento de recursos durante la Edad del Cobre en la cuenca baja del Almanzora», subvencionado por la CAICYT.

(\*\*) Museo Nacional de Ciencias Naturales de Madrid.

**TABLA I**

**Análisis polínico de los sedimentos del yacimiento de las Pilas de Mojácar (Almería)**

TAXONES	MUESTRAS					
	Número de pólenes			Porcentajes		
	38	39	40	38	39	40
Alismataceae	0	12	0	0,00	5,19	0,00
Apiaceae	0	0	215	0,00	0,00	61,78
Asclepiadiaceae	0	0	6	0,00	0,00	1,72
Aspleniaceae	12	0	0	7,23	0,00	0,00
Boraginaceae	0	0	17	0,00	0,00	4,89
Campanulaceae	0	5	2	0,00	2,16	0,57
Caryophyllaceae	0	6	1	0,00	2,60	0,29
Compositae	0	14	3	0,00	6,06	0,86
Coniferae	4	0	0	2,41	0,00	0,00
Chenopodiaceae	2	7	0	1,20	3,03	0,00
Gramineae	13	0	0	7,83	0,00	0,00
Iridaceae	14	0	0	8,43	0,00	0,00
Juncaceae	15	0	0	9,04	0,00	0,00
Liliaceae	22	0	0	13,25	0,00	0,00
Malvaceae	0	3	0	0,00	1,30	0,00
Nymphaeaceae	11	2	0	6,63	0,87	0,00
Plantaginaceae	8	0	0	4,82	0,00	0,00
Polygonaceae	0	14	0	0,00	6,06	0,00
Polypodiaceae	17	0	0	10,24	0,00	0,00
Potamogetonaceae	0	2	12	0,00	0,87	3,45
Primulaceae	9	0	0	5,42	0,00	0,00
Ranunculaceae	0	16	5	0,00	6,93	1,44
Typhaceae	12	120	63	7,23	51,95	18,10
Ulmaceae	0	11	0	0,00	4,76	0,00
Urticaceae	7	0	0	4,22	0,00	0,00
Varia	20	19	24	12,05	8,23	6,90
<b>TOTAL POLENES</b>	<b>166</b>	<b>231</b>	<b>348</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

**CONCLUSIONES**

Aun teniendo en cuenta las limitaciones de los espectros polínicos en un ambiente fluvial, los índices de representatividad y la incidencia de la degradación del registro polínico, se puede determinar, para este período holocénico, que en las proximidades de la zona estudiada había zonas boscosas compuestas por diversas especies arbóreas, de las cuales sólo se han encontrado pólenes de Coníferas, ya que los palinomorfos de Ulmáceas corresponden a bosques riparios, que son formaciones vegetales higrofitas que se instalan en las riberas fluviales y que se encuentran sometidas al régimen de crecidas de agua derivado de la dinámica fluvial.

La proximidad del río Aguas condiciona los aportes polínicos de numerosas plantas, relacionadas con el medio acuático, con corrientes lentas, acequias y lugares encharcados o húmedos, como: Alismatáceas, Apiáceas, Aspleniáceas, Iridáceas, Juncáceas, Liliáceas, Ninfáceas, Polygonáceas, Potamogetonáceas, Ranunculáceas, Tyfáceas, etc.

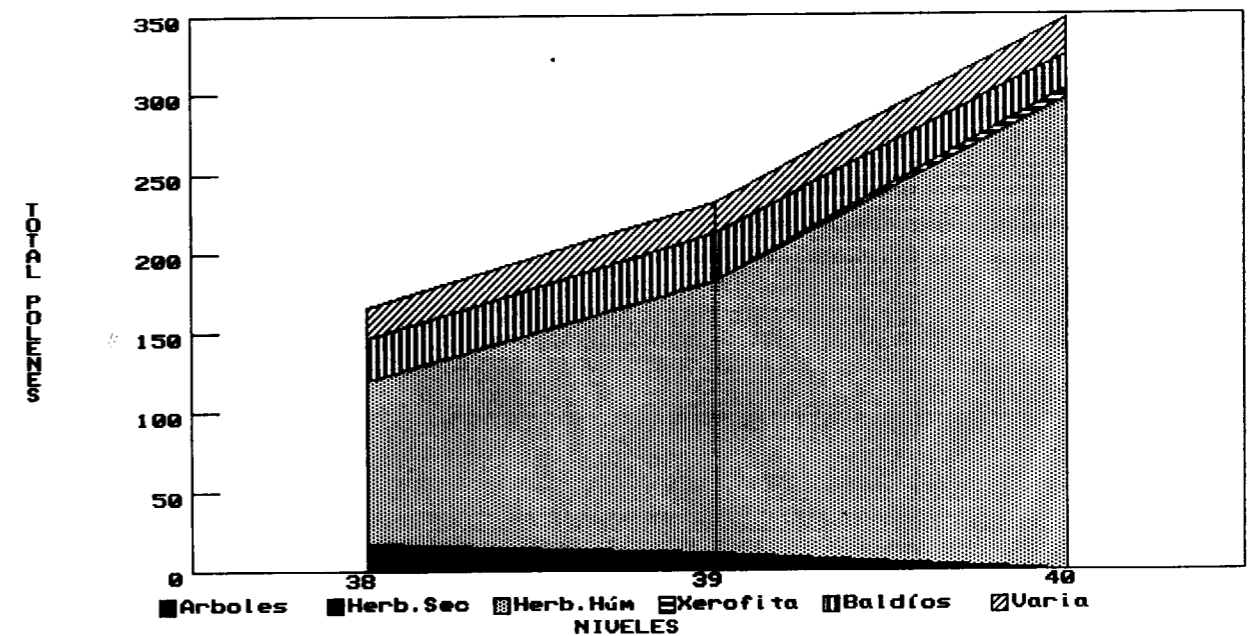
Se trata de una zona no cultivada, ya que sólo se encuentran plantas propias de terrenos baldíos, como: Boragináceas, Malváceas, Plantagináceas, Primuláceas y Urticáceas, junto con comunidades poco exigentes respecto al suministro de agua, como: Gramíneas y Asclepiadiáceas, presentes en la base y zona superior del sondeo.

**GRAFICO 1**

**Análisis polínico de los sedimentos del yacimiento de las Pilas de Mojácar (Almería)**

	MUESTRAS		
	Número de pólenes		
	38	39	40
Arboles	4	11	0
Herbáceas secas	13	0	0
Herbáceas húmedas	103	171	297
Xerofitas	0	0	6
Baldíos	26	30	21
Varia	20	19	24
<b>TOTAL</b>	<b>166</b>	<b>231</b>	<b>348</b>

**PILAS (Almería)**

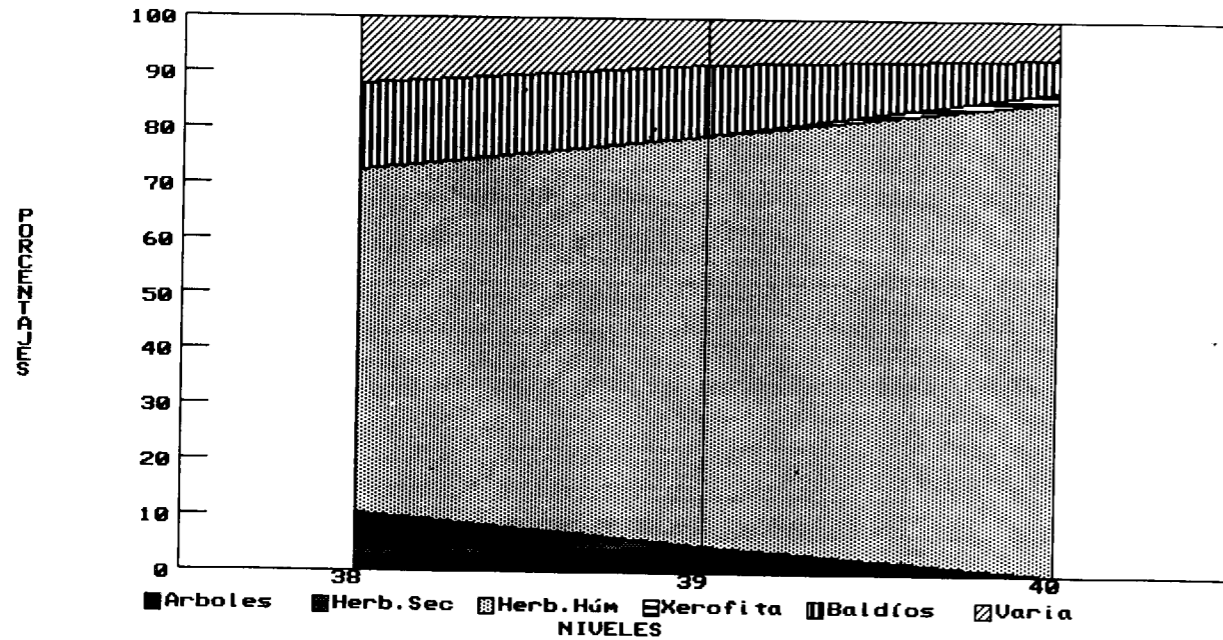


**GRAFICO 2**

**Análisis polínico de los sedimentos del yacimiento de las Pilas de Mojácar (Almería)**

	MUESTRAS		
	Porcentajes		
	38	39	40
Arboles	2,41	4,76	0,00
Herbáceas secas	7,83	0,00	0,00
Herbáceas húmedas	62,05	74,03	85,34
Xerofitas	0,00	0,00	1,72
Baldíos	15,66	12,99	6,03
Varia	12,05	8,23	6,90
TOTAL	100	100	100

**PILAS (Almería)**



En la zona media del polinograma destaca el aumento de los pólenes arbóreos y la desaparición de las especies indicadoras de ambiente seco y plantas xerofitas, así como un ascenso de las comunidades acuáticas, por lo que se deduce una mayor pluviosidad ocasional, y siendo el clima cálido y seco, característico de la región mediterránea, estaría afectado por una elevación de los índices pluviométricos (lluvias torrenciales) entre episodios de sequía.

**REFERENCIAS**

ERDTMAN, G. (1969): *Hand book of Palynology. An introduction to the study pollen grains and spores.* Scandinavian University Books, Mungsgaard.

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, pp. 167-177.

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, p. 297.

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): *Studing global chance: 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. E. 1:50.000. Garrucha.*

IMOGENE DOER, L. (1980): *Palynomorph Preparation Procedures.* U.S. Geological Survey.

LULL, V. (1988): *La cultura de El Algar: un modelo para el estudio de las formaciones económico-sociales prehistóricas.* Madrid. Akal, p. 487.

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, pp. 205-220.

MOORE, P. D. & WELB, J. A. (1978): *An Illustrated Guide to Pollen Analysis.* Hodder & Stongerton. London, p. 133.

SUE FISH (1985): *Density separation for archeological samples.* Geological Survey Circular 830.

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, p. 450.

Original recibido: Diciembre de 1990.  
Original aceptado: Enero de 1991.

GEOQUIMICA

# 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.

Por S. DEL BARRIO MARTIN (\*)

RESUMEN

Se aborda el estudio de una serie de aspectos fundamentales que inciden en la ejecución del análisis multielemental por ICP: Optimización de parámetros instrumentales, potencia inducida, altura de observación y caudal de argón de nebulización. Corrección de fondos e interferencias espectrales, consecución de curvas de calibrado. Con la metodología propuesta se analizan, con buenos resultados, muestras certificadas de suelos y sedimentos.

Palabras clave: Parámetros instrumentales, Interferencias espectrales, Calibración.

ABSTRACT

This paper provides a method to experimental selection and studies general under which an inductively coupled plasma can be operated so as to achieve a good compromise for simultaneous multi-element analysis: Optimization of instrumental parameters, power coupled into the plasma, observation height and carrier gas flow. Background correction and spectral interferences, calibration curves. With the analytical method proposed the results obtained were compared with the certified values of standard of soils and sediments.

Key words: Instrumental parameters, Spectral interferences, Calibration.

### 5.3. METODOLOGIA DESARROLLADA EN EL ESPECTROMETRO MULTICANAL

A continuación se detalla la parte de trabajo realizado en el espectrómetro multicanal ICAP-61.

#### 5.3.1. Ampliación de la descripción del equipo

En el presente apartado se describen las diferencias entre este tipo de espectrómetro y el secuencial, en lo referente a las partes del mismo que inciden en mayor grado sobre el análisis multielemental simultáneo.

##### 5.3.1.1. Sistema dispersivo

Un aspecto común a todos los espectrómetros

multicanales de emisión en general, y a los de EPAI en particular, es que para la dispersión de la radiación incidente disponen de redes de difracción cóncava en contraposición con las redes planas de que van provistos los equipos secuenciales. Las redes cóncavas tienen como característica principal que están montadas sobre un círculo (círculo de Rowland), tangente a la red cuyo diámetro es igual al radio de curvatura de la misma. Este círculo posee la propiedad de ser el foco de difracción de las distintas rendijas cuando éstas y la red se encuentran situadas a lo largo de la circunferencia que limita dicho círculo.

Mecánicamente la red, la rendija de entrada y las rendijas de salida se mantienen fijas en una robusta estructura fabricada en una aleación especial de iridio que ha sido tratada térmicamente para minimizar sus efectos dilatadores. Las lige-

ras variaciones que se pueden producir en el ángulo de incidencia de la radiación luminosa procedente de la fuente de excitación sobre la retícula de la red se corrigen mediante un mecanismo que permite un ajuste manual de la posición de la rendija de entrada para que el máximo de intensidad luminosa alcance el fotomultiplicador.

En los espectrómetros ICAP-61 sobre la plataforma del círculo se encuentran grabadas las posiciones de las 290 líneas analíticas más importantes del espectro. La distancia focal de la red de 75 cm. permite la colocación de hasta 63 tubos fotomultiplicadores que podrán utilizar, según los criterios seleccionadores, 63 de las 290

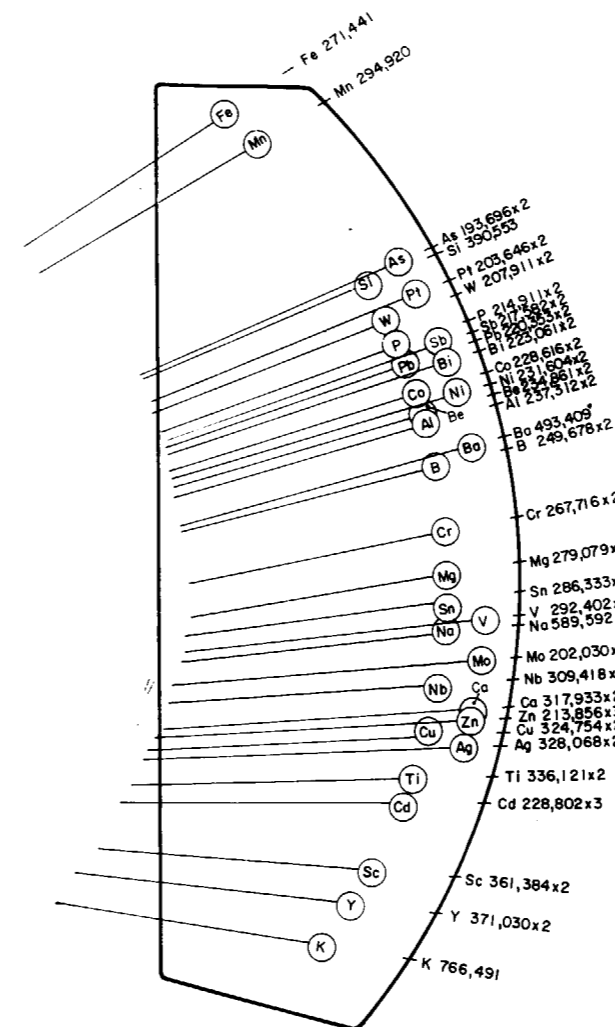


Figura 52.—Esquema de la disposición de los fotomultiplicadores dentro del sistema dispersivo del espectrómetro.

líneas previamente grabadas en la base. En el caso concreto del equipo que se ha utilizado en la investigación han sido 32 los canales empleados. En la figura 52 se ofrece un esquema de cómo se encuentran dispuestos los fotomultiplicadores sobre las rendijas situadas en el círculo Rowland.

El lugar que ocupan las citadas rendijas dentro del conjunto de la estructura obliga a utilizar, no solamente líneas de primer orden del espectro, sino emisiones de órdenes superiores. La pequeña anchura de la totalidad del espectro del primer orden haría materialmente imposible valerse exclusivamente de las primeras para efectuar el análisis de todos los elementos.

La posición de los espectros de distinto orden dentro del círculo de Rowland se muestra en la figura 53. En dicha figura se observa cómo los mismos se encuentran colocados a una y otra parte de la imagen producida por la normal a la red.

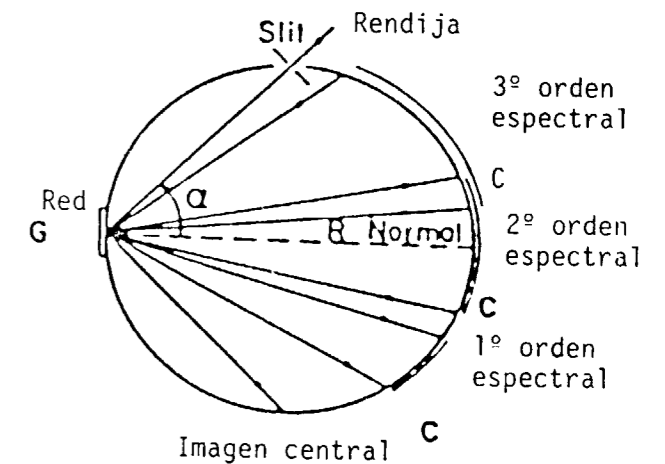


Figura 53.—Montaje Paschen-Runge — Posición de los distintos órdenes espectrales.

La selección para cada elemento del orden de su línea espectral es realizada por el fabricante en base a la sensibilidad que se va a requerir en su determinación, y a los estudios de interferencias espectrales llevados a cabo previamente. Una mayor distancia focal hubiera aumentado el poder de resolución y facilitado el posicionamiento de los fototubos, pero otros hechos, como son:

(\*) Instituto Tecnológico GeoMinero de España.

- dificultad de fabricar el soporte de una sola pieza,
- pérdidas elevadas de energía en el ultravioleta,
- costosos sistemas de instalación de vacío,
- producción de vibraciones a niveles no tolerables,

desaconsejan emplear redes de difracción con distancias focales superiores a 1 m.

Un sistema con estas características permite:

- Cambiar la posición de los fotomultiplicadores adaptándolos a nuevas líneas analíticas.
- Mantener perfectamente el alineamiento óptico.
- Colocar filtros para eliminar los segundos y terceros órdenes de emisión cuando se trabaja con las líneas de primer orden.

La parte óptica del espectrómetro se completa con un mecanismo designado en inglés como «spectrum shifter», que permite realizar un barrido automático de longitudes de onda en el entorno de las líneas analíticas elegidas. Este dispositivo posibilita el llevar a cabo correcciones de fondo efectuando medidas de intensidad en el pico y en el fondo próximo a él. Consta el mecanismo de una lámina refractora de cuarzo (material transparente en el UV con un bajo índice de refracción), que está montada detrás de la rendija de entrada del espectrómetro y accionada por un pequeño motor de pasos conducido por un servo sistema. La lámina refractora oscila en un eje vertical a la radiación entre dos posiciones extremas, A y B, como se destaca en la figura 54. El servo sistema envía una señal eléctrica al motor de barrido que mueve la placa a una de las dos posiciones. En la posición A de reposo (90° respecto a la radiación), no se produce ningún desplazamiento de la longitud de onda y los fotomultiplicadores leerán en el pico de las correspondientes líneas analíticas. En la posición B (lámina girada 10° respecto a su posición de reposo), la radiación incidente se desplazará ligeramente de forma paralela y los fotomultiplicadores leerán los fondos a las longitudes de onda correspondientes a este desplazamiento. En la práctica entre las posiciones A y B caben otras 30 posibles, lo que le da al sistema una gran versatilidad a la hora de medir fondos para su posterior corrección.

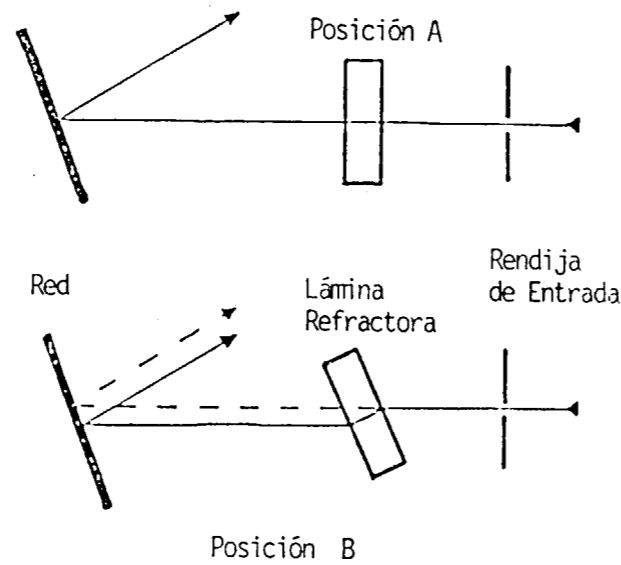


Figura 54.—Mecanismo de funcionamiento de la lámina refractora.

#### 5.3.1.2. Sistema de detección

La medida de la intensidad luminosa se realiza permitiendo que la radiación monocromática que atraviesa la rendija de salida del policromador incida en el fotomultiplicador correspondiente. La misión de este último es transformar la señal óptica en impulsos eléctricos. Los impulsos eléctricos formados cargan un condensador durante un período de tiempo previamente fijado (tiempo de integración). Una vez descargado el condensador, el valor total de su carga, convenientemente amplificado y tratado, es enviado al ordenador para su procesamiento y transformación en unidades arbitrarias (cuentas/seg.).

Existen numerosos tipos de fotomultiplicadores con geometrías muy diversas, y que responden de forma distinta a la radiación luminosa según la longitud de onda de la misma. Por regla general, los tubos fotomultiplicadores de los equipos multicanales son más pequeños y menos robustos que los empleados en los espectrómetros secuenciales para facilitar su colocación y permitir que en un limitado volumen de espacio se puedan introducir el mayor número de ellos. Otra diferencia entre ambos tipos de fotomultiplicadores es que los usados en espectrómetros multicanales son más específicos y sensibles.

Mientras que en un equipo secuencial, por regla general, se utiliza un único fototubo para recoger la totalidad de las radiaciones y transformarlas en impulsos eléctricos, en un multicanal se seleccionan hasta 4 y 5 dependiendo de la longitud de onda de la radiación que se pretende medir.

Las características de los fototubos de los espectrómetros ATOMSCAN-25 e ICAP-61 se ofrecen a continuación:

#### ATOMSCAN-25

Fabricante: Hamamatsu  
Denominación: R-212  
Número de dínodos: 9  
Ventana lateral: 2.4 cm. de diámetro  
Rango de trabajo: 185-650 nm.  
Potencial entre dínodos: 1.250

#### ICAP-61

Fabricante: Hamamatsu  
Denominación: R-300 R-427 R-889  
Rango de trabajo (nm.): 230-600 160-320  
600-780  
Número de dínodos: 9  
Potencial entre dínodos: 1.250  
Ventana lateral: 1,3 cm. de diámetro

En la figura 55 se compara la eficiencia de respuestas de los distintos fototubos en función de la longitud de onda de la radiación incidente. Los contornos de los respectivos registros confirman la mayor especificidad de los fotomultiplicadores del espectrómetro multicanal.

#### 5.3.1.3. Sistema de control y procesamiento de datos

Aunque los dos espectrómetros disponen del mismo tipo de ordenador (IBM PC/AT, con una memoria central RAM de 64 Kb), sus «software» operativos son muy diferentes. Mientras que en un equipo secuencial una parte importante de la memoria de su ordenador está dedicada a la catalogación, búsqueda y optimización de las longitudes de onda de las futuras líneas de trabajo, en los equipos multicanales las correcciones de fondo e interferencias exigen la ocupación de una parte principal de la memoria del disco.

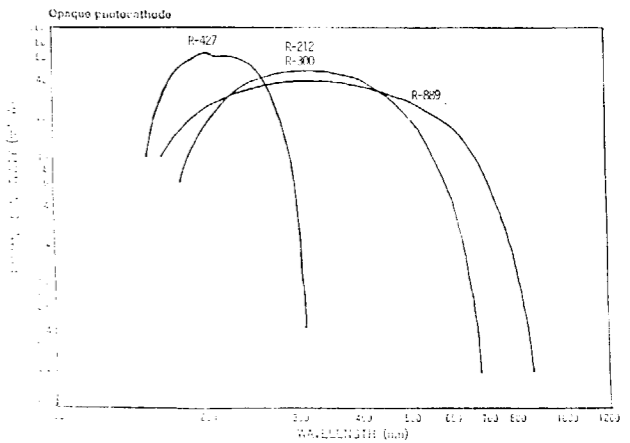


Figura 55.—Comportamiento de los tubos fotomultiplicadores en función de la longitud de onda de la radiación.

La velocidad con que se tratan los datos también difiere en ambos casos. En un espectrómetro secuencial el ordenador dispone del tiempo que el monocromador tarda en posicionarse en una nueva línea para colocar los impulsos recibidos por el transductor en el lugar de cálculo. Sin embargo, en un espectrómetro simultáneo no se dispone de este tiempo y la operación debe ser inmediata, con la consiguiente complejidad para el sistema.

El «software» de operación del ICAP-61 permite:

- Calibración empleando uno y hasta un número indefinido de estándares.
- Curvas de calibrado lineales y polinómicas de segundo orden con sus respectivos factores.
- Selección de diferentes unidades para expresar la concentración y opcionalidad en el uso de factores de dilución.
- Posibilidad de emplear de 1 a 8 elementos diferentes como patrón interno.
- Aplicación de factores de corrección interelementales (hasta 80 por línea analítica).
- Corrección de fondo a un lado o a ambos lados del pico. Un rango común de corrección es seleccionado por el operador para cada elemento, siendo el «software» quien determina y aplica un número mínimo de posicio-



nes que satisfagan la corrección de todos los elementos.

- Gráficas de alta resolución con posibilidad de superponer hasta cuatro perfiles.
- Tres grados de utilización del «software» (automático, medio y complejo).
- Almacenamiento de resultados en formato accesible al tratamiento de datos.
- Programas de tratamiento de textos.

Un esquema que muestra las posibilidades del «software» del espectrómetro aplicadas al análisis multielemental se ofrece como complemento a esta memoria en el Anexo. La información presentada es la suministrada directamente por la impresora.

### 5.3.2. Líneas espectrales de trabajo

Sirviendo como base el estudio de interferencias realizado en el apartado 5.2.4, se han dispuesto en el espectrómetro las líneas que se ofrecen en la tabla XV.

De las líneas seleccionadas en el estudio de interferencias todas han sido incluidas como líneas de trabajo en el espectrómetro.

Por los motivos geométricos anteriormente expuestos, todas las líneas de trabajo no han podido ser del primer orden espectral. La utilización de líneas de segundo orden o de órdenes superiores aumenta el poder de resolución del espectrómetro con la consiguiente ventaja a la hora de poder discriminar líneas que se encontraban muy juntas en el espectrograma de primer orden. Sin embargo, estas líneas son de menor sensibilidad, lo que constituye un inconveniente cuando se pretenden analizar elementos que se encuentran presentes en las muestras al estado de trazas.

Al montar los fotomultiplicadores el fabricante ha procurado, dentro de lo posible, emplear los órdenes superiores para las líneas más sensibles.

### 5.3.3. Optimización de parámetros instrumentales

Cuando se pretende poner a punto una metodo-

**TABLA XV**  
Líneas espectrales elegidas

Elemento	(nm.)	Orden espectral
Ag	328.068	2
Al	237.324	2
Ba	493.409	1
Be	234.861	2
Bi	223.061	2
Ca	317.933	2
Cd	228.802	3
Co	228.616	2
Cr	267.716	2
Cu	324.754	2
Fe	271.441	1
K	766.491	1
Mg	279.079	1
Mn	294.920	1
Mo	202.030	3
Na	589.592	1
Nb	309.418	2
Ni	231.604	2
P	214.914	2
Pb	220.353	2
Sb	217.581	2
Ti	336.121	2
V	292.402	2
W	207.911	2
Y	371.080	2
Zn	213.856	3

logía analítica por EPAI multielemental, se debe procurar alcanzar la máxima señal de intensidad de emisión para los diferentes analitos. Sin embargo, el intento choca con la problemática de que, por regla general, un aumento en la señal procedente del analito, lleva asociado un incremento de la señal correspondiente al fondo. Ante esta circunstancia lo que verdaderamente tiene importancia es hacer compatible un valor máximo de la primera con un nivel mínimo del segundo, es decir, conseguir la mejor relación pico/fondo.

Sobre la anterior relación actúan numerosos parámetros que en la tabla XVI aparecen asociados a las partes del equipo de donde son originarios.

De los parámetros indicados en la tabla XVI en el presente trabajo sólo se ha contemplado la influencia de tres que destacan por su importancia:

- Potencia suministrada por el generador.
- Altura de observación.
- Flujo de Ar de nebulización.

**TABLA XVI**  
Parámetros que influyen en un análisis por EPAI

PARTE DEL EQUIPO	PARAMETRO
Generador:	Frecuencia Potencia Diámetro del inductor Altura del inductor Número de espiras
Antorcha:	Forma Diámetro de los tubos Modo de alimentación
Gases:	Flujo del gas plasmógeno Flujo del gas auxiliar Presión de alimentación del nebulizador Flujo del gas de nebulización
Nebulizador:	Caudal de la solución Densidad del aerosol
Zona de observación:	Altura de observación Dimensiones de la zona

A continuación se pasa a exponer la experimentación realizada para conocer la contribución de estos tres parámetros.

#### 5.3.3.1. Influencia de la potencia suministrada por el generador

Es bien conocido el hecho de que la forma del plasma y sus dimensiones están ligadas estrechamente a la potencia suministrada por el generador. Un incremento de la misma se traducirá en un aumento de volumen del plasma. En un equipo que trabaje a 27 MHz, como es el caso del espectrómetro multicanal ICAP-61 que se ha utilizado en esta memoria, variaciones de potencia comprendidas entre 800 y 2000 vatios no modifican apreciablemente la forma del «penacho» de la antorcha, pero sí actúan sobre su volumen. Por el contrario, cuando la potencia decrece por debajo de los 800 vatios el plasma comienza a perder su forma. Una disminución más drástica de este parámetro conduce finalmente a su extinción.

Para estudiar la incidencia de la potencia sobre las señales correspondientes al pico, al fondo y a la relación pico/fondo se ha trabajado en un intervalo de la primera comprendida entre 800 y 2000 vatios, con posibilidad de escalones cada 100 vatios.

Los ensayos, para hacerlos comparativos, se han llevado a cabo manteniendo constantes los otros dos parámetros que completan el estudio:

— Altura de observación: 16 mm.

— Flujo de Ar de nebulización: 0.7 l/min.

Se han elegido los valores precedentes por estar recomendados en numerosos trabajos (85) (86) y (87). En la figura 56 se ofrece la dependencia de las intensidades netas de seis de las líneas analíticas elegidas en el anterior estudio de interferencias con la potencia. Las señales están producidas, en este y en los posteriores ensayos, por soluciones de 5 µg/ml. de analito y la escala de potencia que figura en la ordenada de la representación es arbitraria.

Del hábito de las curvas precedentes se deduce:

— En el Co, Cd y Pb se produce la mayor depen-

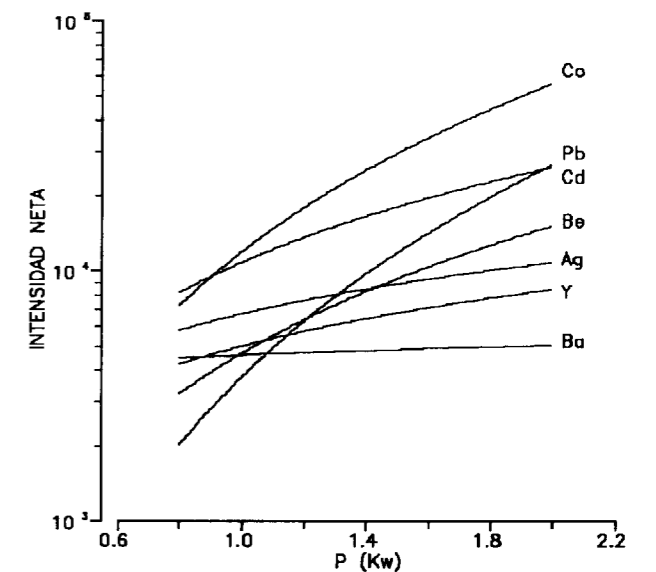


Figura 56.—Variación de la intensidad neta en función de la potencia aplicada para las líneas espectrales: Ag I 328.068 nm.; Ba II 493.409 nm.; Be I 234.861 nm.; Cd I 228.802 nm.; Co II 228.616 nm.; Pb II 220.353 nm., e Y II 371.030 nm.

dencia entre intensidad emitida y potencia aplicada.

— En la Ag, Y, Be y Ba una elevación de potencia por encima de los 1500 watos afecta muy poco a la intensidad de emisión.

El encontrar una señal de intensidad neta máxima para distintos valores de la potencia por sí sola, no constituye una característica esencial para optimizar una determinación por EPAI. No se debe olvidar lo indicado en 5.3.3., donde se decía que lo interesante es alcanzar la mejor relación pico/fondo. En este sentido, la experimentación anterior se ha completado realizando un estudio de la variación del fondo y de la relación pico/fondo con la potencia para las seis líneas ensayadas. En las figuras 57 y 58 se contempla el resultado de dicho estudio.

El crecimiento de la intensidad de los fondos llega a alcanzar prácticamente dos órdenes de magnitud para determinados elementos (Pb y Co), valor muy superior al conseguido por el crecimiento de las intensidades netas, que apenas ha superado el orden de magnitud en todos los casos.

En la figura 58 se observa cómo la acusada contribución de los fondos ha hecho que las curvas

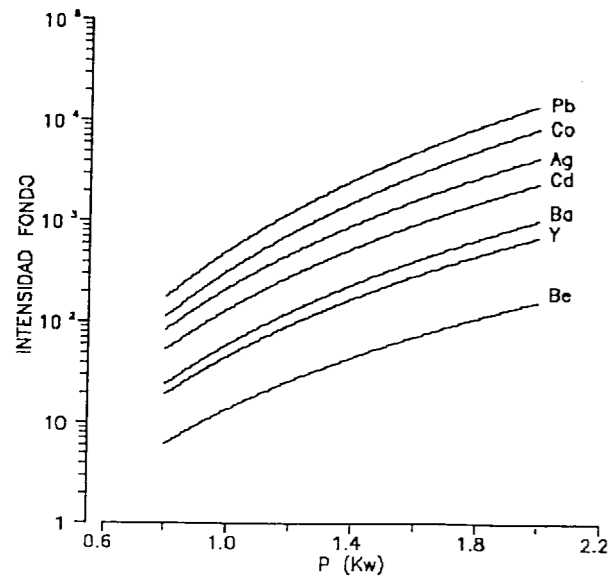


Figura 57.—Variación de la señal de fondo con la potencia para las líneas espectrales: Ag I 328.068 nm.; Ba II 493.409 nm.; Be I 234.861 nm.; Cd I 228.802 nm.; Co II 228.616 nm.; Pb II 220.353 nm., e Y II 371.030 nm.

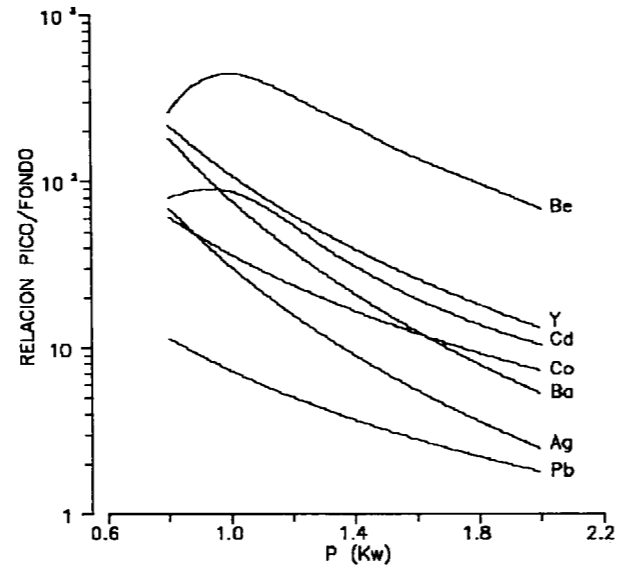


Figura 58.—Variación de la señal pico/fondo con la potencia para las líneas espectrales: Ag I 328.068 nm.; Ba II 493.409 nm.; Be I 234.861 nm.; Cd I 228.802 nm.; Co II 228.616 nm.; Pb 220.353 nm., e Y 371.039 nm.

intensidad neta-potencia modifiquen su comportamiento y que las mejores relaciones pico/fondo se consigan con la potencia de partida (800 watos), salvo en los casos del Be y del Co, que se han obtenido con 1000 y 900 watos, respectivamente. Por otra parte, hay que hacer constar que la inestabilidad del plasma que ya comienza a surgir a 800 watos, produciendo elevados coeficientes de variación en las lecturas de fondo, ha hecho imprescindible llegar a una solución de compromiso a la hora de elegir la potencia de trabajo. Se ha fijado un valor de la misma que haga compatible una buena relación pico/fondo, para todos los elementos, con la mejor estabilidad del plasma. Una potencia de 1100 watos ha sido el resultado de este compromiso.

### 5.3.3.2. Influencia de la altura de observación

Se define esta altura como la distancia que existe entre el eje óptico del espectrómetro y la posición de la primera espira de la bobina de inducción.

La elección del valor que hay que dar a este parámetro en un análisis multielemental depen-

de de numerosos factores, entre los que cabe destacar:

- Frecuencia del generador.
- Caudal del gas de nebulización.
- Refractoriedad de los distintos elementos.

A la hora de establecer las condiciones de trabajo para realizar este ensayo se han empleado:

- La potencia seleccionada en el apartado anterior (1100 watos).
- El flujo del Ar de nebulización que se había fijado en dicho apartado (0.7 l/min.).
- 1.6 l/min. como flujo del gas plasmógeno.
- 2.0 ml/min. como caudal de nebulización de la solución.

La sistemática que se ha seguido en la experimentación ha sido la misma que se ha empleado en la elección de la potencia óptima y ha comprendido tres etapas:

- 1.ª) Variación de la intensidad neta de pico con la altura de observación.
- 2.ª) Variación de la intensidad de fondo con la altura de observación.

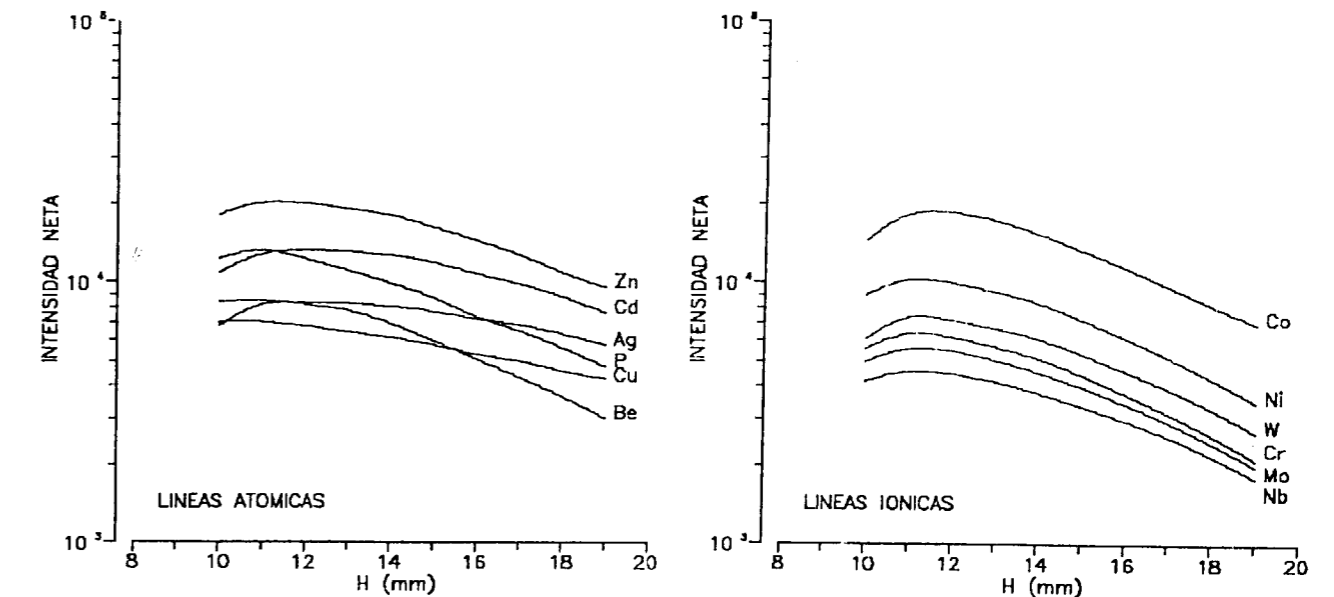


Figura 59.—Variación de la intensidad neta en función de la altura de observación para las líneas espectrales: Ag I 328.068 nm.; Be I 234.861 nm.; Cd I 228.802 nm.; Co II 228.616 nm.; Cr II 267.716 nm.; Cu I 324.754 nm.; Mo II 202.030 nm.; Nb II 309.418 nm.; Ni II 231.604 nm.; P 214.914 nm.; W II 207.911 nm., y Zn I 213.856 nm.

3.ª) Variación de la relación pico/fondo con la altura de observación.

Aunque se han ensayado las 22 líneas objeto de estudio, en esta ocasión sólo han sido 12 las ofrecidas. En aras a una mejor visualización se presenta por separado el comportamiento de las líneas atómicas y de las líneas iónicas. En las figuras 59, 60 y 61 quedan plasmados los resultados obtenidos en las tres etapas.

A la vista de las figuras cabe hacer las siguientes consideraciones:

- Se observa un comportamiento similar de las intensidades netas de las líneas en función de la altura de observación. Todas ellas presentan un máximo aproximadamente 11 mm. de la primera espira de la bobina de inducción, decreciendo a continuación la intensidad de forma lineal y con pendientes semejantes.
- Análoga actuación experimentan los fondos, pero en esta ocasión el máximo es sustituido por un decrecimiento monótono.
- La relación pico/fondo tiene un comportamiento más homogéneo en las líneas iónicas, con un máximo en todas ellas situado entre

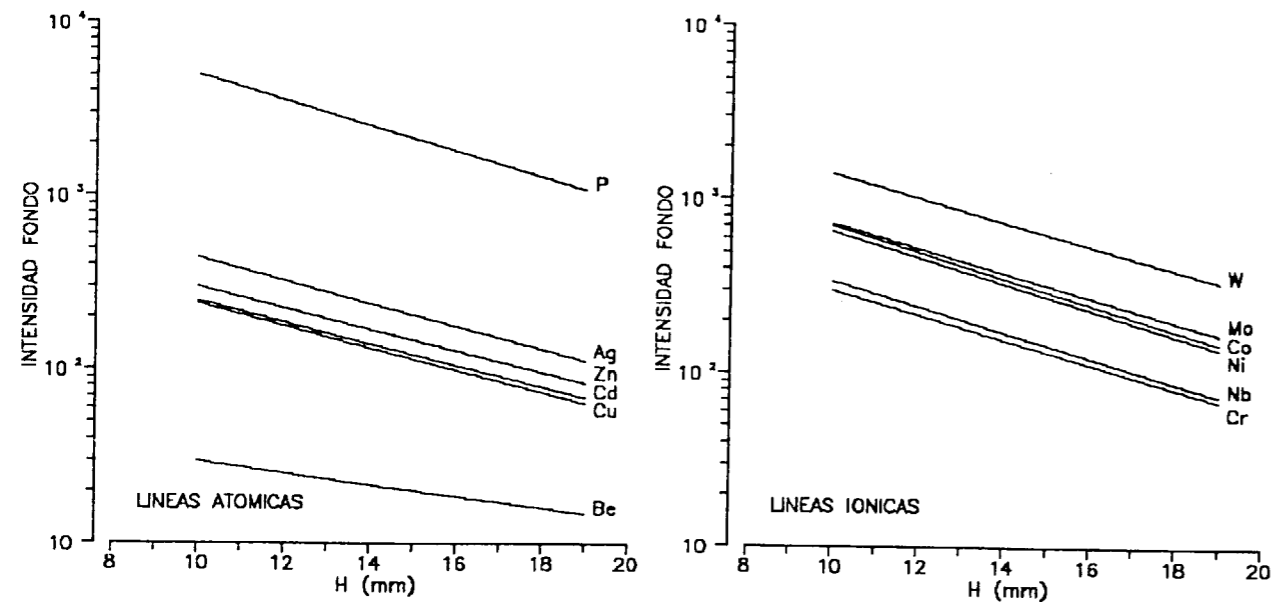


Figura 60.—Variación de la intensidad de fondo en función de la altura de observación para las líneas espectrales: Ag I 328.068 nm.; Be I 234.861 nm.; Cd I 228.802 nm.; Co II 228.616 nm.; Cr II 267.716 nm.; Cu I 324.754 nm.; Mo II 202.030 nm.; Nb II 309.418 nm.; Ni II 231.604 nm.; P I 214.914 nm.; W II 207.911 nm., y Zn I 213.856 nm.

15 y 16 mm. En las líneas atómicas este máximo lo presentan solamente Be y Zn; los otros cinco elementos ofrecen un hábito parabólico no excesivamente creciente si se tiene en cuenta que en esta ocasión se ha utilizado escala decimal en lugar de semilogarítmica para la representación. En el caso particular del Be, la localización de la inflexión a 13 mm. justifica que el elemento se comporte como refractario (altura de observación más cercana a la primera espira). Este comportamiento es debido a que el Be tiene una estructura electrónica en su capa más externa semejante a la del gas noble He. La utilización en la práctica de otra altura de observación para analizar este elemento no resulta peligrosa, ya que se trata de una emisión extraordinariamente sensible.

Por tratarse de determinaciones multielementales las que se tienen que llevar a cabo, y en base a los resultados conseguidos en este apartado, se ha elegido la altura de observación de 16 mm. como la más idónea para realizar los análisis. Con este valor de la altura no resulta perjudicada en exceso ninguna de las relaciones pico/fondo correspondientes a las 22 líneas espectrales de trabajo.

De la visión de la figura 61 otro hecho puede constatarse. La posición de las curvas da una idea bastante aproximada acerca del nivel de sensibilidad de las correspondientes emisiones espectrales. Así, la línea de Be I situada a 234.861 nm. es, con diferencia, la más sensible de las representadas, mientras que la 214.914 nm. de P I es la que ofrecerá un menor LD.

### 5.3.3.3. Influencia del flujo de Ar de nebulización

El flujo de Ar de nebulización, junto con la presión de funcionamiento del nebulizador, el caudal de la solución nebulizada, el caudal real de solución introducida en el plasma y el rendimiento de nebulización, son los cinco parámetros que inciden en el proceso total de nebulización de la muestra. De ellos, los dos últimos son los más difíciles de evaluar y, por tanto, los más problemáticos a la hora de conocer cómo actúa su variación sobre la señal de emisión del analito. Por el contrario, la influencia de los otros tres, y sobre todo del primero, puede ser objeto de

estudio sin precisar de una complicada experimentación. En este sentido, los datos aportados al establecer la variación de las señales espectrales en función del flujo de Ar de nebulización pueden resultar muy significativos. No en vano este flujo es el responsable de aspectos analíticos tan importantes, como son:

- La naturaleza del aerosol.
- El tiempo de permanencia de los elementos en el plasma.
- La posición de las zonas de excitación atómica e iónica en relación con el eje óptico del espectrómetro.

Los ensayos realizados para conocer la influencia del flujo de Ar de nebulización en cuanto a su sistemática han seguido las directrices marcadas en los apartados anteriores.

En la figura 62 se representa la variación de la intensidad neta en función del flujo de Ar de nebulización para 12 de las líneas atómicas e iónicas utilizadas en este estudio. Todas ellas presentan, excepción hecha de las emisiones 324.754 nm. de Cu y 493.409 nm. de Ba, un máximo de intensidad en el intervalo de flujo de Ar elegido en el ensayo (0.5-0.8 l/min.) y en las condiciones de trabajo seleccionadas: P = 1100 watos; H de observación = 16 mm., y caudal de nebulización de la muestra = 2 ml/min.

Al lado de cada trazado se ofrece el potencial de excitación en las líneas atómicas y el potencial de ionización en las líneas iónicas. La posi-

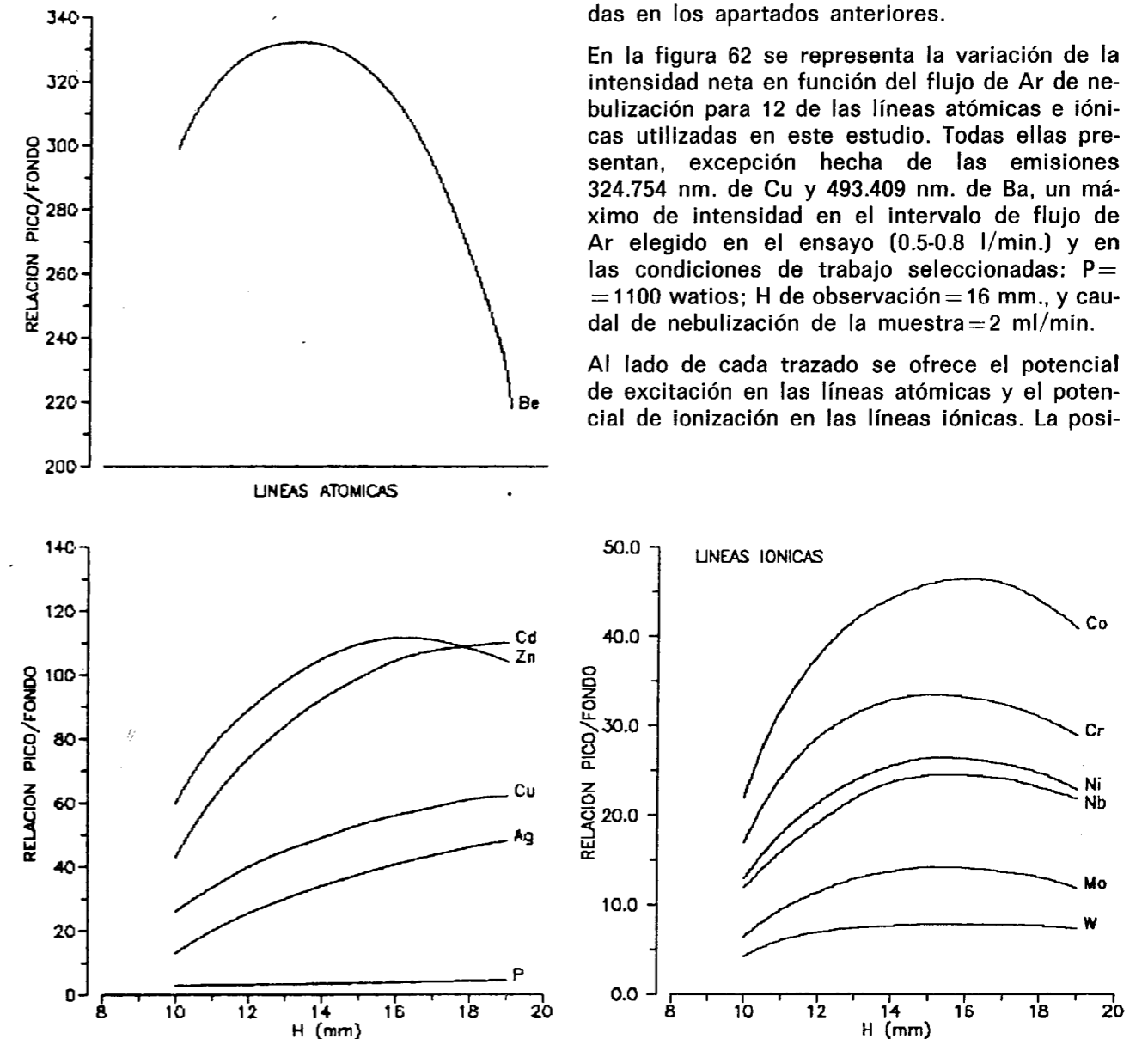


Figura 61.—Variación de la relación pico/fondo en función de la altura de observación para las líneas espectrales: Ag I 328.068 nm.; Be I 234.861 nm.; Cd I 228.802 nm.; Co II 228.616 nm.; Cr II 267.716 nm.; Cu I 324.756 nm.; Mo II 202.030 nm.; Nb II 309.418 nm.; Ni II 231.604 nm.; P I 214.914 nm.; W II 207.911 nm., y Zn I 213.856 nm.

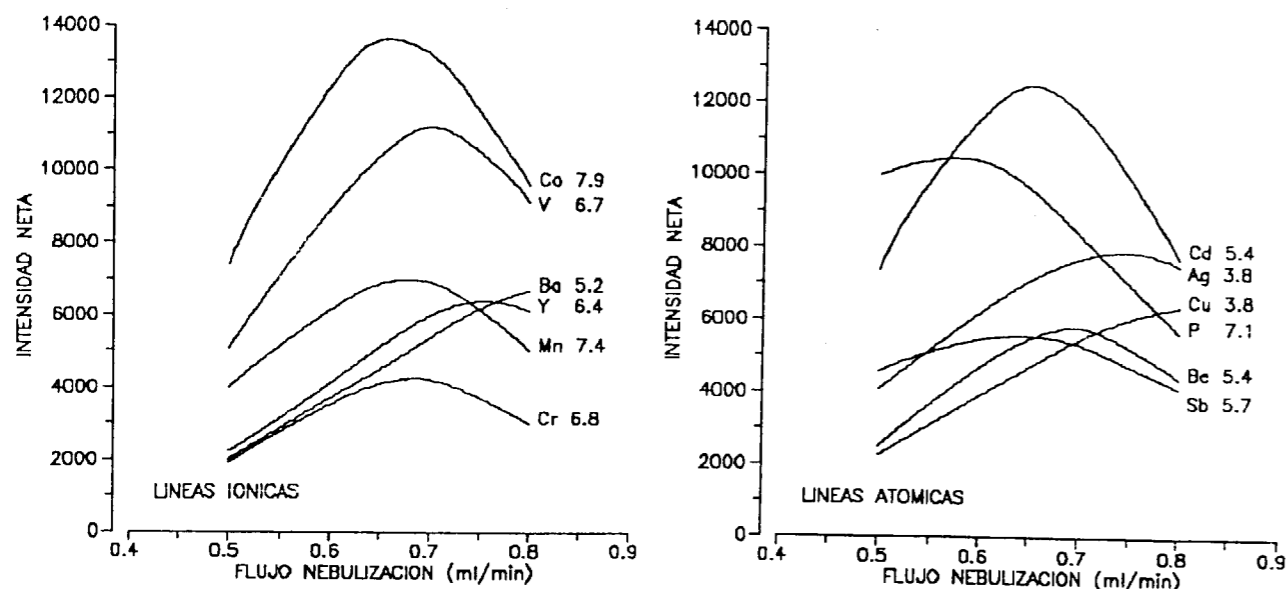


Figura 62.—Variación de la intensidad neta de emisión en función del flujo de Ar de nebulización para las líneas espectrales: Ag I 328.068 nm.; Ba II 493.409 nm.; Be I 234.861 nm.; Cd I 228.802 nm.; Co II 228.616 nm.; Cr II 267.716 nm.; Cu I 324.754 nm.; Mn II 294.920 nm.; P I 214.914 nm.; Sb I 217.581 nm.; V II 309.311 nm., e Y II 371.030 nm.

ción de los máximos en la representación gráfica indica que, a medida que aumentan los respectivos potenciales, éstos se desplazan hacia flujos de Ar de nebulización menores. Por este motivo en el Cu y en el Ba, que poseen los poten-

ciales más bajos en sus respectivas series, no se alcanza la máxima intensidad ni aun empleando el flujo más elevado dentro de los ensayados.

En la figura 63 puede observarse cómo todos

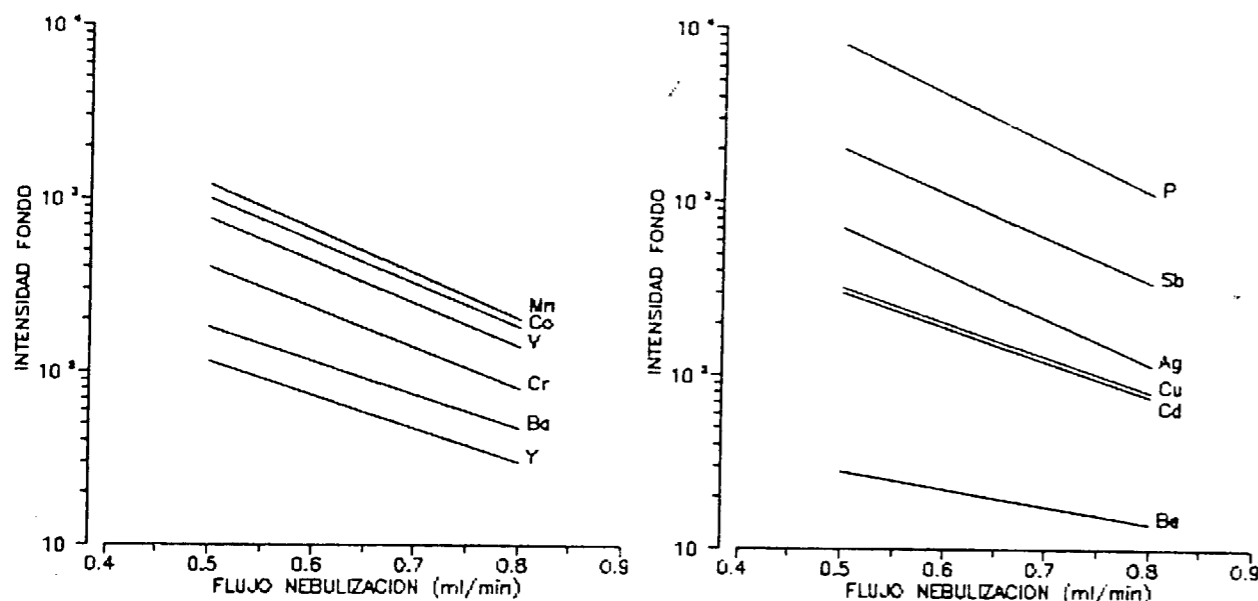


Figura 63.—Variación de la intensidad de fondo en función del flujo de Ar de nebulización para las líneas espectrales: Ag I 328.068 nm.; Ba II 493.709 nm.; Be I 234.861 nm.; Cd I 228.802 nm.; Co II 228.616 nm.; Cr II 267.716 nm.; Cu I 324.754 nm.; Mn II 294.920 nm.; P I 214.914 nm.; Sb I 217.581 nm.; V II 309.311 nm., e Y II 371.030 nm.

los fondos correspondientes a las líneas anteriores decrecen de forma similar al aumentar el flujo del Ar de nebulización. La disminución que se produce no llega a alcanzar valores de un orden de magnitud en ningún caso.

El hábito de esta disminución en las pendientes de las rectas es similar a la que se produce en los fondos al modificar la altura de observación de la zona del plasma.

Como ensayo más importante en la práctica, por englobar los dos anteriores, en la figura 64 se ofrece la variación de la señal pico/fondo con el flujo de Ar de nebulización.

La práctica desaparición del máximo que había en las curvas de la figura 62 por la contribución de los fondos, hace que la mejor relación pico/fondo se consiga con un caudal de 0.8 l/min. (máximo posible en el ICAP-61), prácticamente en todos los casos. Por otra parte, es sobradamente conocido el hecho que un flujo de Ar de nebulización elevado, no sólo disminuye la temperatura en la zona de observación, sino que también modifica sustancialmente la configuración del plasma originando gran inestabilidad en las medidas y acrecentando el efecto matriz.

Para llegar nuevamente a un compromiso entre la experimentación realizada, siempre utilizando soluciones acuosas de 5 µg/ml. de analito, y la problemática anteriormente expuesta, se ha elegido un flujo de Ar de nebulización de 0.75 l. por minuto que proporciona una relación pico/fondo que no se aparta prácticamente de la máxima conseguida en ningún caso.

Se completa así este apartado cuya experimentación ha permitido fijar el valor de tres parámetros muy importantes con vistas a realizar el análisis multielemental simultáneo.

Potencia suministrada por el generador: 1100 w.  
Altura de observación del plasma: 16 mm.  
Flujo del Ar de nebulización: 0.75 l/min.

#### 5.3.4. Corrección de fondo

La señal óptica que incide sobre el fotomultiplicador se debe, en principio, a la emisión del analito previamente transformada en radiación monocromática a la salida de la rendija del polí cromador. Dicha emisión viene siempre incre-

mentada por la procedente del fondo y eventualmente por la que tiene su origen en otros elementos que presentan emisión a la misma longitud de onda. El fotomultiplicador, como medidor de señales absolutas, no tiene capacidad para discriminar las señales anteriores y se hace necesario recurrir a procedimientos que permitan evaluar las dos últimas para establecer las oportunas correcciones sobre la primera.

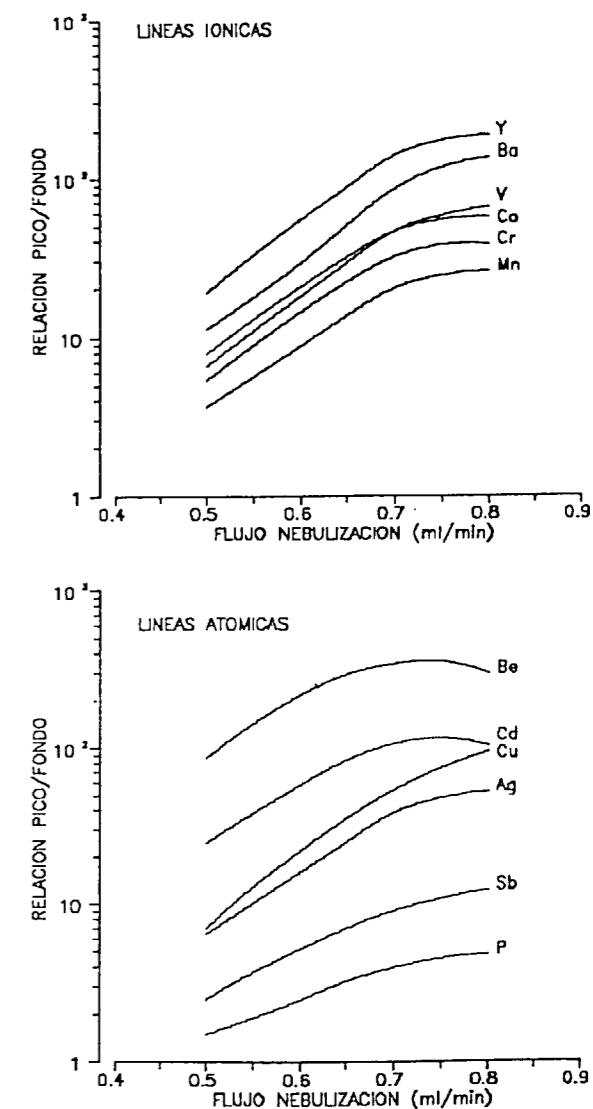


Figura 64.—Variación de la relación pico/fondo en función del flujo de Ar de nebulización para las líneas espectrales: Ag I 328.068 nm.; Ba II 493.709 nm.; Be I 234.861 nm.; Cd I 228.802 nm.; Co II 228.616 nm.; Cr II 267.716 nm.; Ca I 324.754 nm.; Mn II 294.920 nm.; P I 214.914 nm.; Sb I 217.581 nm.; V II 309.311 nm., e Y II 371.030 nm.

En este apartado se aborda exclusivamente la experimentación realizada para medir el fondo.

#### 5.3.4.1. Cálculo matemático

En un trabajo riguroso el fondo debe ser medido justamente a la longitud de onda correspondiente al analito. Para ello se debe disponer de un blanco que en idéntica cuantía, y junto con todos los componentes de la muestra, aporte la totalidad de los reactivos empleados para su puesta en solución, excepción hecha del elemento que se pretende analizar. Esta forma de actuar es lenta y muy difícil de conseguir, sobre todo cuando las muestras objeto de análisis tienen una composición compleja como ocurre con los materiales geológicos. En la práctica lo que se hace es llevar a cabo la corrección del fondo midiendo su cuantía a una o dos longitudes de onda suficientemente próxima/s al pico y donde ya no influya la emisión del analito.

El medir una o dos veces el fondo depende de que su intensidad sea semejante o distinta a ambos lados de la línea analítica.

En el primer caso, la intensidad neta de una emisión vendrá dada por la intensidad de pico disminuida en el valor correspondiente a la intensidad de fondo medido a izquierda o derecha indistintamente.

$$I_{\text{neta}} = I_{\text{pico}} - I_{\text{fondo}} \text{ (izq. o drcha.)}$$

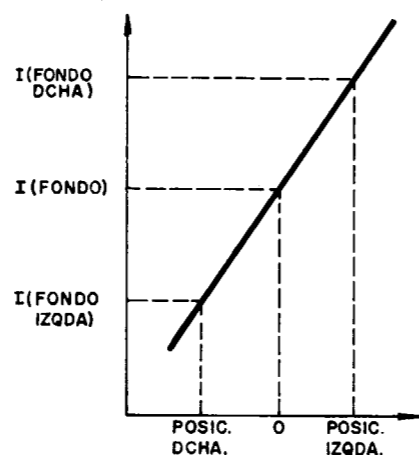
En el segundo caso, es necesario medir el fondo a la izquierda y a la derecha del pico para conocer el fondo medio. La forma de actuar es la siguiente: Primeramente se calcula la pendiente de la función lineal

$$\text{Intensidad} = f(\text{Posición del fondo})$$

$$m = \frac{I[\text{fondo drcha.}] - I[\text{fondo izq.}]}{[\text{posic. drcha.}] - [\text{posic. izq.}]}$$

Una vez establecida la pendiente  $m$ , la intensidad correspondiente al fondo vendrá dada por la expresión:

$$I[\text{fondo}] = I[\text{fondo izq.}] - m[\text{posic. izq.}]$$



#### 5.3.4.2. Confección de un patrón multielemental representativo

Como se ha indicado con anterioridad, al fondo espectral contribuyen, no solamente los reactivos utilizados en la puesta en solución de la muestra, sino todos los elementos que intervienen en su composición. Del conjunto de componentes, los mayoritarios son los que más influyen en el fondo. Por este motivo, y para corregir su efecto se ha preparado una solución multielemental que en un medio HCl al 10 por 100 en volumen contiene las concentraciones de elementos mayoritarios que figuran en la tabla XIII.

Se ha sido consciente a la hora de preparar esta solución de dos importantes limitaciones:

- 1.ª Por tratarse de un único patrón su composición en determinados casos puede alejarse significativamente de la correspondiente a la muestra (cuarcitas, calizas, dolomías, etcétera).
- 2.ª No se han incluido en su fórmula los elementos traza, ya que su aporte al fondo no es apreciable en la mayoría de los casos, como se ha visto al desarrollar el estudio de interferencias.

#### 5.3.4.3. Visualización de los fondos espectrales

Como se ha visto en 5.3.1.1., el espectrómetro ICAP-61 dispone de un mecanismo constituido por una lámina refractora de cuarzo que permite barrer la región espectral correspondiente a

una determinada emisión en el entorno de  $\pm 0.1$  nm., dividiéndola en 62 pasos.

En el estudio para corregir el fondo, el trabajo ha ido dirigido a establecer las posiciones, dentro de las 62 posibles, que permitan medir de forma adecuada el fondo. En aras a obtener una mayor rapidez en los análisis se ha procurado que las posiciones elegidas fueran coincidentes para el mayor número de los elementos analizados. La experimentación se ha realizado obteniendo los perfiles de cada línea analítica de trabajo en el entorno de  $\pm 0.1$  nm. fijado por la lámina refractora para el analito y para el patrón multielemental de componentes mayoritarios. La concentración de los diferentes analitos ha sido la reflejada en la tabla XIV. En las figuras 65 a 70, ambas inclusive, se ofrecen representados como ejemplo una serie de perfiles cuyos fondos tienen características diferentes. A continuación se pasa a describirlos:

Figura 65.—El fondo a izquierda y derecha de la longitud de onda 228.802 nm. de Cd se mantiene constante, con un nivel de intensidad discretamente superior al correspondiente al analito. La emisión que la solución multielemental produce a  $\sim 228.73$  nm. no tiene ningún efecto sobre el fondo de la emisión del Cd. Para llevar a cabo la corrección será suficiente con una sola medida. La posición donde se ha efectuado la lectura (27) forma parte del compromiso adquirido de fijar un mínimo de posiciones para medir el fondo de todos los elementos.

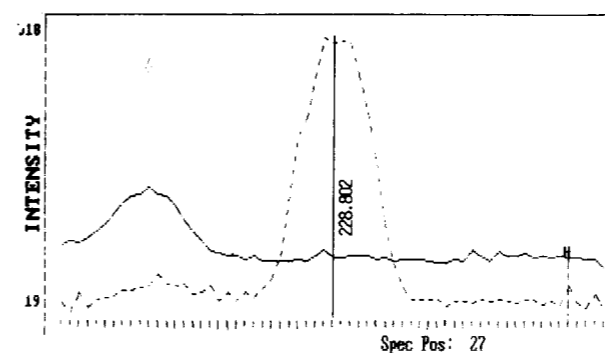


Figura 65.—Barridos espectrales en el entorno de la línea 228.802 nm. de Cd I, correspondientes a: solución de 1 µg/ml. de Cd (---); patrón multielemental (—). La letra H representa la posición que se ha tomado para medir el fondo.

Figura 66.—En esta ocasión, aunque el fondo procedente de la solución multielemental parece coincidir con el del analito, hay que tener en cuenta que la escala de intensidades es mucho más sensible y, en realidad, el nivel de fondo es semejante al anterior. Por otra parte, la emisión de la solución multielemental a  $\sim 278.99$  nm. sí se solapa con la de Mn, pero el nivel de solapamiento es tan pequeño que no afectará prácticamente en el análisis.

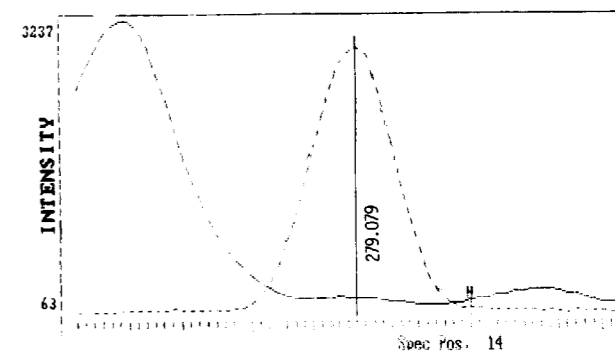


Figura 66.—Barridos espectrales en el entorno de la línea 279.079 nm. de Mn I, correspondientes a: solución de 10 µg/ml. de Mn (---); patrón multielemental (—). Posición de medida del fondo H=14.

Figura 67.—Al fondo correspondiente a la  $\lambda = 214.914$  nm. del P en su parte derecha contribuye un hombro procedente de emisión o emisiones de elemento/s que se encuentran presentes en la solución multielemental. El estudio de

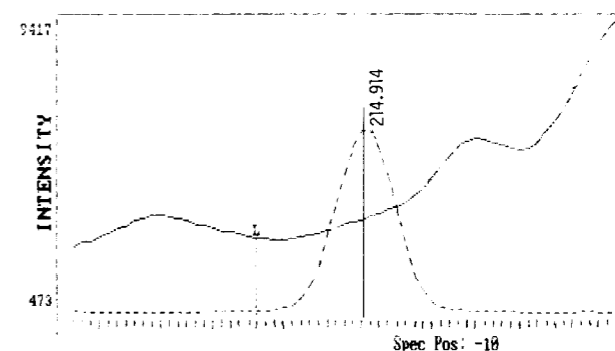


Figura 67.—Barridos espectrales en el entorno de la línea 214.914 nm. de P I, correspondientes a: solución de 15 µg/ml. de P (---); patrón multielemental (—). Posición de medida del fondo L=10.



interferencias llevado a cabo en el apartado 5.2.4. ha identificado estas emisiones como correspondientes al Fe I (214.917 nm.) y a una banda de aluminio que se extiende a lo largo de esta zona del espectro. La corrección de este tipo de interferencia se abordará en el apartado 5.3.7. Por este motivo la lectura de fondo en la determinación de P se ha circunscrito a la posición L=10 a la izquierda del pico.

Figura 68.—En el fondo correspondiente a la emisión del Nb participa mayoritariamente una banda de Al que procede de su emisión a 309.271 nm. como ha quedado comprobado al desglosar este elemento del conjunto del patrón multielemental. La forma en pendiente del fondo ha obligado a realizar dos lecturas del mismo que se han tomado en las posiciones L=10 y H=27, respectivamente.

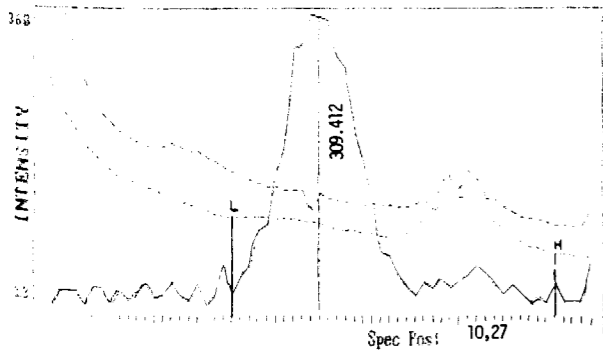


Figura 68.—Barridos espectrales en el entorno de la línea 309.412 nm. de Nb II, correspondientes a: solución de 2.5 µg/ml. de Nb (----); patrón multielemental (—) y solución de 1.000 µg/ml. de Al. Posiciones de medida del fondo H=27 y L=10.

Figura 69.—La proximidad de una emisión muy intensa de Fe a 217.582 nm. en la solución multielemental que ha sido identificada en el apartado 5.2.4.2., y que no llega a interferir con la de Sb impide la medida del fondo a la izquierda de esta última emisión. Es destacable que la contribución del fondo sobre la emisión del Sb es muy elevada en este caso:

$$\frac{\text{Intensidad de fondo de la solución multielemental}}{\text{Intensidad del patrón de 5 µg/ml. de Sb}} \approx 2/3$$

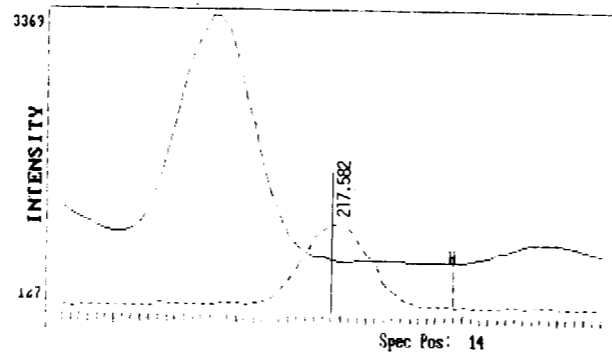


Figura 69.—Barridos espectrales en el entorno de la línea 217.582 nm. de Sb, correspondientes a: solución de 5 µg/ml. de Sb (----); patrón multielemental (—). Posición de medida del fondo H=14.

Figura 70.—Se trata de un fondo constante que requiere una sola posición de medida, pero con una intensidad que supera a la del analito (1 µm/ml. de Mo).

Fondos tan acusados en relación a la intensidad del analito como los observados en las figuras 69 y 70 para el Sb y Mo, y otros que no se han ofrecido sus perfiles, como son los correspondientes a Ag, Bi y Pb, afectan negativamente la consecución de los LD y CMD de estos elementos.

Como resumen de este apartado en la tabla XVII se ofrecen las posiciones que se han fijado para leer el fondo en las 26 líneas de este trabajo.

Una vez leídos los fondos por el medidor automático éste remite los datos al ordenador que, de acuerdo con las expresiones indicadas en el

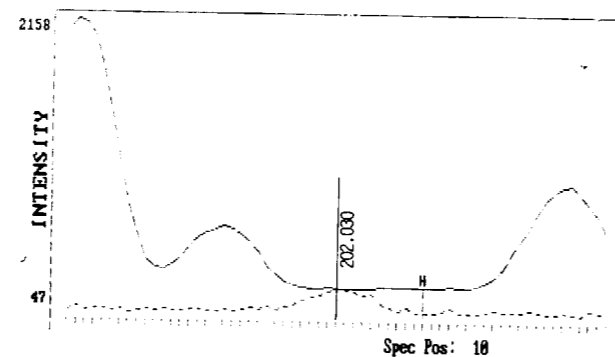


Figura 70.—Barridos espectrales en el entorno de la línea 202.030 nm. de Mo, correspondientes a: solución de 1 µg/ml. de Mo (----); patrón multielemental (—). Posición de medida del fondo H=10.

apartado 5.3.4.1., calcula automáticamente las intensidades netas correspondientes a las emisiones de los analitos.

TABLA XVII  
Posiciones fijadas para establecer la correlación de fondo

Elemento	Línea analítica (nm.)	Posición del medidor	Distancia* (nm.)
Ag	328.068	14	0.0336
Al	237.324	-27	-0.0648
Ba	493.409	-27	-0.0648
Be	234.861	27	0.0648
Bi	223.061	-10	-0.024
Ca	317.933	-10	-0.024
Cd	228.802	-27	-0.0648
Co	228.616	27	0.0648
Cr	267.716	-27	-0.0648
Cu	324.754	-27	-0.0648
Fe	271.441	-27	-0.0648
K	766.491	-27	-0.0648
Mg	279.079	-27	-0.0648
Mn	294.920	14	0.036
Mo	202.030	14	0.036
Na	589.592	-27	-0.0648
Nb	309.418	-10 y 27	-0.024 y 0.0648
Ni	231.604	27	0.0648
P	214.914	-10	-0.024
Pb	220.353	-10	-0.024
Sb	217.581	14	0.0336
Ti	336.121	-27	-0.0648
V	292.402	14	0.0336
W	207.911	27	0.0648
Y	371.080	27	0.0648
Zn	213.856	27	0.0648

(\*) Distancia calculada multiplicando la posición indicada en el medidor por 0.0024 nm.

(-) Punto situado a la izquierda.

(+) Punto situado a la derecha.

Por los datos aportados en la tabla XVII se ve que el número de puntos seleccionados para medir el fondo ha sido reducido a cuatro, dos a la izquierda (-27 y -10) y dos a la derecha (14 y 27). Se consigue de esta forma acortar en gran medida la ejecución de los análisis.

### 5.3.5. Calibración

#### 5.3.5.1. Preparación de patrones

Como ocurre con la mayoría de las técnicas ins-

trumentales, la EPAI no proporciona resultados netos en los análisis. Para obtener el porcentaje de cada uno de los elementos presentes en una muestra se requiere comparar su concentración con la de un conjunto de patrones de composición perfectamente definida. Se trata, por tanto, de un procedimiento relativo de análisis.

Por lo anteriormente expuesto, no cabe duda que el éxito en la consecución de resultados correctos dependerá en gran medida de estar en posesión de una buena serie de patrones. Lo ideal es que los patrones sean muestras con una composición igual a la de los materiales que se pretenden analizar, de esta forma los efectos de matriz estarán prácticamente eliminados. Sin embargo, la posibilidad de disponer de patrones en número suficiente para el calibrado sólo se da en áreas de materiales muy restringidos y con un gran interés tecnológico, como son: los cementos, los aceros, determinados tipos de aleaciones, etc. Por este motivo el análisis de los citados materiales mediante técnicas que parten de muestra sólida (FRX y cuantometría), se consigue en tiempos muy cortos y con excelentes resultados.

En EPAI, a pesar de que normalmente se utilizan muestras en solución, el disponer de este tipo de patrones también resulta ventajoso, sobre todo cuando se pretenden analizar elementos traza cuya emisión espectral se encuentra influenciada por la presencia de otros componentes que actúan selectivamente sobre la intensidad de emisión del analito. La existencia de minerales o rocas que posean el carácter de patrón es una garantía a la hora de confirmar los resultados cuantitativos obtenidos.

La heterogeneidad de los materiales geológicos hace muy difícil encontrar para todos ellos un número suficiente de estándares que permitan obtener las correspondientes curvas de calibrado. Muchas veces los patrones, aunque poseen similitud composicional con las muestras respecto a componentes mayoritarios, no presentan en su composición las impurezas que han de ser analizadas, y por esta circunstancia no pueden ser utilizados.

Ante esta problemática, la alternativa más eficaz es disponer de patrones preparados sintéticamente en solución, con una composición elemental similar a la de las muestras cuando se

encuentran en dicho medio, y con contenidos en el elemento o elementos que se pretenden analizar escalonadamente crecientes.

En este trabajo las soluciones «madre» empleadas en la consecución de los patrones proceden de las firmas «Riedel de Haën» y «Merck», con un elevado grado de pureza.

Para evitar incompatibilidades químicas e interferencias espectrales, el conjunto de elementos objeto de análisis se ha distribuido en cuatro series de patrones multielementales que cubren los rangos de concentración esperados en todos los materiales. De ellas, la primera corresponde a los componentes mayoritarios y las otras tres a los elementos traza.

En las tablas XVIII y XIX se ofrecen las concentraciones de los respectivos patrones referidas a muestra sólida (porcentaje en el caso de los mayoritarios y ppm en el caso de los traza).

**TABLA XVIII**  
**Denominación y concentración de los patrones preparados para el análisis de componentes mayoritarios**

Denominación Elemento	P-M <sub>1</sub> %*	P-M <sub>2</sub> %	P-M <sub>3</sub> %	P-M <sub>4</sub> %
Al	10	5	1	0.5
Ca	10	5	1	0.5
Fe	10	5	1	0.5
K	2.5	1.25	0.25	0.125
Mg	5	2.5	0.5	0.25
Na	2.5	1.25	0.25	0.125
Ti	2.5	1.25	0.25	0.125

\* Porcentaje en sólido referido a una forma de muestra de 1 g. aforada a 100 ml.

Para la obtención de los patrones de la tabla XVIII se han utilizado soluciones «madre» de una concentración de 5 mg/ml. Los volúmenes de estas soluciones requeridos para preparar 200 ml. del estándar más concentrado (P-M<sub>1</sub>), han sido:

40 ml. de las soluciones «madre» de Al, Ca y Fe.

10 ml. de la solución «madre» de Mg.

5 ml. de las soluciones «madre» de K, Na y Ti.

**TABLA XIX**  
**Denominación y concentración de los patrones preparados para el análisis de componentes traza**

Denominación Elemento	P-A <sub>1</sub> ppm*	P-A <sub>2</sub> ppm	P-A <sub>3</sub> ppm	P-A <sub>4</sub> ppm	P-A <sub>5</sub> ppm
Bi	500	250	50	10	5
Cd	200	100	20	4	2
Cr	1.000	500	100	20	10
Mn	2.000	1.000	200	40	20
Ni	1.000	500	100	20	10
P	3.260	1.630	326	65.2	32.6
Pb	1.000	500	100	20	10

Denominación Elemento	P-B <sub>1</sub> ppm	P-B <sub>2</sub> ppm	P-B <sub>3</sub> ppm	P-B <sub>4</sub> ppm	P-B <sub>5</sub> ppm
Ba	1.000	500	100	20	10
Be	200	100	20	4	2
Nb	500	250	50	10	5
Y	200	100	20	4	2
Zn	1.000	500	100	10	5

Denominación Elemento	P-C <sub>1</sub> ppm	P-C <sub>2</sub> ppm	P-C <sub>3</sub> ppm	P-C <sub>4</sub> ppm	P-C <sub>5</sub> ppm
Ag	200	100	20	4	2
Co	500	250	50	10	5
Cu	1.000	500	100	20	10
Mo	200	100	20	4	2
Sb	1.000	500	100	20	10
V	500	250	50	10	5
W	1.000	500	100	20	10

\* ppm en sólido referido a una toma de muestra de 1 g. aforado a 100 ml.

20 ml. de HCl concentrado y agua destilada hasta al enrase, han completado su obtención.

El resto de los patrones se han preparado por diluciones sucesivas, pero manteniendo la acidez clorhídrica del 10 por 100 en todos ellos.

En el caso de los elementos traza, al ser mayor el intervalo de concentración cubierto por las curvas de calibrado, se ha dispuesto de cinco patrones dentro de cada serie (tabla XIX).

El contenido de elemento base en las soluciones «madre» ha sido en esta ocasión de 1 mg/ml. Para preparar 200 ml. del patrón más concentrado de cada serie se han utilizado los siguientes volúmenes:

62.4 ml. de solución «madre» para el analito de 3260 ppm en sólido.

40 ml. de solución «madre» para el analito de 2000 ppm. en sólido.

20 ml. de solución «madre» para el analito de 1000 ppm en sólido.

10 ml. de solución «madre» para el analito de 500 ppm en sólido.

4 ml. de solución «madre» para el analito de 200 ppm en sólido.

El procedimiento de dilución sucesiva ha sido nuevamente la vía seguida para obtener los patrones diluidos y el nivel de acidez clorhídrica se ha mantenido en el 10 por 100.

Con la distribución de elementos dentro de las cuatro series anteriores se han evitado las fuertes interferencias espectrales existentes entre Ca-Bi, Cu-P y V-Nb y la incompatibilidad química en solución entre Cr y Ba por formación del CrO<sub>4</sub>Ba insoluble.

Operando como se ha indicado, los patrones conservan su estabilidad un mínimo de 15 días, siempre que para su almacenaje se empleen frascos de polietileno bien tapados.

### 5.3.5.2. Modelo matemático de calibrado

La ecuación que relaciona la intensidad de emisión con la concentración es de la forma:

$$I = A_0 + (A_1 * C^n) + (A_2 * C^{2n}) \quad [1]$$

donde:

I = Señal en cuentas de la intensidad.

A<sub>0</sub> = Ordenada en el origen.

A<sub>1</sub> = Pendiente.

A<sub>2</sub> = Coeficiente de curvatura.

C = Concentración de analito.

n = Exponente.

Los posibles tipos de ajuste que proporciona el espectrómetro dependen del número de patrones empleados:

1 Patrón: Ajuste lineal, sólo calcula A<sub>1</sub>. La ordenada en el origen A<sub>0</sub>=0 y la recta para el origen de coordenadas.

2 Patrones: Ajuste lineal, pero calculando A<sub>0</sub> y A<sub>1</sub>. El coeficiente de curvatura A<sub>2</sub> y el exponente toman los valores de 0 y 1, respectivamente.

3 Patrones: Ajuste curvilíneo. Calcula la pendiente, la ordenada en el origen y el coeficiente de curvatura. El exponente toma el valor 1.

Más de 3 Patrones: Ajuste completo: Todos los coeficientes son calculados.

Aunque en numerosos tratados y publicaciones se insiste en la respuesta lineal entre intensidad y concentración que la EPAI proporciona para un intervalo de varios órdenes de magnitud de esta última, la existencia comprobada de fenómenos de ionización y autoabsorción, por una parte, y la presencia de efectos interelementales, por otra, aconsejan que en el análisis multielemental simultáneo se empleen 3, 4 ó 5 patrones para obtener las correspondientes curvas de calibrado.

Un aspecto importante que también debe considerarse en el calibrado es establecer la frecuencia de la recalibración. Este proceso permite ajustar las curvas teniendo en cuenta las modificaciones que pueden producirse en cada analito a lo largo del tiempo. Se trata de un sistema mediante el cual la intensidad de un patrón en un determinado momento queda referida a su intensidad en la primera calibración. Para llevar a cabo este proceso es suficiente con un solo estándar, si se da la circunstancia de que la relación intensidad/concentración es lineal. La nueva recata de calibrado es paralela a la anterior y vendrá dada por la expresión:

$$I_{rec} = A'_0 + A_1 C,$$

donde:

I<sub>rec</sub> = señal en cuentas de la intensidad del patrón recalibrado.

A'<sub>0</sub> = Nueva ordenada en el origen.

A<sub>1</sub> = Pendiente que coincide con la de la ecuación [1].

### 5.3.5.3. Condiciones experimentales

A continuación se detalla la experimentación realizada para establecer las condiciones óptimas

del calibrado de los distintos elementos en lo referente al tipo de ajuste (lineal o curvilíneo) y al número de lecturas por patrón.

Los valores de la potencia de la fuente de radiofrecuencia, la altura de la zona de observación y el caudal del Ar de nebulización utilizados en estos ensayos han sido los fijados en el apartado 5.3.3. Como tiempo de integración se ha empleado 10 seg., en todos los ensayos.

5.3.5.3.1. Tipo de ajuste

Con los cuatro patrones de la serie de los componentes mayoritarios y con los cinco de cada una de las tres series de los elementos traza, se ha llevado a cabo el ajuste curvilíneo indicado en el apartado 5.3.5.2.

El volumen de datos que estos ajustes conllevan hace aconsejable que en el texto solamente se incluya el detalle de un número corto de calibra-

dos. Como ejemplo, en las tablas XX, XXI, XXII y XXIII se ofrecen ambos tipos de calibrado para dos de los componentes mayoritarios (Ca y Al) y dos de los componentes traza (Cd e Y).

Los valores que aparecen en las tablas son los que ha suministrado el ordenador, por este motivo las últimas cifras decimales carecen de significado.

Para el cálculo del coeficiente de correlación (cc) se ha empleado la expresión:

$$cc = \sqrt{1 - \frac{A}{B - C}}$$

donde:

$$A = \sum R^2, \text{ siendo } R = I_{\text{medida}} - I_{\text{calculada}}$$

$$B = \sum I_{\text{medida}}^2$$

$$C = \frac{\sum (\sum I_{\text{medida}})^2}{\text{núm. de patrones}}$$

**TABLA XX**  
Calibración lineal y curvilínea del calcio

LINEAL						
Patrón	CONCENTRACION		DIFERENCIA		SEÑAL	
	Teórica (%)	Encontrada (%)	Concent.	%	Intensidad	
P-M <sub>1</sub>	10.000	9.9489	-0.0511	0.511	986 × 10 <sup>3</sup>	5851
P-M <sub>2</sub>	5.000	5.1087	0.1087	2.17	511 × 10 <sup>3</sup>	3445
P-M <sub>3</sub>	1.000	0.9917	-0.0083	0.83	107 × 10 <sup>3</sup>	221
P-M <sub>4</sub>	0.500	0.4506	-0.0493	9.87	54075	89
CURVILINEAL						
P-M <sub>1</sub>	10.000	10.000	0.00024	0.002	986 × 10 <sup>3</sup>	5851
P-M <sub>2</sub>	5.000	4.998	-0.0011	0.021	511 × 10 <sup>3</sup>	3445
P-M <sub>3</sub>	1.000	1.005	0.00505	0.505	107 × 10 <sup>3</sup>	221
P-M <sub>4</sub>	0.500	0.496	-0.0042	0.845	54075	89
CONSTANTES DE CALIBRACION						
<i>Lineal</i>			<i>Curvilínea</i>			
A <sub>0</sub> = 9867.03			A <sub>0</sub> = 2064.29			
A <sub>1</sub> = 98097.2			A <sub>1</sub> = 105248			
A <sub>2</sub> = 0			A <sub>2</sub> = 687.39			
n = 1			n = 1			
cc = 0.999855			cc = 1.0000			
cc = coeficiente de correlación						

**TABLA XXI**  
Calibración lineal y curvilínea del aluminio

LINEAL						
Patrón	CONCENTRACION		DIFERENCIA		SEÑAL	
	Teórica (%)	Encontrada (%)	Concent.	%	Intensidad	
P-M <sub>1</sub>	10.000	9.9992	-0.0008	0.008	452 × 10 <sup>3</sup>	2370
P-M <sub>2</sub>	5.000	5.0020	0.0019	0.039	226 × 10 <sup>3</sup>	1981
P-M <sub>3</sub>	1.000	0.9979	-0.0021	0.207	45152	74
P-M <sub>4</sub>	0.500	0.5009	0.0009	0.184	22695	59
CURVILINEAL						
P-M <sub>1</sub>	10.000	9.9999	-0.0001	0.001	452 × 10 <sup>3</sup>	2370
P-M <sub>2</sub>	5.000	5.0004	0.0004	0.007	226 × 10 <sup>3</sup>	1981
P-M <sub>3</sub>	1.000	0.9981	-0.0019	0.187	45152	74
P-M <sub>4</sub>	0.500	0.5016	0.0016	0.314	22695	59
CONSTANTES DE CALIBRACION						
<i>Lineal</i>			<i>Curvilínea</i>			
A <sub>0</sub> = 62.1623			A <sub>0</sub> = 9.82959			
A <sub>1</sub> = 45183.2			A <sub>1</sub> = 45231.2			
A <sub>2</sub> = 0			A <sub>2</sub> = -4.6103			
n = 1			n = 1			
cc = 1.0000			cc = 1.0000			

**TABLA XXI**  
Calibración lineal y curvilínea del cadmio

LINEAL						
Patrón	CONCENTRACION		DIFERENCIA		SEÑAL	
	Teórica (ppm)	Encontrada (ppm)	Concent.	%	Intensidad	
P-A <sub>1</sub>	200.00	200.2893	-0.2893	0.145	5095	40
P-A <sub>2</sub>	100.00	99.4329	-0.5671	0.567	2526	24
P-A <sub>3</sub>	20.00	19.8885	-0.1115	0.557	499	15
P-A <sub>4</sub>	4.00	4.1497	0.14971	3.74	98	3.5
P-A <sub>5</sub>	2.00	2.2396	0.23960	12.00	49	8.1
CURVILINEAL						
P-A <sub>1</sub>	200.00	199.9968	-0.0032	0.002	5095	40
P-A <sub>2</sub>	100.00	100.0146	0.0146	0.015	2526	24
P-A <sub>3</sub>	20.00	19.9568	-0.0432	0.216	499	15
P-A <sub>4</sub>	4.00	3.9865	-0.0135	0.338	98	3.5
P-A <sub>5</sub>	2.00	2.0453	0.0453	2.26	49	8.1
CONSTANTES DE CALIBRACION						
<i>Lineal</i>			<i>Curvilínea</i>			
A <sub>0</sub> = -7.7282			A <sub>0</sub> = 1.9257			
A <sub>1</sub> = 25.4784			A <sub>1</sub> = 25.0577			
A <sub>2</sub> = 0			A <sub>2</sub> = 0.002145			
n = 1			n = 1			
cc = 0.999991			cc = 1.00000			

**TABLA XXIII**  
**Calibración lineal y curvilínea del ytrio**

Patrón	LINEAL				SEÑAL	
	CONCENTRACION		DIFERENCIA			
	Teórica (ppm)	Encontrada (ppm)	Concent.	%	Intensidad	
P-B <sub>1</sub>	200.00	200.5168	0.5168	0.258	2590	17.6
P-B <sub>2</sub>	100.00	98.960	-1.040	1.04	1276	4.2
P-B <sub>3</sub>	20.00	19.945	-0.0550	0.275	-253	1.5
P-B <sub>4</sub>	4.00	4.3069	-0.3069	7.67	51	1.7
P-B <sub>5</sub>	2.00	2.2716	-0.2716	13.6	25	1.2
CURVILINEAL						
P-B <sub>1</sub>	200.00	200.0048	0.00483	0.002	2590	17.6
P-B <sub>2</sub>	100.00	99.9775	-0.0225	0.022	1276	4.2
P-B <sub>3</sub>	20.00	20.0670	0.0670	0.0335	253	1.5
P-B <sub>4</sub>	4.00	4.0223	0.0223	0.557	51	1.7
P-B <sub>5</sub>	2.00	1.9248	-0.0716	3.58	25	1.2
CONSTANTES DE CALIBRACION						
<i>Lineal</i>			<i>Curvilínea</i>			
A <sub>0</sub> = -4.7251			A <sub>0</sub> = 0.430213			
A <sub>1</sub> = 12.9385			A <sub>1</sub> = 12.5647			
A <sub>2</sub> = 0			A <sub>2</sub> = 0.001906			
n = 1			n = 1			
cc = 0.999974			cc = 1.000000			

En las figuras 71 y 72 se contemplan las curvas de calibrado correspondientes al Ti, que es el elemento que ha precisado el ajuste curvilínea más importante.

A la vista de los datos mostrados en las tablas XX a XXIII y al resto de los resultados proporcionados por el ordenador se deduce que la

relación intensidad/concentración se acerca, en mayor o menor grado, a un ajuste curvilínea para la totalidad de los elementos. Sin embargo, existen casos como los de Al (ofrecido en la tabla XXI), Ba, Cr, K, Mg, Na, Mn, Ni, Pb y P, en que utilizar un ajuste lineal no origina demasiadas desviaciones entre concentraciones teóricas y experimentales.

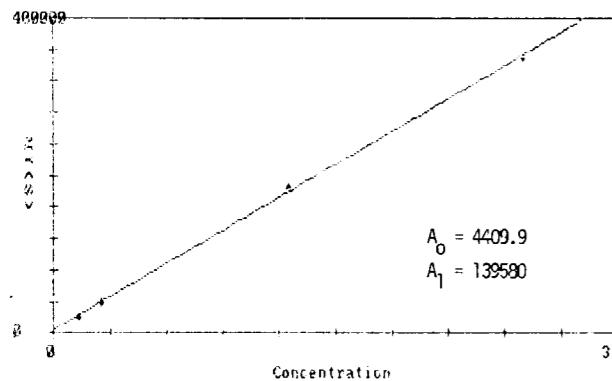


Figura 71.—Ajuste lineal para el Ti.

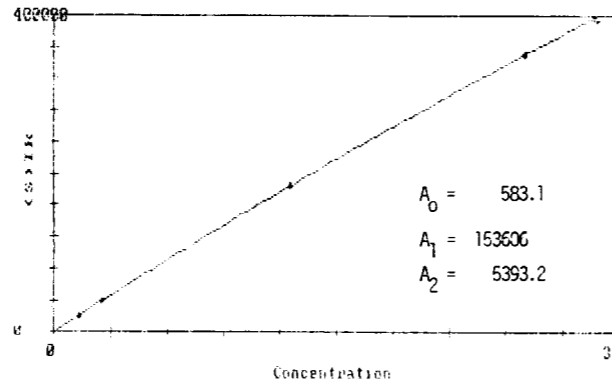


Figura 72.—Ajuste curvilínea para el Ti.

Los valores del coeficiente de curvatura A<sub>2</sub> que aparecen en la fórmula [1] del apartado 5.3.5.2. sólo resultan comparables cuando se refieren a series de patrones cuyos términos tienen igual concentración y sus lecturas correspondientes de intensidad son relativamente semejantes. Si se dan estas dos circunstancias se puede clasificar el grado de curvatura de una serie de calibrados por los valores absolutos de dichos coeficientes. Cuando las lecturas de intensidad entre patrones de igual concentración se alejan sensiblemente, el anterior criterio sólo es válido cuando existe una gran diferencia entre los coeficientes. En la tabla XXIV se muestran los valo-

res de dicho coeficiente calculados por el «software» del espectrómetro agrupados siguiendo el criterio de igualdad de concentración de todos los términos de la serie.

Los datos de A<sub>2</sub> proporcionados por la tabla XXIV indican que, dentro de cada serie, los menores son los que dan lugar a ajustes que se aproximan más a una recta. Este hecho ha sido constatado experimentalmente, observándose que un ajuste lineal no origina desviación apreciables entre concentraciones teóricas y experimentales en el caso de los patrones de Al, Ba, Cr, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb y P.

**TABLA XXIV**  
**Valores de A<sub>2</sub> obtenidos en el ajuste curvilínea**

Conc. del patrón de alta (%)	Componentes mayoritarios	A <sub>2</sub>	Conc. del patrón más alto (ppm)	Componentes traza	A <sub>2</sub>
10	Ca	-687.39	1000	Zn	0.000867
	Fe	-287.89		W	0.000679
	Al	4.61		Sb	0.000648
5	Mg	- 1.35		Cu	0.000202
				Cr	0.000176
				Ni	0.000140
				Ba	0.000134
2.5	Ti, Na, K	-5393, -1509, 299		Pb	0.000069
				Co	0.002045
				V	0.001638
			Nb	0.000741	
200			Bi	0.000393	
			Ag	0.002431	
			Be	0.002379	
			Cd	0.002145	
2000			Y	0.001906	
			Mn	0.000091	
3260			P	0.000035	

Como resumen de este apartado sólo indicar que, como se había previsto, el amplio intervalo de concentraciones que abarcan el conjunto de series de patrones ha contribuido en gran medida a que se consigan mejores resultados de calibración con un ajuste curvilínea.

que es preciso realizar de cada patrón para obtener los resultados más reproducibles. En esta línea se han efectuado ensayos con 3, 5 y 10 lecturas. Como criterio global para la elección de un número óptimo de lecturas se ha tomado el menor valor del error estándar del calibrado. Dicho error estándar viene dado por la expresión:

5.3.5.3.2. Número de lecturas por patrón

El segundo aspecto que se ha considerado en el calibrado es establecer el número de lecturas

$$\text{Error estándar} = \sqrt{\frac{\sum R^2}{\text{DOF}}}$$

donde:

$$R = |I_{\text{medida}} - I_{\text{calculada}}|$$

DOF = Número de patrones empleados — número de coeficientes calculados ( $A_0$ ,  $A_1$  y  $A_2$ ).

En la tabla XXV se dan los datos referentes al error estándar de calibrado para el conjunto de los elementos con los tres tipos de lectura. En los ensayos se ha empleado el ajuste curvilíneo que, como se ha visto en el apartado anterior, es el que proporciona resultados más exactos.

Todos los valores del error estándar que figuran en la tabla XXV no son comparables entre sí, ya que, al igual que ocurría con el coeficiente de curvatura  $A_2$ , éstos dependerán del orden numérico de las lecturas de intensidad. En esta ocasión solamente son cotejables aquellos que corresponden a un mismo elemento.

Siguiendo el anterior criterio, los resultados de la tabla XXV indican que el error estándar referente a diez lecturas ha superado sustancialmente a los correspondientes a tres y cinco lecturas en la totalidad de los elementos. Este hecho debe explicarse en base al tiempo que dura un calibrado de estas características.

Tiempo total de calibración sin contar los períodos de lavado entre dos estándares = 400 ó 500 segundos, respectivamente.

El tiempo de calibración real para diez lecturas resulta excesivamente largo, y durante él se producen derivas en la intensidad del analito que inciden negativamente en la precisión y en la exactitud de los resultados.

Respecto a los valores obtenidos con tres y cinco lecturas, el error estándar más bajo se ha producido para 15 elementos con cinco lecturas y para once elementos con tres lecturas.

La anterior distribución del error estándar deja la decisión de elegir el número de lecturas en manos de consideraciones de precisión de los datos y del tiempo de ejecución de los ensayos. En el caso de un análisis multielemental simultáneo el criterio de duración es el que debe prevalecer, y en este sentido en la presente ocasión se proponen tres lecturas por muestra manteniendo el tiempo de integración en 10 segundos.

**TABLA XXV**  
Valores del error estándar de calibrado

Elemento	ERROR ESTANDAR		
	3 lecturas	5 lecturas	10 lecturas
Ag	2.59	1.03	6.69
Al	55.84	261.93	1010.64
Ba	8.04	11.39	27.72
Be	0.78	1.09	8.82
Bi	7.63	2.29	11.48
Ca	346.96	1024.35	4004.95
Cd	0.74	0.26	11.64
Co	10.52	3.07	29.28
Cr	8.45	4.04	34.46
Cu	1.94	0.76	24.91
Fe	161.78	408.02	2114.82
K	37.33	5.28	35.88
Mg	244.63	322.31	1089.96
Mn	3.69	1.96	69.67
Mo	5.74	38.13	17.22
Na	506.43	115.74	599.67
Nb	0.67	9.68	16.20
Ni	6.21	3.40	44.87
P	31.04	22.44	120.20
Pb	3.61	2.71	18.09
Sb	12.03	5.81	37.13
Ti	79.37	318.43	2224
V	4.39	2.89	32.18
W	14.50	12.37	38.03
Y	0.58	0.96	8.25
Zn	57.93	54.58	119.69

Número de patrones: 4 ó 5.

Número de lecturas por patrón: 10.

Tiempo de integración por lectura: 10 seg.

### 5.3.6. LD y CMD de los distintos elementos en las muestras

Aunque la IUPAC (88) recomienda como valor del LD el de tres veces la desviación estándar ( $\sigma$ ) correspondiente al ruido de fondo, en el presente trabajo se ha seguido el criterio de emplear el doble de  $\sigma$  por ser el más comúnmente aceptado y utilizado por la mayoría de los autores, y en el que se basan los datos tabulados en buena parte de la bibliografía (89) y (90).

La expresión utilizada en el cálculo del LD ha sido la siguiente:

$$LD = 2 \frac{C_p}{I_p - I_f} \sigma_f$$

siendo:

$C_p$  = Concentración del patrón empleado en la experimentación.

$I_p$  = Valor medio de las intensidades de pico (10 lecturas).

$I_f$  = Valor medio de las intensidades de fondo (10 lecturas).

$\sigma_f$  = Desviación estándar correspondiente a la intensidad de fondo.

La determinación se ha llevado a cabo en medio acuoso, en solución independiente para cada elemento y con las líneas de trabajo establecidas en la tabla XV.

Los 19 elementos traza objeto de análisis, por una parte; su nivel de detectabilidad frente a esta técnica, por otra, y la diferencia de sensibilidad entre las líneas de trabajo, por último, han sido la causa de no emplear una misma concentración en todos los patrones. Concretamente, se han preparado dos series de estándares mono-elementales cuyo contenido en analito se expresa a continuación:

0.1  $\mu\text{g/ml}$ :

Ag, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, V, Y y Zn

0.5  $\mu\text{g/ml}$ :

Bi, Mn, Mo, Nb, Ni, P, Pb, Sb y W

Los valores del LD obtenidos para los 19 elementos traza se ofrecen en la tabla XXVI.

Los LD que figuran en la tabla XXVI, cuando se refieren a las emisiones más sensibles, concuerdan con los manejados por la bibliografía. Este hecho sólo ha servido para comprobar que el espectrómetro se encuentra debidamente ajustado respecto a los sistemas de nebulización, transporte, excitación, óptico y de detección.

Desde una óptica analítica, los LD carecen prácticamente de interés, y lo que verdaderamente adquiere importancia es conocer la CMD de analito. En lo que concierne a este último parámetro se ha tomado como norma para calcularlo el considerarlo como aquella concentración que da lugar a un conjunto de lecturas en el pico de emisión del elemento cuyo valor medio, sumado con el correspondiente a tres veces su desviación

**TABLA XXVI**  
LD ( $2\sigma$ ) de los 19 elementos traza en agua destilada (expresados en  $\mu\text{g/ml}$ .)

Elemento	LD
Ag	0.003
Ba	0.001
Be	0.001
Bi	0.03
Cd	0.004
Co	0.003
Cr	0.005
Cu	0.002
Mn	0.01
Mo	0.01
Nb	0.01
Ni	0.01
P	0.06
Pb	0.025
Sb	0.025
V	0.003
W	0.05
Y	0.002
Zn	0.005

estándar, no se solapa con el obtenido para el blanco en las mismas condiciones. Mediante esta norma de actuar se consigue establecer la CMD con un grado de confianza del 99.7 por 100. Este grado de confianza es válido hasta en los análisis más exigente. Para efectuar el ensayo se ha empleado como blanco el mismo patrón multielemental de componentes mayoritarios que se ha utilizado para corregir el fondo, y como concentración de las soluciones mono-elementales de elementos traza las que figuran en la tabla XXVII. En la selección de las concentraciones expuestas en esta tabla se ha procurado que la señal producida por la solución del analito no difiera de la del blanco en más de un orden de magnitud. Operando de esta forma resulta correcto llevar a cabo extrapolaciones a la hora de establecer la CMD, ya que los comportamientos de la intensidad de emisión y de la  $\sigma$  frente a la concentración, ambos lineales, presentan un paralelismo para un intervalo relativamente estrecho de esta última.

A continuación se exponen los dos casos que se han planteado en el cálculo de la CMD. En el primer caso la concentración dada en la tabla XXVII ha coincidido prácticamente con la CMD, y en el segundo ha habido necesidad de



**TABLA XXVII**  
Concentración de los patrones monoelementales empleados para establecer la CMD

Elemento	Concentración (µg/ml.)
Ag	0.050
Ba	0.025
Be	0.010
Bi	0.5
Cd	0.040
Co	0.025
Cr	0.050
Cu	0.10
Mn	0.05
Mo	0.1
Nb	0.1
Ni	0.2
P	1.0
Pb	0.50
Sb	0.20
V	0.025
W	0.15
Y	0.01
Zn	0.2

realizar un proceso de extrapolación con el fin de calcularla. Para efectuar la extrapolación se ha necesitado el concurso de un segundo patrón con una concentración doble que la del primero.

#### Primer caso. Cálculo de la CMD de Be

Intensidad del patrón de 0.01 µg/ml de Be correspondiente a la media de 10 lecturas=192.4;  $\sigma=1.80$ ;  $3\sigma=540$ . Intensidad del blanco correspondiente a la media de 10 lecturas=177.2;  $\sigma=1.7$ ;  $3\sigma=5.1$ .

Valor máximo que puede alcanzar la intensidad del blanco con un grado de confianza del 99.7 por 100=182.3.

Valor mínimo que puede alcanzar la intensidad del patrón de 0.01 µg/ml. de Be, con un grado de confianza del 99.7 por 100=187.

La proximidad de estos dos valores y el no solapamiento de sus gaussianas permite considerar a 0.01 µg/ml. como la CMD de Be que es ya posible analizar en condiciones reales de trabajo.

Como complemento a lo anterior en la figura 73 se ofrecen ambos perfiles para visualizar de for-

ma gráfica la separación que existe entre las emisiones del patrón y del blanco.

En los espectros de la figura 73 la línea muy intensa situada a la izquierda de la del analito se debe a una emisión del Fe situada a 234.830 nm. Su efecto sobre la emisión del Be será corregido por el procedimiento que se indique en el apartado 5.3.7.

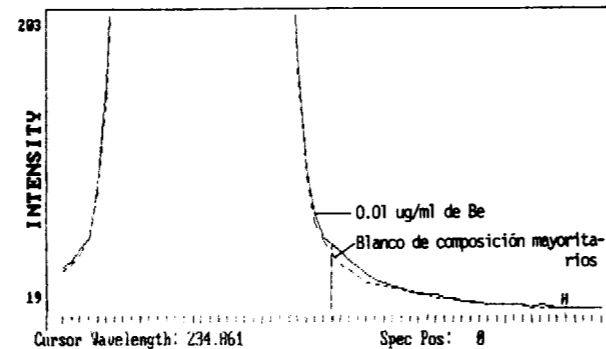


Figura 73.—Perfiles de la solución de 0.01 µg/ml. de Be y del blanco en el entorno de la línea 234.861 nm. de Be.

#### Segundo caso. Cálculo de la CMD de Cr

Intensidad del patrón I de 0.025 µg/ml. de Cr correspondiente a la media de 10 lecturas=45;  $\sigma=2.5$ ;  $3\sigma=7.5$ . Intensidad del patrón II de 0.050 µg/ml. de Cr correspondiente a la media de 10 lecturas=67;  $\sigma=2.3$ ;  $3\sigma=6.9$ . Una concentración de 0.025 µg/ml. de este elemento (concentración del patrón II — concentración del patrón I) produce una intensidad neta de 22.

Intensidad del blanco correspondiente a la media de 10 lecturas=22;  $\sigma=2.5$ ;  $3\sigma=7.5$ .

Valor máximo que puede alcanzar la intensidad del blanco con un grado de confianza de 99.7 por 100=29.5.

Valor mínimo que puede alcanzar la intensidad del patrón I, 0.025 µg/ml., con un grado de confianza del 99.7 por 100=37.5.

A la vista de los datos anteriores, y llevando a cabo la correspondiente extrapolación, resultará que una concentración de 0.020 µg/ml. de Cr producirá una intensidad teórica de 40.6, cuyo valor de  $1-3=33.1$  no se solapará con el del blanco (37.5) y podrá ser considerada como la CMD de este elemento.

**TABLA XXVIII**  
CMD de los elementos traza

Elemento	CMD	
	µg/ml.	ppm
Ag	0.040	4
Ba	0.010	1
Be	0.010	1
Bi	0.20	20
Cd	0.020	2
Co	0.025	2.5
Cr	0.020	2
Cu	0.080	8
Mn	0.050	5
Mo	0.10	10
Nb	0.10	10
Ni	0.10	10
P	1.0	100
Pb	0.20	20
Sb	0.20	20
V	0.025	2.5
W	0.15	15
Y	0.01	1
Zn	0.10	10

Por otro lado, los valores de intensidad correspondientes a los patrones de 0.050 µg/ml. y 0.025 µg/ml. de Cr y sus respectivos indican que, en lo que concierne a precisión a corto plazo de la técnica, una diferencia de 0.025 µg/ml. de Cr < > a 2.5 ppm de Cr en sólido podrá ser perfectamente discriminada con un grado de confianza del 99.7 por 100.

En la figura 74 se contemplan los perfiles experimentales de los patrones I, II y del blanco, y el perfil teórico de la solución correspondiente a la CMD (0.020 µg/ml.).

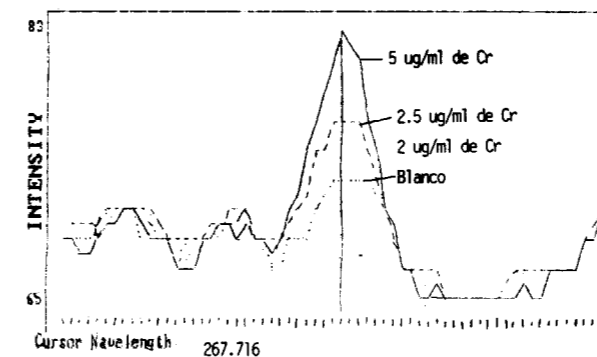


Figura 74.—Perfiles experimentales del blanco y de las soluciones de 5 y 2.5 µg/ml. de Cr y perfil teórico de la solución de 2.0 µg/ml. de Cr en el entorno de la línea situada a 267.716 nm. de este elemento.

Siguiendo la sistemática expuesta se han obtenido la CMD de todos los elementos traza que se pretenden analizar en el PES. En la tabla XXVIII se muestran condensados los resultados obtenidos referidos a solución (µg/ml.) y a muestra sólida (ppm).

Una comparación de resultados entre CMD y LD indica que los primeros superan a los segundos en cuatro veces en el caso del Cr y en cincuenta veces en el caso del Mo. Las mayores diferencias se han dado en aquellos picos que están afectados por fondos más elevados.

Los valores de detectabilidad cuantitativa que figuran en la tabla XXVIII se pueden considerar suficientes para los niveles de concentración que, como mínimo, se tiene previsto cuantificar dentro del PES.

#### 5.3.7. Corrección de interferencias producidas por emisiones de otros elementos

Al desarrollar en el apartado 5.2.4. el estudio de interferencias se comprobó que numerosas emisiones que habían sido seleccionadas para realizar posteriormente las determinaciones cuantitativas, se encontraban interferidas por líneas procedentes de otros elementos. En el mismo apartado se indicaba, a la vista de la magnitud de la interferencia, en qué casos la misma podría ser corregida mediante un tratamiento matemático adecuado.

La necesidad en los análisis multielementales por EPAI de llevar a cabo una etapa de corrección de interferencias espectrales, es la contribución que se debe pagar en aras a la rapidez, por la imposibilidad material de cambiar de línea analítica cuando ésta se encuentra interferida. El empleo en los espectrómetros multicanales de tubos fotomultiplicadores específicos para diversos rangos de longitud de onda, más sensibles que los utilizados en los equipos secuenciales es un arma poderosa a la hora de discriminar intensidades de emisión muy próximas.

Las interferencias interelementales (coincidencia o solapamiento espectral) aparecen, como se ha visto en 5.2.4.2.5, cuando otros elementos también presentes en la muestra emiten radiaciones a longitudes de onda muy próximas a la del analito, contribuyendo a aumentar o disminuir su intensidad de emisión. Cuando esto ocurre, el aumento o disminución de intensidad originado por dichos elementos causará un incremento o decrecimiento aparente en la concentración de analito que deberá ser corregido.

5.3.7.1. Significado de los coeficientes de corrección

El principio de la corrección inter-elemental está basado en la resolución de una serie de ecuaciones lineales del tipo:

$$C_1 = C_{M1} - \sum_{j=1}^n a_{1j} C_j$$

$$C_2 = C_{M2} - \sum_{j=1}^n a_{2j} C_j \quad (j \neq 2) \quad [1]$$

$$C_3 = C_{M3} - \sum_{j=1}^n a_{3j} C_j \quad (j \neq 3)$$

$$C_n = C_{Mn} - \sum_{j=1}^{n-1} a_{nj} C_j$$

En las anteriores expresiones  $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$  son las concentraciones reales que en principio no son conocidas por estar interferidas sus correspondientes emisiones espectrales.  $C_{M1}, C_{M2}, C_{M3}, \dots, C_{Mn}$  son las concentraciones sin corregir que se han obtenido por interpolación en las curvas de calibrado.  $C_j$  es la concentración de interferente. Finalmente,  $a_{ij}$  son los factores que hay que aplicar a las concentraciones sin corregir para transformarlas en las concentraciones reales. Este factor representa una concentración aparente de analito (i) que se corresponde con la señal producida por una solución de 1 mg/l. del interferente, j, medido sobre la emisión del analito. Definidos de esta forma los coeficientes  $a_{ij}$  los términos  $C_{M1}, C_{M2}, C_{M3}, C_{Mn}, \dots$ , de las ecuaciones [1] podrán escribirse de la siguiente manera:

$$C_{M1} = \sum_{j=1}^n a_{1j} C_j$$

$$C_{M2} = \sum_{j=1}^n a_{2j} C_j$$

$$C_{M3} = \sum_{j=1}^n a_{3j} C_j$$

$$C_{Mn} = \sum_{j=1}^n a_{nj} C_j$$

donde los factores  $a_{11}, a_{22}, \dots, a_{nn}$ , por lo expuesto anteriormente, serán igual a la unidad. Las ecuaciones [1] cabe expresarlas matricialmente tomando entonces la siguiente forma:

$$\vec{A} \cdot \vec{c} = \vec{C}_M$$

En esta fórmula:  $\vec{A}$  es una matriz ( $n \times n$ ) de factores de corrección,  $\vec{c}$  es un vector ( $n \times 1$ ) de concentraciones desconocidas (reales) y  $\vec{C}_M$  es un vector de concentraciones conocidas.

5.3.7.2. Determinación experimental de los coeficientes de corrección

La determinación experimental de estos coeficientes es el último estadio de un proceso que comienza con la constatación teórica y experimental de la interferencia, continúa con la comprobación del comportamiento lineal de la emisión interferente frente a la concentración, y finaliza con el cálculo de dichos coeficientes.

Para determinarlos, se nebuliza en el plasma una solución de 2 a 1000  $\mu\text{g/ml}$ . del elemento interferente que no se encuentre impurificada por el analito, y se lee la concentración aparente de este último que produce el equipo en el canal correspondiente. El coeficiente  $a_{ij}$  viene dado por la relación:

$$a_{ij} = \frac{\text{concentración aparente del analito}}{\text{concentración conocida del interferente}}$$

El valor de  $a_{ij}$  se introduce en la memoria del ordenador una vez calculados los correspondientes a todas las interferencias interelementales se les aplica la fórmula [1].

En la tabla XXIX se exponen la totalidad de los coeficientes de corrección obtenidos por el procedimiento descrito con anterioridad y que han sido necesarios para el desarrollo de este trabajo.

TABLA XXIX  
Coeficientes de corrección interelementales

Linea analítica (nm.)	Elemento interferente	Coefficiente
Ag I : 328.068	Ti	0.00004
	V	-0.0003
	Y	-0.0075
Be I : 234.861	Fe	0.00016
	Fe	0.00007
Bi I : 223.061	Ti	0.0
	Cu	-0.1
	V	-0.0013
	Nb	0.0017
	Fe	0.00001
Cd I : 228.802	Fe	0.00001
Co II : 228.616	Ti	0.0015
Cr II : 267.716	V	0.0005
Cu I : 324.754	Ti	0.00012
	Nb	0.0010
Mn II : 294.920	Fe	0.00018
Mo II : 202.030	Fe	-0.00010
	Fe	-0.00003
Nb II : 309.418	Al	0.00025
	V	0.096
	Fe	0.0006
P I : 214.914	Al	0.0014
	Cu	-0.17
	Nb	-0.0190
Pb II : 220.353	Fe	0.00018
	Al	0.00064
	Ti	0.00030
Sb I : 217.582	Nb	0.12
	Al	0.0002
	Ni	0.0008
	V	0.0010

muy superior a la intensidad de emisión del analito, en la longitud de onda de trabajo, al nivel de concentración en que ambos elementos se encuentran presentes en la solución.

En la figura 75 puede comprobarse visualmente ambas circunstancias en el caso concreto de la interferencia del Cu sobre el P.

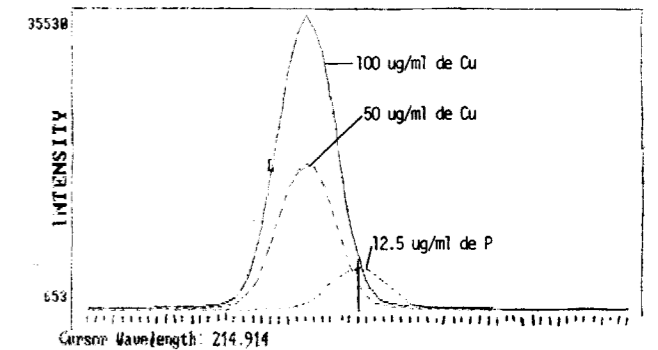


Figura 75.—Perfiles correspondientes a 12.5  $\mu\text{g/ml}$ . de P; 100  $\mu\text{g/ml}$ . de Cu, y 50  $\mu\text{g/ml}$ . de Cu en el entorno de la emisión 214.914 nm. de P.

A continuación, y a título de ejemplo, se detalla el cálculo de los coeficientes de corrección para las interferencias correspondientes a las emisiones:

- : 309.420 nm. del V II sobre
- : 309.418 nm. del Nb II
- : 220.463 nm. del Al I sobre
- : 220.353 nm. del Pb II
- : 214.897 nm. del Cu II sobre
- : 214.914 nm. del P I

a) V sobre Nb. Por los valores de ambas longitudes de onda se trata de un solapamiento prácticamente total, como se contempla en la figura 76.

Concentración de las soluciones preparadas

- 2.5  $\mu\text{g/ml}$ . de Nb
- 2.5  $\mu\text{g/ml}$ . de V
- 5  $\mu\text{g/ml}$ . de V

Los datos aportados por la tabla XXIX indican que determinados elementos presentan coeficientes de corrección negativos. El valor negativo de dichos coeficientes tiene lugar cuando concurren dos hechos simultáneamente:

- 1.º La emisión interferente es muy intensa y produce un fuerte solapamiento con la del analito.
- 2.º La intensidad de fondo correspondiente al interferente, en su posición de medida, es

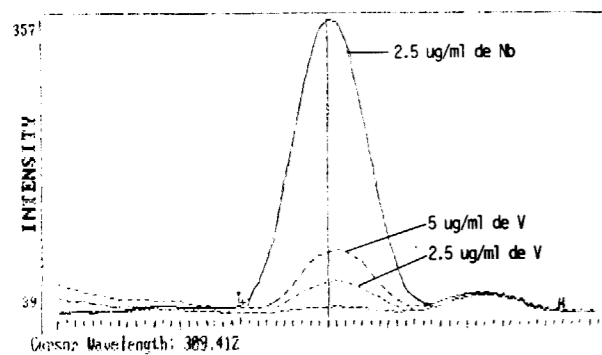


Figura 76.—Perfiles correspondientes a 2.5 µg/ml. de Nb; 2.5 µg/ml. de V, y 5 µg/ml. de V en el entorno de la línea 309.412 nm. de Nb.

#### Intensidad de fondos espectrales

Como se indicó en el apartado 5.3.4., para la corrección del fondo de este elemento se han tomado dos puntos a izquierda (L) y a derecha (H) de su emisión en las posiciones marcadas en la figura 76.

Solución de 2.5 µg/ml. de Nb:

Fondo izquierda=49  
Fondo derecha =41

Solución de 5 µg/ml. de V:

Fondo izquierda=45  
Fondo derecha =43

Solución de 2.5 µg/ml. de V:

Fondo izquierda=41  
Fondo derecha =41

#### Intensidad de pico

$I_{\text{Neta}}$  de la solución de 2.5 µg/ml. de Nb=369  
 $-49 + 41/2 = 324$

$I_{\text{Neta}}$  de la solución de 5 µg/ml. de V = 105  
 $-43 + 45/2 = 61$

$I_{\text{Neta}}$  de la solución de 2.5 µg/ml. de V = 73  
 $-41 + 41/2 = 32$

Los valores de intensidad en función de la concentración de las dos soluciones interferentes se comportan linealmente y, por tanto, tendrá plena validez el coeficiente de corrección que se calcule a partir de cualquiera de ellos.

A continuación se establece la correspondencia que existe en Nb de la solución de 5 µg/ml. de V:

$$\frac{2.5 \times 61}{324} = 0.48 \text{ µg/ml. de Nb}$$

Refiriendo el dato anterior a muestra sólida (1 g. de material después de puesto en solución es aforado a 100 ml.), se tendrá:

$$500 \text{ ppm de V} < > 48 \text{ ppm de Nb}$$

$$a_{ij} = \frac{48}{500} = 0.096$$

$a_{ij}$  (0.096), multiplicado por la concentración de vanadio en la muestra, será la concentración de Nb que habrá que restar de la proporcionada por el calibrado para el análisis de este elemento.

b) *Al sobre Pb.* Se trata de una línea muy intensa de Al relativamente alejada de la del analito que da lugar a una interferencia semejante a la producida por las bandas espectrales. En la figura 77 puede observarse la citada interferencia.

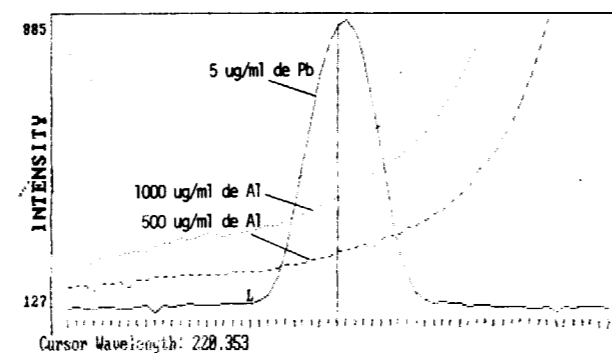


Figura 77.—Perfiles correspondientes a 5 µg/ml. de Pb; 500 µg/ml. de Al, y 1.000 µg/ml. de Al en el entorno de la línea 220.353 nm. de Pb.

#### Concentración de las soluciones preparadas

5 µg/ml. de Pb  
500 µg/ml. de Al  
1000 µg/ml. de Al

#### Intensidades de fondos espectrales

Medidas en la posición L=10 a la izquierda de la emisión del analito:

Solución de 5 µg/ml. de Pb:

Fondo=151

Solución de 1000 µg/ml. de Al:

Fondo=335

Solución de 500 µg/ml. de Al:

Fondo=231

$I_{\text{Neta}}$  de la solución de 5 µg/ml de Pb=  
 $=871-151=720$

$I_{\text{Neta}}$  de la solución de 1000 µg/ml. de Al =  
 $=425-335=90$

$I_{\text{Neta}}$  de la solución de 500 µg/ml. de Al =  
 $=283-231=52$

Los valores que representan la variación de la intensidad en función de la concentración de las dos soluciones interferentes se apartan sustancialmente de la linealidad. Por este motivo la aplicación posterior del coeficiente de corrección obtenido a partir de sus datos, que no coincidirá, habrá que tomarla con cautela. Este comportamiento suele producirse cuando de interferencia producida por bandas espectrales se trata.

Para el cálculo del coeficiente se ha tomado el dato proporcionado por la solución de 1000 µg/ml. de Al.

Correspondencia en Pb de la solución de 1000 µg/ml. de Al=  
 $\frac{90 \times 5}{720} = 0.64 \text{ µg/ml. de Pb.}$

Refiriendo el dato anterior a muestra sólida:

$$100.000 \text{ ppm de Al} < > 64 \text{ ppm de Pb}$$

$$a_{ij} = \frac{64}{100.000} = 0.00064$$

c) *Cu sobre P.* Se trata de la interferencia representada en la figura 75 y que da lugar a la consecución de un coeficiente de corrección negativo.

#### Concentración de las soluciones preparadas

12.5 µg/ml. de P  
100 µg/ml. de Cu  
50 µg/ml. de Cu

#### Intensidad de fondos espectrales

Medidas en la posición L=10 a la izquierda de la emisión del analito:

Solución de 12.5 µg/ml de P:

Fondo= 571

Solución de 100 µg/ml. de Cu:

Fondo=13.531

Solución de 50 µg/ml. de Cu:

Fondo= 7.031

$I_{\text{Neta}}$  de la solución de 12.5 µg/ml. de P =  
 $=4.897-571=4.326$

$I_{\text{Neta}}$  de la solución de 100 µg/ml. de Cu=  
 $=7.614-13.531=-5.917$

$I_{\text{Neta}}$  de la solución de 50 µg/ml. de Cu=  
 $=4.083-7.031=-2.948$

Los valores de la intensidad en función de la concentración para las dos soluciones interferentes se comportan de forma lineal.

Para el cálculo del coeficiente se ha tomado el dato proporcionado por la solución de 50 µg/ml. de Cu.

Correspondencia en P de la solución de 50 µg/ml. de

$$\text{Cu} = \frac{12.5 \times (-2.948)}{4.326} = -8.52 \text{ µg/ml.}$$

Refiriendo el dato precedente a muestra sólida se tendrá:

$$5.000 \text{ ppm de Cu} < > -852 \text{ ppm de P}$$

$$a_{ij} = \frac{-852}{5.000} = -0.17$$

La constancia con el tiempo de los coeficientes  $a_{ij}$  está íntimamente ligada a que la intensidad del interferente se comporte de forma lineal frente a la concentración. Desviaciones de esta linealidad traen como consecuencia que los coeficientes tengan que ser recalculados en cada jornada de trabajo.

#### 5.3.8. Análisis de muestras patrón

Como última etapa en la ejecución de esta me-

moria, en el presente apartado se ha procedido a llevar a cabo el análisis multielemental simultáneo por EPAI de cuatro muestras que tienen la consideración de estándar (dos suelos, un sedimento fluvial y un basalto). La composición certificada de las mismas y otras características concernientes a su origen, preparación y análisis se ofrecen en las tablas XXX, XXXI y XXXII.

**TABLA XXX**  
**Análisis certificados y características de las muestras de suelo**

Los valores que aparecen lo son con un grado de confianza de  $\pm 95$  por 100

Muestra de suelo SO-1		
Si	25.72	$\pm 0.22$ %
Al	9.38	$\pm 0.17$ %
Fe	6.00	$\pm 0.13$ %
K	2.68	$\pm 0.08$ %
Mg	2.31	$\pm 0.11$ %
Na	1.97	$\pm 0.08$ %
Ca	1.80	$\pm 0.07$ %
Ti	0.53	$\pm 0.02$ %
C	0.27	$\pm 0.003$ %
P	0.062	$\pm 0.01$ %
Ba	879	$\pm 47$ ppm
Sr	328	$\pm 29$ ppm
Cr	160	$\pm 15$ ppm
Zn	146	$\pm 5$ ppm
V	139	$\pm 8$ ppm
Rb	139	$\pm 12$ ppm
Ni	94	$\pm 7$ ppm
Cu	61	$\pm 3$ ppm
Co	32	$\pm 3$ ppm
Pb	139	$\pm 4$ ppm
Hg	0.022	$\pm 0.003$ ppm

Muestra de suelo SO-2		
Si	24.99	$\pm 0.23$ %
Al	8.07	$\pm 0.18$ %
Fe	5.56	$\pm 0.16$ %
K	2.45	$\pm 0.08$ %
Ca	1.96	$\pm 0.10$ %
Na	1.90	$\pm 0.05$ %
Ti	0.86	$\pm 0.02$ %
Mg	0.54	$\pm 0.03$ %
P	0.30	$\pm 0.02$ %
Mn	0.072	$\pm 0.002$ %
Ba	966	$\pm 67$ ppm
Sr	340	$\pm 50$ ppm
Zn	124	$\pm 5$ ppm
Rb	78	$\pm 6$ ppm
V	64	$\pm 10$ ppm
Pb	21	$\pm 4$ ppm
Cr	16	$\pm 2$ ppm

Co	9	$\pm 2$ ppm
Ni	8	$\pm 2$ ppm
Cu	7	$\pm 1$ ppm
Hg	0.082	$\pm 0.009$ ppm

*Procedencia:* SO-1) Hull (Canadá). SO-2) Bosque de Montmorency en Quebec (Canadá).

*Organismo que extiende el certificado:* Centro de Energía, Minas y Recursos de Canadá.

*Preparación:* La fracción de grava molturada hasta un tamaño por debajo de 70  $\mu\text{m}$ . fue mezclada y homogeneizada con la fracción de arcilla (<2  $\mu\text{m}$ .) para reproducir el todo-uno.

*Técnicas analíticas empleadas:* AALL, AAEL, FRX, ANN, Espectrofotometría y Volumetría.

*Laboratorios que han intervenido en los análisis:* De 9 a 29, según los constituyentes.

**TABLA XXXI**  
**Análisis certificado y características del sedimento fluvial - 2707**

Los valores que aparecen lo son con un grado de confianza de  $\pm 95$  por 100

Al	6.11	$\pm 0.16$ %
Ca	2.60	$\pm 0.03$ %
C	3.348	$\pm 0.016$ %
Fe	4.11	$\pm 0.10$ %
Mg	1.20	$\pm 0.02$ %
P	0.0998	$\pm 0.0028$ %
K	2.00	$\pm 0.04$ %
Si	29.08	$\pm 0.13$ %
Na	0.547	$\pm 0.014$ %
Ti	0.457	$\pm 0.018$ %
Sb	3.79	$\pm 0.15$ ppm
As	23.4	$\pm 0.8$ ppm
Ba	414	$\pm 12$ ppm
Cd	3.45	$\pm 0.22$ ppm
Cr	135	$\pm 5$ ppm
Co	14.0	$\pm 0.6$ ppm
Cu	98.6	$\pm 5.0$ ppm
Pb	161	$\pm 17$ ppm
Mn	555	$\pm 19$ ppm
Hg	1.44	$\pm 0.07$ ppm
Ni	44.1	$\pm 3.0$ ppm
Tl	1.2	$\pm 0.2$ ppm
U	3.13	$\pm 0.13$ ppm
V	95	$\pm 4$ ppm
Zn	438	$\pm 12$ ppm

*Procedencia:* Río Búfalo (USA).

*Organismo que extiende el certificado:* NBS.

*Preparación:* De los 908 Kg. de sedimento de río recogidos se separa por tamizado la fracción comprendida entre 38 y 150  $\mu\text{m}$ ., que es la que se corresponde con la muestra estándar.

*Técnicas analíticas empleadas:* Dos o más sin especificar.

**TABLA XXXII**  
**Análisis certificado y características del basalto —BM—**

Los valores que aparecen lo son con un grado de confianza de  $\pm 95$  por 100

SiO <sub>2</sub>	49.51	$\pm 0.19$ %
TiO <sub>2</sub>	1.14	$\pm 0.06$ %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.25	$\pm 0.31$ %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.67	$\pm 0.14$ %
MnO	0.140	$\pm 0.005$ %
MgO	7.47	$\pm 0.16$ %
CaO	6.47	$\pm 0.19$ %
Na <sub>2</sub> O	4.65	$\pm 0.18$ %
K <sub>2</sub> O	0.20	$\pm 0.01$ %
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.106	$\pm 0.01$ %
CO <sub>2</sub>	1.35	$\pm 0.03$ %

W	0.9	$\pm 0.18$ ppm
Zn	120	$\pm 6.6$ ppm
As	13	$\pm 1.2$ ppm
Ba	250	$\pm 10$ ppm
Be	1.3	$\pm 0.15$ ppm
Co	36	$\pm 2.9$ ppm
Cr	121	$\pm 5.5$ ppm
Cu	43	$\pm 2.5$ ppm
Ni	57	$\pm 3.4$ ppm
Pb	13	$\pm 2.0$ ppm
Sb	2.3	$\pm 0.45$ ppm
Sn	2.0	$\pm 0.23$ ppm
V	190	$\pm 14$ ppm
Y	27	$\pm 3.3$ ppm

*Procedencia:* Cantera de Mellenbach en Shul (Alemania Oriental).

*Organismo que extiende el certificado:* Instituto Geológico Central de Berlín.

*Preparación:* Parten de 1 tonelada de material que trituran primeramente en una quebrantadora de mandíbulas hasta < 20 mm. y, a continuación, en un molino de cilindros de acero hasta < 2 mm. Una muestra representativa de 200 Kg. del producto anterior la molturan en un molino de bolas hasta una granulometría inferior a 90  $\mu\text{m}$ .

*Técnicas analíticas empleadas:* AALL, FRX, ANN, Fotometría de llama, Espectrometría de emisión óptica, Gravitimetría y Volumetría.

*Laboratorios que han intervenido en los análisis:* De 9 a 52, según los constituyentes.

Los elementos cuyo porcentaje está certificado, ni coinciden en los diferentes materiales, ni alcanzan la totalidad de los que se pretenden analizar en el PES. Los datos más completos son los correspondientes al basalto.

Aunque en las cuatro muestras se han analizado

todos los elementos, para los que previamente se había realizado el estudio de corrección de fondos e interferencias espectrales en diversas partes de esta memoria, solamente podrá conocerse la exactitud de aquellos resultados que pueden ser comparados con los certificados. Para el resto de los datos analíticos el estudio habrá que circunscribirlo a evaluar la precisión con que se han obtenido los mismos.

A continuación se describe la sistemática seguida en la ejecución de los análisis.

#### 5.3.8.1. Preparación de las muestras

Por tratarse de muestras estándar ya vienen preparadas para el análisis a falta de ser secadas a 110° C hasta peso constante. En el caso de otros materiales que lleguen al laboratorio y que no tengan este carácter será preciso comprobar su granulometría y molturarlos, si es necesario, hasta conseguir un tamaño de partícula inferior a los 100  $\mu\text{m}$ .

Cinco tomas de muestras por estándar se han efectuado para establecer con posterioridad una estadística de resultados.

#### 5.3.8.2. Puesta en solución

Como se ha indicado en el estudio bibliográfico (apartado 3.3.1.3), el ataque con la mezcla ácida HF+HNO<sub>3</sub>+HClO<sub>4</sub> ha sido la vía seguida para la puesta en solución de estos materiales. Proporcióna este ataque una serie de ventajas en el análisis geoquímico, entre las que cabe destacar:

- Gran versatilidad en su campo de aplicación. Prácticamente todos los materiales son puestos cuantitativamente en solución, salvo la casiterita, la wolframita y ciertas oromitas que lo son parcialmente.
- Cantidades moderadas de materia orgánica pueden ser eliminadas si se tiene la precaución de comenzar el ataque con la mezcla HF+HNO<sub>3</sub> y posteriormente adicionar el HClO<sub>4</sub>.
- El factor de dilución (50-100), que se llega a alcanzar, permite determinar más de 30 elementos a nivel de su fondo geoquímico (contenido medio en la corteza terrestre).

- Los tres ácidos están prácticamente libres de impurezas.
- La matriz originada por los reactivos no afecta a los análisis al no dar lugar a fondos apreciables en el ultravioleta.
- El contenido salino presente en las soluciones no origina problemas de nebulización y transporte en EPAI.

La misión del ácido perclórico durante el ataque es doble: Por un lado, y como se ha indicado anteriormente, actúa como un fuerte oxidante destruyendo la materia orgánica; por otro lado, y debido a su mayor punto de ebullición dentro de los tres componentes de la mezcla, desplaza al ácido fluorhídrico una vez finalizado el ataque y elimina el flúor de los posibles fluoruros insolubles existentes en el residuo. En este sentido es importante su contribución a descomponer el  $CaF_2$ , ya que el citado componente puede incorporar una proporción considerable del plomo que esté presente en la muestra, trayéndolo de la solución.

Las sales perclóricas que se forman durante el proceso son todas muy solubles, excepción hecha del  $KClO_4$ , que presenta una solubilidad en medio acuoso a 0° C de 7.5 g/l. Sin embargo, el nivel de K en las muestras no es lo suficientemente elevado para que tenga lugar la precipitación de la sal, y el potasio también permanecerá en la solución.

**Procedimiento**

Se pesa 1.0000 g. de muestra y se introduce en un reactor abierto de teflón que tiene forma cilíndrica y unas dimensiones de 5.7 cm. de diámetro y 6.8 cm. de altura. El material se humedece con unas gotas de agua destilada y sobre él se agregan 5 ml. de  $HNO_3$  concentrado ( $d = 1.413$  g/ml.) y 5 ml. de  $HClO_4$  concentrado ( $d = 1.67$  g/ml.). La mezcla se agita suavemente, teniendo cuidado que no rebose la excesiva efervescencia que se producirá en el caso de una presencia abundante de carbonatos. A continuación se agregan 10 ml. de HF concentrado ( $d = 1.155$ ). En el supuesto de existencia de materia orgánica, el orden de adición de los ácidos HF y  $HClO_4$  se invertirá. Agregada la mezcla ácida, el reactor se coloca en un baño de arena o placa calefactora a una temperatura que no so-

brepase los 180° C. Temperaturas superiores deformarán el reactor y producirán una rápida vaporización de la mezcla ácida antes de conseguir el ataque completo de la muestra. La calefacción se mantiene hasta llevar el conjunto a sequedad. Una sobrecalentación dificultará la posterior etapa. Una vez obtenido el residuo, éste se disuelve con 10 ml. de HCl 1:1 en caliente y la solución se afora a 100 ml.

Mediante el procedimiento descrito se ha conseguido la disolución completa de las cuatro muestras estándar ensayadas.

La forma abierta del reactor, la naturaleza de los reactivos y la temperatura de ataque son causa de que elementos tales como Si, B y As se volatilicen (los dos últimos parcialmente), y que otros como el Sn se insolubilicen. Por este motivo, y aunque se trate de elementos comprendidos en el PES, la determinación de los mismos no se ha incluido en esta memoria.

**5.3.8.3. Metodología en EPAI**

Respecto a las condiciones de trabajo en el espectrómetro, se han fijado las que figuran expuestas en la tabla XXXIII. De dichas condiciones las correspondientes a potencia del generador, altura de observación y flujo de Ar de nebulización, ya fueron establecidas en el apartado 5.3.3. al abordar la optimización de los parámetros instrumentales.

En lo que concierne a corrección de fondos, calibrado de los diferentes elementos y corrección de interferencias espectrales, se han seguido los procedimientos preconizados en los apartados 5.3.4., 5.3.5. y 5.3.7., respectivamente.

**TABLA XXXIII**  
**Condiciones experimentales en el espectrómetro**

Flujo del Ar generador del plasma	17	l/min.
Flujo del Ar de nebulización	0.75	l/min.
Flujo del H <sub>2</sub> O de refrigeración	130	ml/min.
Flujo de aspiración de la muestra a través de la bomba peristáltica Gilson.	2	ml/min.
Potencia del generador	1100	w
Número de integraciones por elemento.	5	
Tiempo de cada integración	10	sg.

**5.3.8.4. Resultados**

El análisis por quintuplicado de cada uno de los cuatro estándar ha permitido realizar un estudio estadístico de resultados. En la tabla XXXIV se recogen los obtenidos en el ensayo de precisión a corto plazo de tiempo. El CV que se ofrece en dicha tabla corresponde a cinco lecturas consecutivas e integradas de los distintos elementos

analizados simultáneamente en la misma solución.

CV negativos se dan cuando la desviación estándar absoluta ( $\sigma$ ), que aparece en la fórmula de la desviación estándar relativa, adquiere un valor afectado de este signo (intensidad de pico del analito inferior a la intensidad de fondo).

**TABLA XXXIV**  
**Estudio de la precisión a corto plazo de tiempo**

Elemento	$CV = \frac{100 \sigma}{x}$			
	Suelo SO-1 %	Suelo SO-2 %	Sedimento 2704 %	Basalto BM %
Al	0.73	0.38	0.78	0.84
Ca	0.73	0.34	0.76	0.83
Fe	0.78	0.35	0.71	0.52
K	0.73	0.39	0.76	0.54
Mg	0.68	0.38	0.75	0.52
Na	0.69	0.43	0.64	0.89
Ti	0.70	0.41	0.59	0.79
Ag **	-31.9*	382	30	-14*
Ba	0.81	0.45	0.68	0.51
Be **	2.72	2.24	2.41	6.36
Bi **	-62*	203*	-48*	70
Cd **	80	51	17	34*
Co	0.88	1.65	1.04	0.76
Cr	0.74	1.18	0.56	0.57
Cu	0.75	3.16	0.81	0.53
Mn	0.78	0.42	0.58	0.47
Mo **	-16*	-21*	-10*	-16*
Nb **	5.35	1.26	2.22	15
Ni	0.86	0.94	0.77	0.72
P	0.72	0.54	0.62	1.72
Pb	4.55	12.4	1.04	11.1
Sb **	40	25	11.3	23
V	0.69	0.35	0.62	0.51
W **	-84*	-49*	23	-32*
Y **	1.39	0.84	0.73	0.83
Zn	2.40	1.76	0.60	1.63

\* Valor de CV correspondiente a una  $\sigma$  negativa.  
\*\* Elemento cuya concentración no está certificada.

CV elevados tienen lugar si la concentración del elemento en la muestra está próxima o por debajo de su CMD. Por ejemplo, en el caso del Pb puede comprobarse este comportamiento al tratarse de un elemento cuya concentración se encuentra certificada en las cuatro muestras

	Pb (ppm)	CV	CMD
SO-1	139	4.55	
SO-2	21	12.4	20
2704	161	1.04	
BM	13	11.1	

Los datos precedentes confirman que el contenido de Pb en el suelo SO-2 y en el basalto BM,



por estar próximo a la CMD (tabla XXVIII), proporciona valores excesivamente altos de la desviación estándar relativa. En el caso de la Ag, Bi, Cd, Mo, Nb, Sb y W, aunque su concentración no aparece certificada, el nivel de sus respectivos CV indica que el porcentaje de estos elementos en la mayoría de las muestras se halla cercano o está por debajo del fijado por el citado parámetro. Este extremo se ha podido confirmar al cotejar los resultados obtenidos en los análisis con los CMD expuestos en la tabla XXVIII. En la tabla XXXV se ofrece el resultado de dicha comparación.

Los valores que se contemplan en esta tabla se corresponden exclusivamente con las tomas de muestras en las que se ha realizado el ensayo de determinación de la precisión a corto plazo de tiempo.

Para el resto de los elementos los resultados de este ensayo se pueden considerar satisfactorios.

A continuación, en las tablas XXXVI, XXXVII, XXXVIII y XXXIX se contemplan los resultados conseguidos para los cuatro materiales estándar

**TABLA XXXV**  
Comparación de los datos analíticos obtenidos de: Ag, Bi, Cd, Mo, Nb, Sb y W con sus respectivas CMD

Elemento	Concentración calculada (ppm)	CMD
Ag	Entre 0 y 0.35	4
Bi	Entre 0 y 0.89	20
Cd	Entre 0 y 2.47	2
Mo	0	10
Nb	Entre 2.17 y 21.9	10
Sb	Entre 4.47 y 9.76	20
W	Entre 0 y 4.96	15

al establecer la exactitud y la precisión del método. Los valores que figuran en las citadas tablas son valores medios de cinco ataques independientes realizados y medidos en el mismo día.

Al presentar los datos se han omitido los de aquellos elementos que se encuentran ostensiblemente por debajo de la CMD expuesta en la tabla XXVIII.

**TABLA XXXVI**  
Estudio de la exactitud y de la precisión del método para el suelo SO-1

Elemento	Concentración certificada	Concentración encontrada	Desviación	CV corresp. a 5 ataques (%)
Al	9.38 %	9.02 ± 0.34 %	-0.36	1.90
Ca	1.80 %	1.75 ± 0.09 %	-0.05	2.40
Fe	6.00 %	6.12 ± 0.25 %	+0.12	2.04
K	2.68 %	2.48 ± 0.14 %	-0.20	2.75
Mg	2.31 %	2.32 ± 0.12 %	+0.01	2.66
Na	1.97 %	1.90 ± 0.09 %	-0.07	2.33
Ti	0.53 %	0.52 ± 0.04 %	-0.01	3.67
Mn	0.089 %	0.085 ± 0.007 %	-0.004	4.39
P	0.063 %	0.063 ± 0.008 %	+0.001	6.29
Ba	879 ppm	847 ± 38 ppm	-32	2.25
Be*		2.0 ± 0.4 ppm		8.79
Co	32 ppm	27 ± 2 ppm	-5	3.49
Cr	160 ppm	1.60 ± 14 ppm	0	4.35
Cu	61 ppm	56 ± 4 ppm	-5	3.40
Nb*		11 ± 3 ppm		12.3
Ni	94 ppm	80 ± 7 ppm	-14	4.32
Pb	139 ppm	149 ± 16 ppm	+10	5.60
V	139 ppm	124 ± 7 ppm	-15	2.80
Y*		23 ± 2 ppm		4.39
Zn	146 ppm	131 ± 5 ppm	-15	2.03

\* Elemento analizado cuya concentración no se encuentra certificada.

**TABLA XXXVII**  
Estudio de la exactitud y de la precisión del método para el suelo SO-2

Elemento	Concentración certificada	Concentración encontrada	Desviación	CV corresp. a 5 ataques (%)
Al	8.07 %	8.20 ± 0.27 %	+0.13	1.66
Ca	1.96 %	1.88 ± 0.07 %	-0.08	1.89
Fe	5.56 %	5.72 ± 0.24 %	+0.16	2.15
K	2.45 %	2.35 ± 0.12 %	-0.10	2.54
Mg	0.54 %	0.54 ± 0.03 %	0	2.43
Na	1.90 %	1.79 ± 0.08 %	-0.11	2.31
Ti	0.86 %	0.85 ± 0.04 %	-0.01	2.23
Mn	0.072 %	0.071 ± 0.008 %	-0.001	5.41
P	0.302 %	0.31 ± 0.02 %	+0.1	3.81
Ba	966 ppm	1010 ± 38 ppm	+44	1.90
Be*		2.2 ± 0.4 ppm		10.2
Co	9 ppm	8 ± 1 ppm	-1	7.20
Cr	16 ppm	13 ± 2 ppm	-3	8.72
Cu	7 ppm	4 ± 2 ppm	-3	2.61
Nb*		22 ± 4 ppm		8.13
Ni**	8 ppm	6 ± 2 ppm	-2	14.3
Pb	21 ppm	24 ± 5 ppm	+3	10.85
V	64 ppm	58 ± 7 ppm	-6	5.81
Y*		41 ± 3 ppm		4.10
Zn	124 ppm	110 ± 7 ppm	-14	3.13

\* Elemento analizado cuya concentración no se encuentra certificada.

\*\* Elemento cuya concentración es ligeramente inferior a la CMD.

**TABLA XXXVIII**  
Estudio de la exactitud y de la precisión del método para el sedimento fluvial - 2707

Elemento	Concentración certificada	Concentración encontrada	Desviación	CV corresp. a 5 ataques (%)
Al	6.11 %	6.03 ± 0.27 %	-0.08	2.21
Ca	2.60 %	2.74 ± 0.11 %	+0.14	1.94
Fe	4.11 %	4.31 ± 0.19 %	+0.20	2.36
K	2.00 %	1.99 ± 0.12 %	-0.01	3.13
Mg	1.20 %	1.21 ± 0.05 %	+0.01	1.88
Na	0.55 %	0.57 ± 0.03 %	+0.02	2.69
Ti	0.46 %	0.40 ± 0.02 %	-0.06	2.71
Mn	0.055 %	0.057 ± 0.007 %	+0.002	6.43
P	0.10 %	0.094 ± 0.008 %	-0.006	4.36
Ba	414 ppm	4.09 ± 20 ppm	-5	2.40
Be*		2.1 ± 0.3 ppm		7.30
Co	14 ppm	13 ± 1 ppm	-1	4.48
Cr	135 ppm	124 ± 6 ppm	-11	2.42
Nb*		10 ± 2 ppm		11.7
Ni	44 ppm	41 ± 4 ppm	-3	4.45
Pb	161 ppm	153 ± 13 ppm	-8	4.12
V	95 ppm	90 ± 6 ppm	-5	3.46
Y*		22 ± 2 ppm		3.50
Zn	438 ppm	409 ± 15 ppm	-29	1.79

\* Elemento analizado cuya concentración no se encuentra certificada.

**TABLA XXXIX**  
**Estudio de la exactitud y de la precisión del**  
**método para el basalto —BM—**

Elemento	Concentración certificada (a)	Concentración encontrada	Desviación	CV corresp. a 5 ataques (%)
Al	8.60 %	8.46 ± 0.29 %	-0.14	1.69
Ca	4.62 %	4.62 ± 0.14 %	0	1.48
Fe	6.76 %	6.93 ± 0.21 %	+0.17	1.50
K	0.17 %	0.14 ± 0.02 %	-0.03	7.62
Mg	4.51 %	4.64 ± 0.13 %	+0.13	1.41
Na	3.45 %	3.56 ± 0.12 %	+0.11	1.70
Ti	0.68 %	0.67 ± 0.04 %	-0.01	2.93
Mn	0.11 %	0.11 ± 0.01 %	0	4.34
P	0.046%	0.045 ± 0.007%	-0.001	7.56
Ba	250 ppm	244 ± 14 ppm	-6	2.95
Be	1.3 ppm	1.0 ± 0.2 ppm	-0.3	8.55
Co	36 ppm	36 ± 2 ppm	0	2.59
Cr	121 ppm	120 ± 6 ppm	-1	2.45
Cu	43 ppm	37 ± 3 ppm	-6	3.93
Ni	57 ppm	55 ± 4 ppm	-2	3.60
V	190 ppm	193 ± 13 ppm	+3	3.24
Y	120 ppm	26 ± 2 ppm	-1	4.16
		110 ± 6 ppm	-10	2.81

(a) Los datos que aparecen en esta columna expresados como elemento son los que se mostraban en la tabla XXXII puestos como óxidos.

Los valores de concentración encontrados que figuran en las tablas anteriores, y que poseen también un grado de confianza de  $\pm 95$  por 100 ( $2\sigma$ ) para las cinco tomas de muestra son, en general, concordantes en precisión y exactitud con los ofrecidos en los análisis certificados.

Respecto a componentes mayoritarios, la precisión de los análisis certificados supera ligeramente a la conseguida por EPAI por dos motivos fundamentales:

- Mayor número de determinaciones por elemento, que hace más fiable la estadística de resultados.
- Empleo de varias técnicas utilizando la más adecuada para cada elemento en particular.

El uso de un patrón interno en EPAI hubiera mejorado la precisión de los resultados de estos componentes, incluso hubiera superado a la de los certificados.

En lo que concierne a los elementos traza, se observan precisiones similares a las certificadas y resultados experimentales ligeramente inferiores para prácticamente todos los elementos, y en todas las muestras, salvo el Ba en el suelo SO-2, el V en el basalto B-M y el Pb en ambos suelos. El anterior detrimento en la concentración de elementos trazas, que por otra parte no debe considerarse como significativo, hace pensar que se haya producido una volatilización parcial de los mismos durante el proceso de ataque. Esta circunstancia no ha sido motivo de comprobación por salirse fuera del objetivo de la presente memoria, que considera los resultados obtenidos como suficientemente fiables.

Con este apartado se finaliza el estudio desarrollado para establecer una sistemática por EPAI multicanal que permita el análisis multielemental simultáneo de rocas, suelos y sedimentos, materiales que, como se indicó en el objetivo de esta investigación, son considerados como fundamentales y mayoritarios dentro del PES.

## REFERENCIAS

- BOUMANS, P. W. J. M., y DE BOER, F. J. (1977): *An experimental study of a 1-Kw, 50 MHz RF inductively coupled plasma with pneumatic nebulizer*. Spectrochimica Acta, vol., 32B, 365-395.
- BLADES, M. W., y HORLICK, G. (1981): *Interference from easily ionizable element matrices in inductively coupled plasma emission spectrometry — a spatial study*. Spectrochimica Acta, vol. 36B, 881-900.
- LABARROUE, G. (1987): *Documents du B. R. G. M., núm. 71*.
- Nomenclature, symbols, units and their usage in spectrochemical analysis*. Spectrochimica Acta, B, 1978, 33B, 242.
- KAISER, H. (1969): *Two Papers on the Limit of Detection of a Complete Analytical Procedure*. Hafner: New York.
- BOUMANS, P. W. J. M., y DE BOER, F. J.: Spectrochimica Acta, B, 1972, 27B, 391.

Original recibido: Septiembre de 1990.

Original aceptado: Octubre de 1990.

## GEOTECNIA

# Estudio experimental sobre el hinchamiento de los suelos que contienen sales solubles.

Por F. LOPEZ GONZALEZ-MESONES (1)

## RESUMEN

En este trabajo se han estudiado los cambios volumétricos que experimentan algunas sales solubles cuando se hidratan.

Se han realizado ensayos de presión de hinchamiento e hinchamiento libre en muestras preparadas en el laboratorio, mezclando diferentes tipos de materiales con sulfato cálcico.

Los ensayos se efectuaron con distintos criterios, a fin de conocer mejor los mecanismos del fenómeno.

Los distintos factores que afectan al hinchamiento han sido definidos mediante los ensayos realizados en este trabajo de investigación.

*Palabras clave:* Suelos expansivos, Hidratación, Hinchamiento, Indices de poros, Solubilidad, Sales solubles, Sulfato cálcico.

## ABSTRACT

The volumetric changes suffered by some soluble salts when hydrated, is studied in this work.

Several swelling pressure and free swelling test, have been carried out with samples prepared in laboratory, mixing different types of materials with calcium sulphate. The tests were made in many different conditions.

The different factors that affect the swelling, have been defined, with the tests developed in this work.

*Key words:* Expansive soils, Hydration, Swelling, Voids ratio, Solubility, Soluble salts, Calcium sulphate.

## 1. INTRODUCCION

La capacidad de disolución de una sustancia en un determinado disolvente depende, únicamente, de la temperatura a la que se realiza la mezcla. De esta manera, el fenómeno de la disolución viene indicado por la denominada curva de solubilidad característica de cada producto.

En general, la solubilidad aumenta con la temperatura, aunque en algunos casos sucede lo contrario, como es el caso de algunos compuestos de calcio, como el hidróxido cálcico  $(OH)_2Ca$ , el cromato cálcico  $(CaCrO_4)$ , etc.

Por otra parte, existen algunas curvas de solubilidad, que presentan características o puntos singulares, en las que el soluto, antes de la separación iónica de sus moléculas, se hidrata, originándose una nueva molécula de mayor volumen.

Este incremento de volumen, puede ocasionar a veces, hinchamientos importantes en un suelo que contuviera este tipo de materiales.

Resulta muy significativa la curva de solubilidad del sulfato sódico  $(Na_2SO_4)$ , que se transforma, por debajo de los  $32,4^\circ C$ , en decahidrato  $(Na_2SO_4 \cdot 10 H_2O)$ , según se indica en la figura 1.

Este tipo de sales pueden aparecer en la natu-

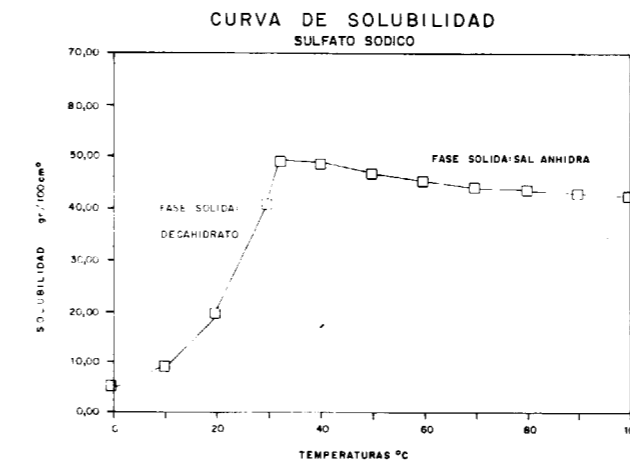


Figura 1.—Curva de solubilidad del sulfato sódico.

raleza de forma simple, como la thenardita  $(Na_2SO_4)$ , la anhidrita  $(CaSO_4)$ , etc., o bien en formas más o menos complejas, como pueden ser la polihalita  $(MgSO_4, K_2SO_4, 2CaSO_4, 2H_2O)$ , la bloedita  $(MgSO_4, Na_2SO_4, 4H_2O)$ , la etringita  $(Ca_6Al(OH)_6, 2(SO_4)_3, 26H_2O)$ , la thaumasita  $(Ca_3Si(OH)_6, 2(CO_3)_2, (SO_4)_2, 24H_2O)$ , etc., que alcanzan en su hidratación importantes cantidades de agua.

Ciertamente, estos suelos no son frecuentes en la naturaleza, aunque en ocasiones se puede favorecer su formación, en ciertas condiciones de acidez del suelo y un tratamiento químico determinado del mismo.

DAL HUNTER (1988) reprodujo en laboratorio las reacciones ocasionadas al tratar con sal un suelo arcilloso conteniendo sulfato. Según este autor, la formación de thaumasita se puede originar, partiendo de un suelo que contenga yeso,  $(CaSO_4, 2H_2O)$ , calcita  $(CaCO_3)$  y cal  $(OCa)$ , en presencia de silicato, a temperaturas inferiores a los  $15^\circ C$  y con un  $pH > 10,5$ .

Este estudio se realizó como consecuencia de los graves desperfectos ocasionados en algunas calles de Las Vegas, al tratar la sub-base del firme con cal.

Como se ve, el fenómeno puede resultar a veces complicado, aunque el mecanismo es siempre el mismo, es decir, la ganancia de moléculas de agua por hidratación de la sal.

## 2. EL MECANISMO REAL DE DISOLUCION DE LAS SALES EN EL SUELO

Para que en un suelo salino se produzca la transformación de una sal anhidra en sal hidratada, es necesario que se reproduzcan exactamente las condiciones de temperatura y concentración, que se corresponden con las curvas de solubilidad de una sal determinada.

En los climas áridos o semiáridos se producen largos períodos de estiaje con escasas precipitaciones y elevadas temperaturas, seguidos de otros de abundantes lluvias y descensos térmicos importantes.

Después de un largo período de sequía, se puede producir un descenso importante del nivel freático, alterándose las condiciones de equilibrio del suelo, desecándose la superficie y disminuyendo el contenido de humedad, hasta la zona saturada por debajo del nivel freático.

Supongamos un suelo, después de un largo período de estiaje, que contiene una concentración determinada de  $Na_2SO_4$ .

Al comenzar el período lluvioso, la precipitación, dependiendo de la permeabilidad del terreno, penetra en el mismo disolviendo la sal que contiene. A medida que el agua discurre por el mismo aumenta la concentración de la disolución y desciende la temperatura. Estaríamos, por ejemplo, en el tramo AB de la figura 2, en el que la disolución no está saturada.

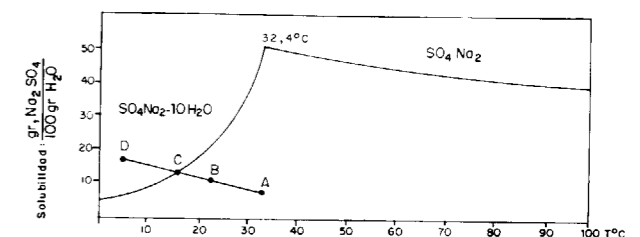


Figura 2.—Mecanismo de hidratación de la sal según la curva de solubilidad.

Conteniendo, por tanto, sal anhidra disuelta, se define así una primera zona superficial denominada zona A (fig. 3), en la que, salvo que la concentración de sales sea muy elevada o la

(1) Dr. Ingeniero de Minas. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid. GEOLAB, S. A.

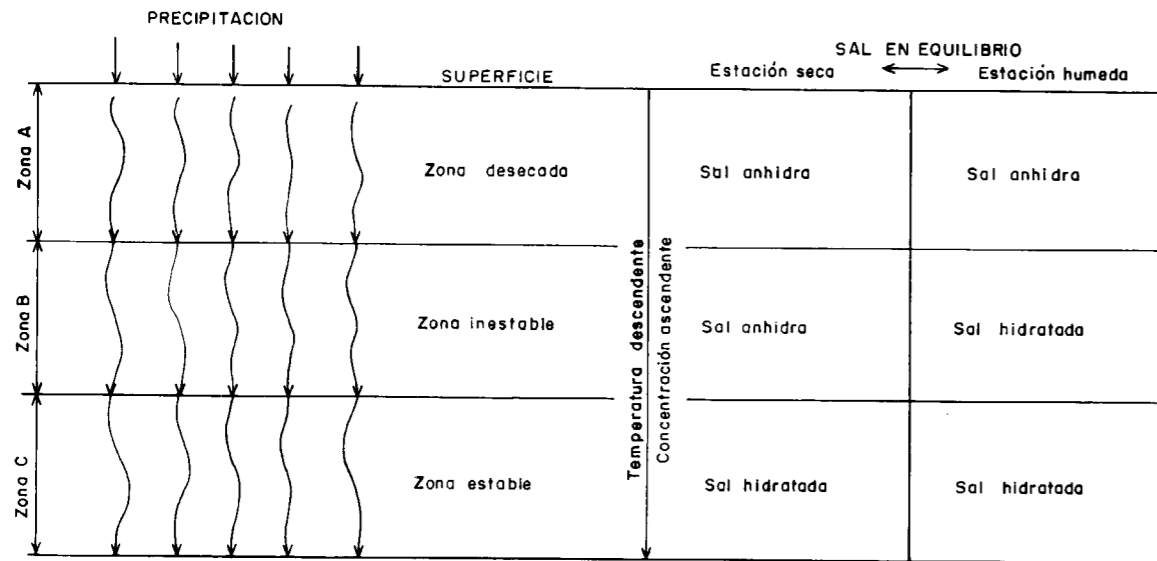


Figura 3.—Comportamiento teórico de los cambios volumétricos correspondientes a terrenos con sales solubles.

temperatura muy baja, no precipitará el decahidrato.

A medida que el agua sigue descendiendo, la temperatura disminuye y la concentración aumenta, llegándose a un punto en el que la disolución descendente se satura (punto C), a partir del cual, si sigue aumentando la concentración y la temperatura descendiendo, precipitarán cristales de decahidrato.

Esta segunda zona se denomina zona B, y constituye la parte del suelo en desequilibrio estacional continuo y, por tanto, la más peligrosa.

Si continúa descendiendo el agua, sigue aumentando la concentración y descendiendo la temperatura (punto D), la fase sólida en equilibrio con la disolución es decahidrato y, por tanto, es una zona estable. Se denomina zona C.

Evidentemente, esta división zonal es puramente teórica y obedece a unas condiciones de concentración y temperaturas determinadas, pudiendo no existir en la realidad alguna de las zonas aquí definidas, o incluso las tres, no produciéndose en estas circunstancias el fenómeno de transformación de sal anhidra en sal hidratada.

Si esto es así, el fenómeno se desarrolla de una manera totalmente distinta.

En efecto, si se supone que el agua de escorren-

tía no está saturada de sal y la concentración en sal del suelo, es muy pequeña (por debajo de la que le corresponde a su curva de solubilidad), ésta se empieza a disolver en el agua de baja concentración después de hidratarse, produciéndose una pérdida de materia sólida del suelo, y consiguientemente un asentamiento del terreno.

Resulta, pues, necesario conocer las tres variables que influyen en el fenómeno de hinchamiento de un suelo salino, es decir, el tipo de sal, la concentración tanto en el suelo como en el agua freática y la temperatura del medio, para poder predecir, en una primera aproximación, cuál va a ser el resultado final.

### 3. RESULTADOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS

Se ha realizado un estudio de carácter experimental, con muestras artificiales, preparadas en el laboratorio, con el fin de analizar los distintos mecanismos que intervienen en el fenómeno expansivo.

Las muestras se han confeccionado a base de un material inerte (polvo de cuarzo), una arena graduada del Instituto E. Torroja, y una sal anhidra, habiéndose obtenido los siguientes resultados:

### 3.1. Influencia de la temperatura

Para realizar este ensayo se ha utilizado una muestra conteniendo un 10 por 100 de yeso deshidratado a 200° C, 30 por 100 de arena calibrada, y el resto polvo de cuarzo y carbonato cálcico, en la proporción 70/30 por 100, respectivamente. La muestra se consolidó durante 24 horas con una carga estática de 1.000 kp, equivalente a unos 26 kp/cm<sup>2</sup>, aproximadamente, y se colocó en una célula edométrica termorregulada, utilizando como fluido de inundación solución saturada de sulfato cálcico.

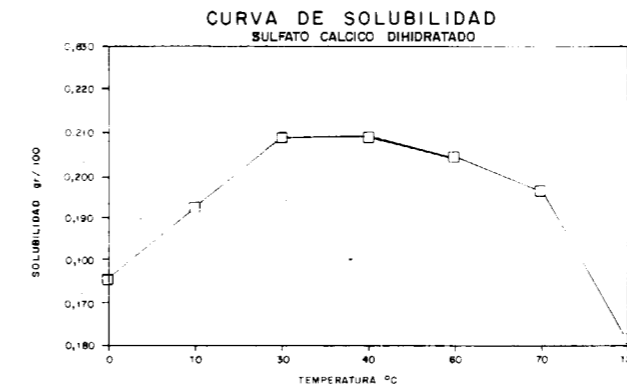


Figura 4.—Curva de solubilidad del sulfato cálcico.

En la figura 4 se ha representado la curva de solubilidad de la sal, en la que se ha exagerado la escala vertical para comprender mejor los resultados. Estos han sido:

% hinchamiento	Temperatura de la solución saturada
6,449	5° C
6,338	20° C
6,287	30° C
6,278	40° C
6,313	50° C
6,364	60° C

Como puede observarse (fig. 5), la curva de hinchamiento presenta una curvatura contraria a la de solubilidad, con un mínimo a la temperatura de 40° C. Justamente en el punto donde la curva de solubilidad alcanza valores máximos.

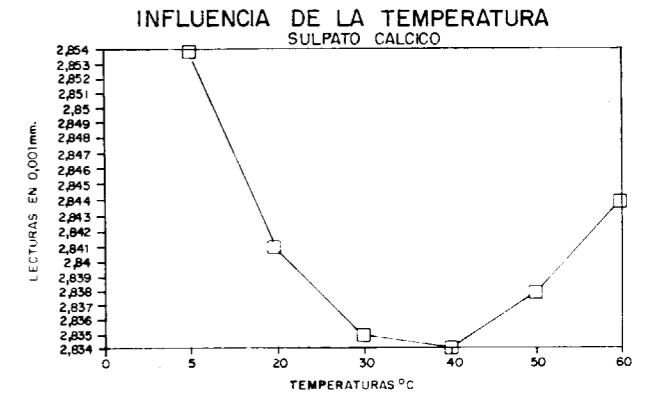


Figura 5.—Variación del hinchamiento libre con la temperatura del ensayo.

La justificación es sencilla. En efecto, en el punto de máxima solubilidad a 40° C, el contenido de fase sólida en la muestra, es menor que cualquier otra temperatura, precipitándose cristales de sal hidratada por encima y por debajo de aquella temperatura y, por tanto, incrementándose el contenido de fase sólida en la muestra, produciéndose un hinchamiento.

Hay que señalar, no obstante, que aunque se ha hablado de hinchamiento, el fenómeno puede ser también de contracción, según el sentido de la rama de la curva en la que se produzca la variación de temperatura. Es decir, un descenso de temperatura desde 30° C a 5° C produciría un hinchamiento, pero un incremento de la misma entre 5° C a 30° C ocasionaría una contracción o hinchamiento negativo en el suelo.

Por otro lado, en la rama derecha de la curva de solubilidad el fenómeno sería contrario, es decir, un incremento de la temperatura produciría hinchamiento y una disminución de la misma contracción.

### 3.2. Influencia del grado de consolidación

Como se sabe, el índice de poros o de huecos de un suelo depende, entre otras razones, del grado de consolidación del mismo.

Con el experimento que se describe a continuación se ha pretendido estudiar el fenómeno de hinchamiento desde ésta otra perspectiva.

Se preparó la misma muestra que en el ensayo anterior, y se sometió a distintas cargas de consolidación durante 24 horas.

Los ensayos se realizaron a temperatura de 20° C y solución saturada de sulfato cálcico.

Los resultados obtenidos se reflejan en el cuadro siguiente:

Carga de consolidación (Kp)	d	eo	ef	% hinchamiento
150	1,38	0,898	0,954	2,93
500	1,45	0,808	0,913	5,81
1.000	1,55	0,645	0,801	6,33
2.000	1,62	0,617	0,729	6,96
4.000	1,73	0,518	0,613	6,20

En la figura 6 se ha representado la variación del porcentaje de hinchamiento con el grado de consolidación.

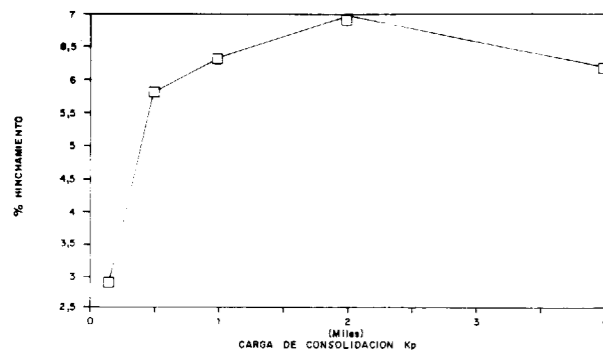


Figura 6.—Variación del porcentaje de hinchamiento con el grado de consolidación de la muestra.

Como puede observarse, para valores bajos de la presión de consolidación, se produce un descenso rápido de hinchamiento, estabilizándose prácticamente por encima de los 500 kp de carga estática.

En efecto, para una muestra determinada, con una granulometría establecida, al aumentar el grado de consolidación, el índice de poros disminuye a base de rellenarse parte de los huecos con sal anhidra. Es decir, la superficie de contacto entre la sal y el material inerte se hace

mayor y, por tanto, al producirse la hidratación, el hinchamiento debe aumentar.

Por otra parte, al incrementarse la consolidación de la muestra, se tiene que llegar a un valor, a partir del cual, el índice de poros para una granulometría determinada ya no disminuye, salvo que empiecen a romperse los granos que forman, por decirlo de alguna manera, el esqueleto del suelo, en cuyo caso la granulometría ya no sería la misma.

En consecuencia, se puede afirmar que el grado de consolidación del suelo influye hasta que la aproximación o la distancia de las partículas del material inerte entre sí, alcance un determinado valor, a partir del cual, aunque aumente la consolidación, y siempre que no haya rotura de partículas, el hinchamiento se mantiene prácticamente constante.

### 3.3. Influencia del contenido en sal y de la granulometría del suelo en el hinchamiento

Se realizaron 28 ensayos con muestras de polvo de cuarzo, arena calibrada y sulfato cálcico, consolidadas a 4 kp/cm<sup>2</sup> durante un día y sometidas al ensayo de presión de hinchamiento en células edométricas de 70 mm.

En la figura 7 se han representado los resultados obtenidos de la presión de hinchamiento con la variación del porcentaje de arena calibrada para muestras con distintos contenidos en sal.

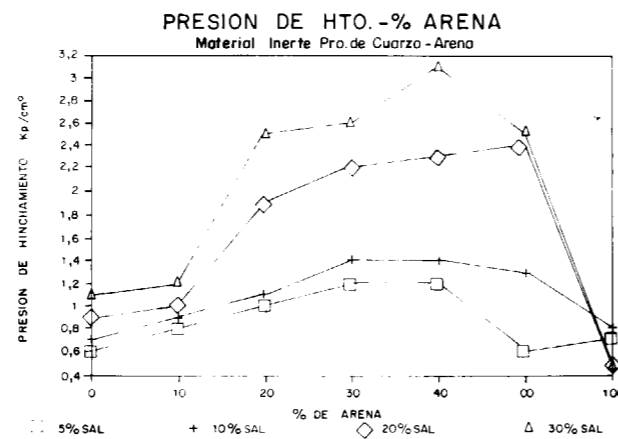


Figura 7.—Variación de la presión de hinchamiento con el porcentaje de arena calibrada para distintos contenidos en sulfato cálcico.

La presión de hinchamiento se incrementa con el contenido de arena para cualquier contenido en sal, hasta alcanzar un valor máximo a partir del cual disminuye.

También crece el hinchamiento con el contenido en sal, obteniéndose valores claros para este parámetro, salvo en el caso del 100 por 100 de arena, en donde se superponen con diferencias poco significativas.

La causa de estas variaciones del hinchamiento con la granulometría habrá que buscarlas, lógicamente, en la porosidad de la muestra, que pueda favorecer más o menos el desarrollo de los cristales.

En la figura 8 se han representado los valores iniciales del índice de poros de las muestras después de consolidar, con el contenido de arena y para distintos porcentajes de sal.

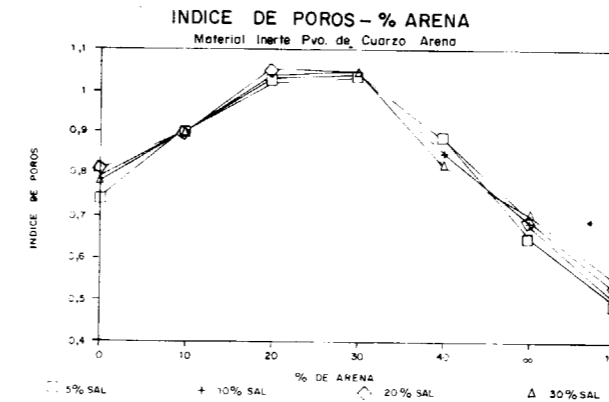


Figura 8.—Variación del índice de poros con el porcentaje de arena calibrada para distintos contenidos de sulfato cálcico.

Los valores máximos del índice de poros se obtienen para unos porcentajes de arena comprendidos entre 20 y 30 por 100 de este material, observándose la poca influencia que tiene el contenido de sal en la porosidad, para un contenido de arena determinado.

Si se comparan estos valores con los de la figura 7, se ve que los máximos del índice de poros se aproximan bastante a los máximos de presión de hinchamiento, estando éstos algo más desplazados hacia la derecha, es decir, entre el 30 y el 40 por 100 de arena.

En consecuencia, se demuestra con esta serie de ensayos la influencia que tiene la porosidad inicial de la muestra en el hinchamiento.

Evidentemente, la mayor o menor porosidad es consecuencia del tamaño del grano, de la graduación de la curva granulométrica y del grado de consolidación.

### 3.4. Influencia del contenido en cloruro sódico

Resultan bastante frecuentes los terrenos en los que existen cantidades más o menos relevantes de cloruro sódico. En las zonas costeras, en donde la intrusión marina adquiere cierta importancia, da lugar a la presencia de esta sal, tanto en forma sólida constituyendo parte del suelo, como disuelta en las aguas freáticas.

Evidentemente, la permeabilidad del terreno y la aridez del clima constituyen factores que facilitan la presencia del cloruro.

Por otra parte, se sabe que la presencia de cloruro sódico puede aumentar la solubilidad del sulfato cálcico, influyendo, por tanto, en el hinchamiento que pudiera producir esta última sal.

Para valorar de alguna manera cómo puede influir la presencia de esta sal, en suelos conteniendo sulfato cálcico, se ha elegido una curva de solubilidad que relaciona la solubilidad del sulfato con la concentración de una solución acuosa del ClNa a 26° C (fig. 9).

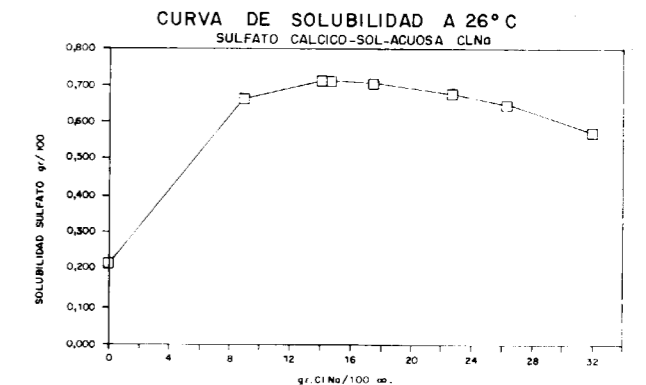


Figura 9.—Curva de solubilidad del sulfato cálcico en solución acuosa de ClNa a la temperatura de 26° C.



De los valores numéricos extremos de dicha curva se obtienen los siguientes datos:

Para una solución sin cloruro, la solubilidad del sulfato es de 0,2121 g/100 cc. de disolución, mientras que para una concentración de 14,399 g. de ClNa, la solubilidad del sulfato es de 0,718 g., es decir, aumenta 3,38 veces.

Partiendo de esta curva de solubilidad se han realizado, en primer lugar, dos ensayos de hinchamiento libre en las mismas condiciones extremas que las que acabamos de describir y a 26° C de temperatura.

Para ello se preparó una muestra con 10 por 100 de sal y 30 por 100 de arena, y el resto polvo de cuarzo y carbonato cálcico en la proporción de 70/30 por 100, consolidada a 150 kp de carga estática, utilizándose una solución saturada en sulfato, con un 14,399 por 100 de ClNa, y colocando la célula en un baño termostático a la temperatura antes indicada de 26° C.

Asimismo, también se ensayó la misma muestra, en las mismas condiciones de consolidación y temperatura y solución saturada de sulfato, pero sin ClNa.

Los resultados obtenidos fueron:

Referencia	% hinchamiento	Consolidación (kp)	Observaciones
M'QCa A30Y10 ... ..	1,51	150	Con ClNa
M QCa A30Y10 ... ..	2,91	150	Sin ClNa

Con objeto de obtener unos valores más elevados del hinchamiento y comprobar si las diferencias eran significativas, se repitieron ambos ensayos con las mismas muestras, pero consolidadas a 1.000 kp de carga estática.

Se obtuvieron los siguientes valores:

Referencia	% hinchamiento	Consolidación (kp)	Observaciones
M'QCa A30Y10 ... ..	5,01	1.000	Con ClNa
M QCa A30Y10 ... ..	6,33	1.000	Sin ClNa

Es decir, las diferencias de hinchamiento en ambos casos fueron muy parecidas, del orden del 1,3 por 100.

Se ve, pues, que la presencia de cloruro sódico en el suelo produce una disminución del hinchamiento que, aunque poco significativo, puede llegar a valores del orden del 1,3 por 100, si las condiciones reales del terreno coinciden con los extremos de la curva de solubilidad estudiada.

Aunque la muestra elegida sólo contenía un 10 por 100 de sal, un mayor contenido de este material no debe variar significativamente los resultados obtenidos, ya que la baja solubilidad del sulfato cálcico impide que se disuelva más material del que permite su curva de solubilidad y que, como ya se ha visto, no supera valores superiores a 0,718 g/100 cc. de disolución.

Los resultados anteriores confirman las expectativas teóricas que sobre los mismos se podrían esperar «a priori».

En efecto, la transformación de sal anhidra en sal hidratada se realiza exactamente igual, pero al aumentar la solubilidad del sulfato por la presencia de ClNa, queda en la muestra menos fase sólida de sal dihidratada y, por tanto, el hinchamiento es menor.

Una consecuencia aparentemente lógica de los resultados de este ensayo sería la siguiente: si el cloruro sódico disminuye el hinchamiento de un suelo de este tipo, tratándolo mediante inyecciones de soluciones adecuadas de esta sal, ¿se podría evitar el hinchamiento?

La respuesta en principio es negativa, por varias razones.

En primer lugar, hay que tener en cuenta que, dada la escasa solubilidad del sulfato, la disolución total de éste para evitar su hidratación, resulta prácticamente imposible.

En segundo lugar, habría que conseguir que la hidratación de la sal fuera posterior a su disolución, pues, en caso contrario, se produciría primero un hinchamiento y a continuación un asentamiento.

#### 4. CONCLUSIONES

Como conclusiones de este trabajo experimental pueden obtenerse las siguientes:

1. Las variaciones de temperatura de un suelo que contenga sales solubles puede producir

asentamientos o expansividades, según la rama de la curva de solubilidad de la sal en que varíen.

2. La forma de la curva granulométrica del material, tanto en lo que se refiere a tamaño como a graduación, afecta de manera importante al hinchamiento, incrementándolo, hasta un tamaño determinado de las partículas de material inerte.
3. El grado de consolidación del suelo y, por tanto, el índice de poros, tiene una influencia directa en el hinchamiento hasta alcanzar un valor determinado por encima del cual se mantiene constante.
4. La concentración salina en las aguas freáticas también afecta a la expansividad, pudiendo ocasionar movimientos expansivos o de contracción según la cuantía de la misma.
5. La presencia de otras sales, como el cloruro sódico, que afecta a la solubilidad del sulfato cálcico, u otra cualquiera que afectase a la solubilidad de la sal que produce el fenómeno expansivo, ocasiona una disminución del hinchamiento, pudiendo llegar incluso a originar asentamientos del terreno.
6. El incremento del contenido en sal produce un aumento paralelo de la expansividad hasta un valor determinado, a partir del cual disminuye.

#### REFERENCIAS

- AYALA, F. J.; OTEO, C.; SALINAS, J. L., y FERRER, M. (1987): *Metodología del Mapa Previsor de Riesgos por expansividad de Arcillas en España. Escala 1:1.000.000*. IGME-CEDEX.
- CABALLERO, M. A.; MAÑAS, M. G., y DOMINGUEZ, S. (1985): *Defecto de crecimiento en cristales de cuarzo. Estudio por topografía de Rayos X*. Bol. Soc. Esp. de Mineralogía.
- CHADA, L. R., and HEM RAJ (1985): *Role of nocive salts in the stabilization of soils with and without cement. The effect of sodic carbonate*. Indian Concrete Journal. Dec.
- DAL HUNER (1988): *Lime induced heave in sulfate-bearing clay soils*. Journal of Geotechnical Engineering, vol. 114, núm. 2.
- FU SHIFA (1986): *Geotechnical features of saline soils in Chaidamu basin, West China*. 5th International IAEG Congress. Buenos Aires.

GALAN, E., y MIRETE, S. (1979): *Introducción a los minerales de España*. IGME.

HAROLD, D.; BLACER and KANDIAN ARULANANDAN (1973): *Expansion of soils containing sodium sulfate. Proceedings of the third International Conference on Expansive Soils*. Haifa. August.

IGME - ADARO (1982): *Investigación geológica y tecnológica de los yesos en Andalucía*.

JIMENEZ SALAS, J. A., y JUSTO ALPAÑES, J. L. (1975): *Geotecnia y Cimientos*. Tomo I. Editorial Rueda.

MARTIN VIÑAS, J. (1973): *Hinchamiento de los suelos por la presencia de sulfato sódico y otras sales solubles en general*. Boletín Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo. Núm. 100.

MENRA, Sr.; CHADA, L. H., and KAPUR, R. N. (1955): *Role of nocive salts in the stabilization of soils with and without cement. The effect of sodic sulfate*. Indizan Concrete Journal. Oct.

MOTVLJER, J. L. (1959): *Caminos en las regiones áridas con suelos salinos*. Asociación Internacional Permanente de los Congresos de Carreteras. Río de Janeiro.

NETTERBERG, F. (1970): *Occurrence and Testing for Deleterious Salts in Road Construction Materials with Particular Reference to Calcrets*. Proceedings of the symposium on soils and Earth structures in Arid Climats. Adelaida. May.

ORDOÑEZ, S.; MENDUIÑA, J., y DEL CURA, M. A. (1982): *El sulfato sódico natural en España*. Tecniterre, núm. 46.

RIOS, J. M. (1947): *Diapirismo*. Boletín IGME, tomo LX.

RIOS, J. M. (1963): *Materiales salinos del suelo español*. IGME.

RODRIGUEZ ORTIZ, J. M., y PRIETO, C. (1976): *Los materiales del Keuper en España*. Simposio Nacional sobre rocas blandas. Madrid.

SERRANO, A.; OTEO, C.; DAPEÑA, E., y MARTIN VIÑAS, J. (1981): *Análisis de los fenómenos de expansión de una formación de margas yesíferas*. Boletín de la Sociedad Española de Mecánica del Suelo y Cimentación, núm. 52.

SEIDELL, A. (1920): *Solubilities of inorganic and organic substances*.

SHERWOOD, P. T. (1952): *Effects of sulfats on soils stabilized with lime and cement*. Rod and Road Construction. Feb.

STEPHEN, H., and STEPHEN, T. (1963): *Solubilities of organics and inorganics compounds*.

VENUAT, M., y PAPADAKIS, M.: *Control y ensayos de cementos, morteros y hormigones*. Ediciones Urmo.

VIJAYVERGIYA, V. N., and CHAZLY, O. I. (1973): *Prediction of swelling potential for natural clays*. Proceedings of the third. Int. Conf. on Expansive Soils. Haifa.

YONG, R. N. M.; SADANA, M. L., y GOHL, N. B. (1984): *Compositional Control on Swelling behavior of and Expansive soil*. Fifth International Conference on Expansive Soil. Adelaida. South Australia. May.

Original recibido: Diciembre de 1990.

Original aceptado: Marzo de 1991.

## ROCAS INDUSTRIALES Y ORNAMENTALES

# La conservación de la piedra de la Casa Milá («La Pedrera» de Gaudí, Barcelona): Pruebas preliminares.

Por R. M. ESBERT (\*), C. GROSSI (\*), J. ORDAZ (\*) y F. J. ALONSO (\*)

## RESUMEN

La piedra de Vilafranca, principal material usado en la construcción de la fachada de la Casa Milá («La Pedrera»), de Gaudí, es estudiada en vistas a su eventual conservación.

En relación a sus características petrofísicas y estado de deterioro, se han aplicado, en el laboratorio, diferentes tratamientos de consolidación y protección, intentándose evaluar el comportamiento futuro de los diversos sistemas piedra-tratamiento ensayados.

En todos los casos los tratamientos han consistido en la aplicación de un producto consolidante, seguido de un protector. Los sistemas experimentados han sido: Resina acrílica (Paraloid B72) y polisiloxano oligomérico (Dri Film 104); silicatos de etilo (Wacker OH) y polisiloxano oligomérico (Wacker 290 L), y silicato de etilo (Tegovakon V) y polisiloxano oligomérico (Tegosivin HL-100).

La valoración de los tratamientos aplicados se ha hecho mediante ensayos de envejecimiento artificial acelerado (ciclos de exposición a la luz ultravioleta, de humedad-sequedad y de cristalización de sales).

*Palabras clave:* Piedra, Conservación, Deterioro, Tratamiento, Durabilidad, Propiedades físicas, Caliza, Consolidación, Hidrofugación, Vilafranca.

## ABSTRACT

The Vilafranca stone, the most used material in the façade of the Milá House («La Pedrera»), by Gaudí, is studied in order to an eventual conservation. Several treatments of consolidation and protection were applied to that stone in laboratory, according to its petrophysical characteristics and deterioration degree; and trying to evaluate the future behaviour of the different stone-treatment systems applied. In all cases, a consolidant product, followed by a protective, were applied. The systems tested were: Acrylic resine (Paraloid B72) and oligomeric polysiloxane (Dri Film 104); ethyl silicate (Wacker OH) and oligomeric polysiloxane (Wacker 290 L); and ethyl silicate (Tegovakon V) and oligomeric polysiloxane (Tegosivin HL-100).

The assesment of the applied treatments was made by means of artificial ageing tests (cycles of ultraviolet exposures, wetting-drying and salt crystallization).

*Key words:* Stone, Conservation, Deterioration, Treatment, Durability, Physical properties, Limestone, Consolidation, Hydrofugation, Vilafranca.

## INTRODUCCION

La Casa Milá, de Barcelona, comúnmente conocida por «La Pedrera», es uno de los edificios más notables y singulares del arquitecto Antoni Gaudí (1852-1926). Construida entre 1906 y 1910, destaca por sus audaces soluciones arquitectónicas (figs. 1 y 2), entre las que resalta el movimiento

sinusoidal que el arquitecto confirió a la piedra de la fachada.

Varios tipos de piedra, todos ellos de naturaleza carbonatada, se utilizaron en su edificación, siendo la caliza de Vilafranca el material rocoso más empleado en la fachada. Sin embargo, debido a la acción de los agentes de la intemperie, a la creciente contaminación urbana, así como a algunos problemas de carácter constructivo, las piedras de la fachada de la Casa Milá vieron ace-



Figura 1.—Aspecto general del edificio de La Pedrera, ubicado en el centro de la ciudad de Barcelona (Paseo de Gracia).



Figura 2.—Detalle de la disposición sinusoidal de los sillares de piedra de Vilafranca de la fachada de La Pedrera.

lerado notablemente su deterioro en las últimas décadas.

Las principales formas de deterioro presentes en las piedras eran: el ennegrecimiento por pátinas y depósitos superficiales de suciedad y musgos, la desagregación granular y la presencia de sales solubles (costras y eflorescencias) en determinadas zonas (figs. 3 y 4). Además, algunas piedras presentaban fisuras y grietas de origen mecánico, inducidas por los procesos de corrosión de las estructuras metálicas insertadas en ellas.

En 1987 se emprendió una serie de estudios previos a las obras de restauración del edificio. Así, se llevaron a cabo análisis petrográficos, químicos, físicos y alterológicos de las principales variedades pétreas del edificio, y se determinaron las causas y mecanismos de su degradación. Al

mismo tiempo, se realizaron en el laboratorio diversos ensayos de tratamiento de las piedras con productos consolidantes e hidrofugantes. Para la evaluación de la eficacia e idoneidad de dichos tratamientos de conservación se tuvo en cuenta el comportamiento de las piedras tratadas frente a ensayos de durabilidad o de envejecimiento artificial acelerado. En este trabajo se presentan los resultados de estas pruebas preliminares de laboratorio, referidas a la piedra de Vilafranca.

## CARACTERISTICAS DE LA PIEDRA DE VILAFRANCA

Se trata de una caliza de color blanquecino con tonalidades amarillentas tenues (10 YR 8/2-8/3, GODDARD et al., 1979), que tienden a intensificarse en las muestras del edificio. Presenta un aspecto granudo más o menos grosero (tamaño

(\*) Departamento de Geología. Universidad de Oviedo, España.





Figura 1.—Aspecto general del edificio de La Pedrera, ubicado en el centro de la ciudad de Barcelona (Paseo de Gracia).

lerado notablemente su deterioro en las últimas décadas.

Las principales formas de deterioro presentes en las piedras eran: el ennegrecimiento por pátinas y depósitos superficiales de suciedad y musgos, la desagregación granular y la presencia de sales solubles (costras y eflorescencias) en determinadas zonas (figs. 3 y 4). Además, algunas piedras presentaban fisuras y grietas de origen mecánico, inducidas por los procesos de corrosión de las estructuras metálicas insertadas en ellas.

En 1987 se emprendió una serie de estudios previos a las obras de restauración del edificio. Así, se llevaron a cabo análisis petrográficos, químicos, físicos y alterológicos de las principales variedades pétreas del edificio, y se determinaron las causas y mecanismos de su degradación. Al



Figura 2.—Detalle de la disposición sinusoidal de los sillares de piedra de Vilafranca de la fachada de La Pedrera.

mismo tiempo, se realizaron en el laboratorio diversos ensayos de tratamiento de las piedras con productos consolidantes e hidrofugantes. Para la evaluación de la eficacia e idoneidad de dichos tratamientos de conservación se tuvo en cuenta el comportamiento de las piedras tratadas frente a ensayos de durabilidad o de envejecimiento artificial acelerado. En este trabajo se presentan los resultados de estas pruebas preliminares de laboratorio, referidas a la piedra de Vilafranca.

#### CARACTERISTICAS DE LA PIEDRA DE VILAFRANCA

Se trata de una caliza de color blanquecino con tonalidades amarillentas tenues (10 YR 8/2-8/3, GODDARD et al., 1979), que tienden a intensificarse en las muestras del edificio. Presenta un aspecto granudo más o menos grosero (tamaño



de grano de 2 a 0,5 mm.). Se trata, en general, de una piedra poco compacta y coherente.



Figura 3.—Costras negras y pátina de ennegrecimiento sobre la piedra de la fachada de La Pedrera (caliza de Vilafranca).



Figura 4.—Eflorescencias salinas observadas en las partes resguardadas, pero con acceso al exterior, en varios puntos de la fachada del edificio.

### Mineralogía

Caliza muy pura, compuesta por más del 97 por 100 de calcita, estando constituida la fracción restante por granos de cuarzo de pequeño tamaño (alrededor de 30  $\mu\text{m}$ .) y minerales arcillosos.

### Textura

Granuda, de tipo «grainstone», estando formados los granos por agregados y bioclastos, débilmente cementados por micrita, por lo que la roca posee una importante porosidad intergranular (fig. 5). Entre los granos hay abundantes peloides (granos de alrededor de 0,1 mm., compuestos de micrita), y otros de mayor tamaño que pueden atribuirse a algas rojas; los bioclastos incluyen restos de foraminíferos y equinodermos. Normalmente, estos granos están unidos entre sí por cemento micrítico, formando agrupaciones de mayor tamaño (agregados), entre las cuales la cohesión es más débil (ORDAZ et al., 1989).

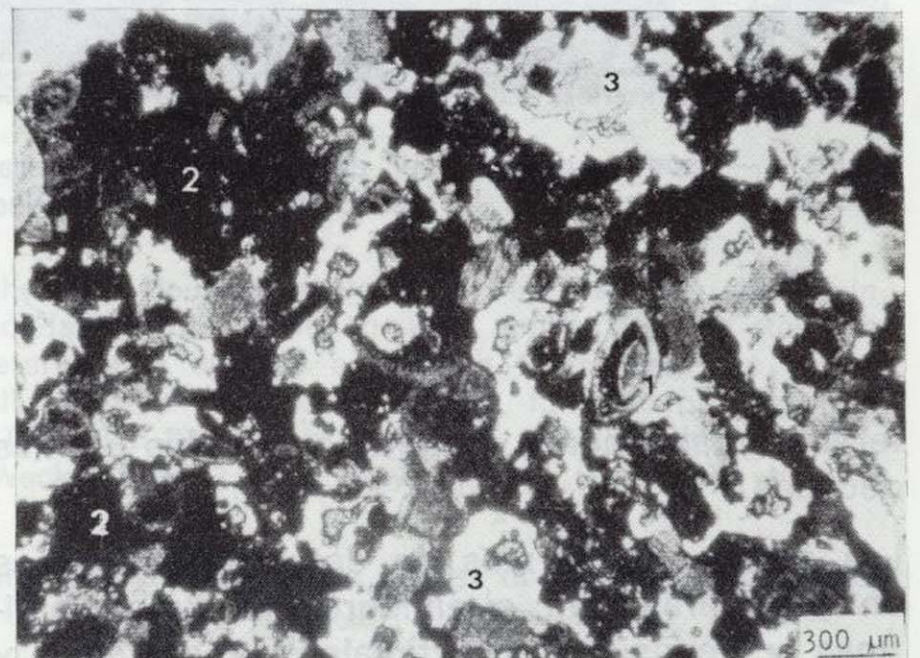


Figura 5.—Aspecto de la caliza de Vilafranca al microscopio petrográfico. Se observan algunos restos fósiles (1) y agregados de pellets (2), siendo de destacar la abundancia de porosidad intergranular (3).

### Porosidad

La porosidad abierta (accesible al agua) es muy elevada, situándose alrededor del 34 por 100. Dicha porosidad puede ser atribuida mayoritariamente a los mencionados poros intergranulares, y, en menor proporción, a poros matriciales, aso-



de grano de 2 a 0,5 mm.). Se trata, en general, de una piedra poco compacta y coherente.



Figura 3.—Costras negras y pátina de ennegrecimiento sobre la piedra de la fachada de La Pedrera (caliza de Vilafranca).



Figura 4.—Eflorescencias salinas observadas en las partes resguardadas, pero con acceso al exterior, en varios puntos de la fachada del edificio.

### Mineralogía

Caliza muy pura, compuesta por más del 97 por 100 de calcita, estando constituida la fracción restante por granos de cuarzo de pequeño tamaño (alrededor de 30  $\mu\text{m}$ .) y minerales arcillosos.

### Textura

Granuda, de tipo «grainstone», estando formados los granos por agregados y bioclastos, débilmente cementados por micrita, por lo que la roca posee una importante porosidad intergranular (fig. 5). Entre los granos hay abundantes peloides (granos de alrededor de 0,1 mm., compuestos de micrita), y otros de mayor tamaño que pueden atribuirse a algas rojas; los bioclastos incluyen restos de foraminíferos y equinodermos. Normalmente, estos granos están unidos entre sí por cemento micrítico, formando agrupaciones de mayor tamaño (agregados), entre las cuales la cohesión es más débil (ORDAZ et al., 1989).



Figura 5.—Aspecto de la caliza de Vilafranca al microscopio petrográfico. Se observan algunos restos fósiles (1) y agregados de pellets (2), siendo de destacar la abundancia de porosidad intergranular (3).

### Porosidad

La porosidad abierta (accesible al agua) es muy elevada, situándose alrededor del 34 por 100. Dicha porosidad puede ser atribuida mayoritariamente a los mencionados poros intergranulares, y, en menor proporción, a poros matriciales, aso-

ciados siempre a la micrita. La distribución del tamaño de los poros, obtenida mediante técnicas de porosimetría por inyección de mercurio, se muestra en forma de histograma (fig. 6). Puede observarse el relativamente elevado radio medio de acceso de poro, situado alrededor de 3  $\mu\text{m}$ ., así como el amplio rango de tamaños presentes. El porcentaje de macroporosidad (poros con radio de acceso > 7,5  $\mu\text{m}$ .) es relativamente alto (35 por 100), así como el de porosidad atrapada (65 por 100).

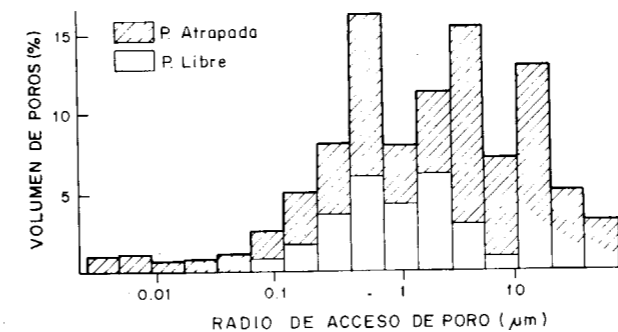


Figura 6.—Histograma en el que se recoge la variación del volumen de poros penetrados por el mercurio, en función del radio de acceso de los mismos, con indicación de las fracciones de porosidad libre y atrapada.

### Propiedades hídricas

El comportamiento relativo a la toma o pérdida de agua por parte de la roca se ha estudiado mediante los ensayos de absorción libre de agua y de evaporación, realizándose esta última en un ambiente con una Hr : 75 por 100 y una T : 18° C (ALONSO et al., 1989). En las figuras 7 y 8 puede observarse la cinética de dichos comportamientos. El contenido en agua final del ensayo de absorción libre (15 días) se sitúa alrededor del 17 por 100, lo que en términos relativos supone un grado de saturación elevado, del orden del 89 por 100. Al finalizar el ensayo de evaporación (15 días) el contenido en agua en la roca es sumamente bajo, del orden del 0.1 por 100, lo que indica muy baja capacidad de retención de agua por parte de la piedra.

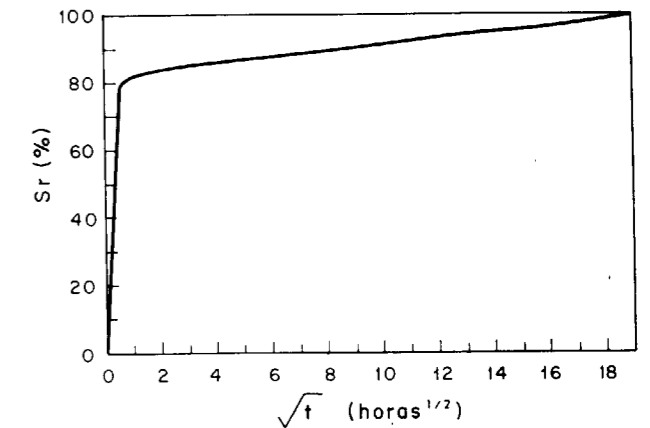


Figura 7.—Absorción libre de agua: Grado de saturación (Sr) alcanzado por la roca, en función del tiempo ( $\sqrt{t}$ ).

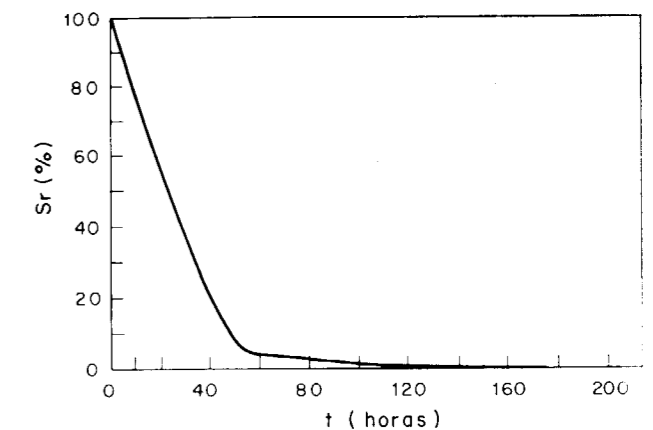


Figura 8.—Desorción libre de agua: Grado de saturación (Sr) alcanzado por la roca, en función del tiempo (t).

### TRATAMIENTOS: PLANTEAMIENTOS GENERALES Y MODO DE APLICACIÓN EN EL LABORATORIO

Dado el grado de deterioro y formas de alteración que presentaba la piedra de Vilafranca del edificio, su abundancia en sales solubles (ORDAZ et al., 1989), su alta porosidad comunicada y su ubicación en un ambiente húmedo con elevada contaminación atmosférica, se pensó que en las obras de intervención deberían contemplarse, como posibles fases a llevar a cabo, además de la limpieza, para eliminar pátinas y costras nocivas, las de consolidación y protección de la piedra.



La finalidad de los productos consolidantes que se aplican a la piedra es la de aumentar el grado de cohesión entre los constituyentes minerales, lo que conlleva un incremento de la resistencia mecánica. Los protectores confieren a las piedras un carácter hidrofugante y aumentan su resistencia frente a la acción de la intemperie.

La fase de protección se planteó en relación con el clima húmedo de Barcelona y el emplazamiento de La Pedrera en pleno casco urbano y, por tanto, expuesto a una notable contaminación producida por el tráfico rodado.

En este trabajo se experimentó, en todos los casos, con sistemas dobles, de consolidación e hidrofugación. Todos los productos de consolidación e hidrofugación experimentados fueron de naturaleza orgánica. A excepción de una resina acrílica, el resto son compuestos de silicio. Todos ellos se han utilizado con cierta profusión en diversas construcciones monumentales de diferentes países europeos, sobre todo en Alemania, Francia e Italia.

En concreto, los productos y sistemas utilizados fueron:

- Resina acrílica Paraloid B72 (Rhom & Hass, EE. UU.) (consolidante) y polisiloxano oligomérico Dri Film 104 (General Electric, EE. UU.) (protector).
- Silicato de etilo Wacker OH (consolidante) y polisiloxano oligomérico Wacker 290L (protector) (Wacker Chemie, R. F. A.).
- Silicato de etilo Tegovakon V (consolidante) y polisiloxano oligomérico Tegosivin HL-100 (protector) (Th. Goldschmidt, R. F. A.).

Los consolidantes Tegovakon V y Wacker OH se aplicaron sin dilución previa.

El resto de los productos se preparó del siguiente modo:

- Paraloid B72 disuelto al 5 por 100 en 1.1.1. tricloroetano.
- Tegosivin HL-100 y Wacker 290L diluidos al 10 por 100 en 1.1.1. tricloroetano.
- Dri Film diluido al 14 por 100 en 1.1.1. tricloroetano.

Los productos Paraloid B72 y Dri Film 104, diluidos en las proporciones indicadas, se aplica-

ron simultáneamente, mezclándolos entre sí al 50 por 100.

Los tratamientos se aplicaron a probetas cúbicas de 4 cm. de arista procedentes del edificio que fueron previamente secadas a 60° C en una estufa con aire forzado, hasta peso constante.

La aplicación se hizo con pincel, sobre una sola cara y en dos veces sucesivas; la segunda, 18 horas más tarde de la primera (DE CASTRO, 1979). Previa y posteriormente a la aplicación de los tratamientos se roció la piedra (mediante «spray») con los disolventes, para facilitar la difusión del producto en su interior y evitar depósitos superficiales del mismo cuando polimeriza (LAZZARINI y LAURENZI-TABASSO, 1986).

Se controló la ganancia de peso de las muestras tratadas, tanto para tener una primera aproximación a la capacidad de penetración del producto como una idea estimativa del consumo y costo del mismo.

En la tabla I se recogen las correspondientes ganancias de peso.

TABLA I

**Ganancia de peso de las probetas de piedra de Vilafranca tratadas**

Tratamiento	% ganancia de peso	Desviación típica
P B72+DF 104 ... ..	0.6	0.1
W OH y 290 L ... ..	3.5	0.3
T V y HL-100 ... ..	3.6	0.6

Como resulta evidente, los tratamientos a base de compuestos de silicio penetran mejor en la piedra, el consumo es unas seis veces superior al de resina acrílica, no existiendo entre ellos diferencias significativas (3.5 por 100 y 3.6 por 100 respectivamente).

En la tabla II se recogen las medidas de color realizadas mediante observación visual con la tabla de colores de GODDARD et al., 1979 (escala Munsell), de la piedra sin tratar y después de tratada con los diferentes productos.

TABLA II

**Variaciones de color de la piedra de Vilafranca**

Tratamiento	Color
Sin tratar	10 YR 8/2-8/3 (White-very pale brown)
P B72+DF 104	2.5 Y 8/4 (pale yellow)
W OH y 290 L	10 YR 8/2-8/3 y 2.5 Y 8/4
T V y HL-100	10 YR 8/2-8/3 y 2.5 Y 8/4

**VALORACION DE LOS TRATAMIENTOS**

Posteriormente a la aplicación de los tratamientos se llevaron a cabo *ensayos de envejecimiento artificial acelerado*, con el fin de estudiar la evolución de los productos y valorar la durabilidad de cada tratamiento.

En concreto se realizaron ciclos de exposición a la luz ultravioleta, ensayos de humedad-sequedad y ensayos de cristalización de sales (con solución acuosa al 14 por 100 de sulfato sódico decahidratado), con el fin de tener una aproximación a la acción de los agentes que más habitualmente actúan sobre dicha piedra en el edificio de La Pedrera.

La *duración* de los ciclos programados fue de 24 horas, realizándose 40 ciclos en el ensayo de exposición a la luz ultravioleta, 15 ciclos en el

de humedad-sequedad y 10 en el de cristalización de sales.

La *metodología* seguida en cada uno de los ensayos se haya descrita en ESBERT et al., 1987, y ESBERT et al., 1990.

En el caso de los ciclos de cristalización de sales, al final del ensayo se lavaron las muestras con agua destilada con el fin de eliminar las sales.

Para la *evaluación* del comportamiento de las piedras tratadas a lo largo de los ciclos, se utilizaron criterios basados en la variación del color, en la observación de las modificaciones de la superficie de las probetas y en los cambios de peso experimentados por las muestras. Estos dos últimos aspectos son también indicativos de la durabilidad del material, puesto que las probetas sólo fueron tratadas por una cara.

De acuerdo con los datos de la tabla II se puede deducir que, al aplicar los productos de tratamiento, los cambios de color experimentados por la piedra no son muy evidentes, y tampoco hay grandes diferencias entre los distintos tratamientos. En general, en todos los casos se produce un ligero amarilleamiento de las muestras.

Las variaciones de color, después de los ensayos de envejecimiento, se recogen en la tabla III.

TABLA III

**Variaciones de color de la piedra de Vilafranca tratada y envejecida artificialmente**

Tratamiento	U.V.	Hum.-seq.	C. sales
P B72+DF 104	10 YR 8/2 2.5 y 8/2 white	10 YR 8/3-8/4	10 YR 8/3
W OH y 290L	10 YR 8/2 2.5 Y 8/2	10 YR 8/3-8/4	10 YR 8/2
T V y HL-100	10 YR 8/2 2.5 Y 8/2	10 YR 8/3	10 YR 8/2 2.5 Y 8/2

De dicha tabla se deduce que después de 40 ciclos de *exposición a la luz ultravioleta*, y para

todos los tratamientos, el color de las probetas se aclara. También hay un cambio de color hacia



tonos más claros en el caso del ensayo de cristalización de sales, si bien más ligero que en el ensayo anteriormente mencionado.

Sin embargo, cuando las muestras se someten a ensayos de humedad-sequedad los colores tienden a oscurecerse.

De todos modos, en ningún caso, después de los ciclos, los cambios de color son acusados.

En cuanto a los cambios morfológicos y a las medidas de pérdida de peso, se puede afirmar que:

En el ensayo de *humedad-sequedad* no se produce ningún cambio aparente en las superficies de las probetas, ni en las tratadas, ni en las que no lo fueron.

Las pérdidas de peso detectadas son, en concordancia con lo que se acaba de exponer, muy bajas, variando ligeramente según el tratamiento. En el tratamiento en que el consolidante es la resina acrílica, la pérdida es despreciable, no superando el 0.1 por 100. En los tratamientos en los que el consolidante es el silicato de etilo, la pérdida es de aproximadamente el 0.6 por 100, lo que puede ser debido a la no completa reacción, hasta ese momento, del silicato de etilo (ESBERT et al., 1989).

Los *ciclos de cristalización de sales* resultan mucho más agresivos. Desde los primeros ciclos se observa un deterioro progresivo en las zonas de las probetas que no han sido tratadas (fig. 9). Sin embargo, en las partes tratadas el compor-

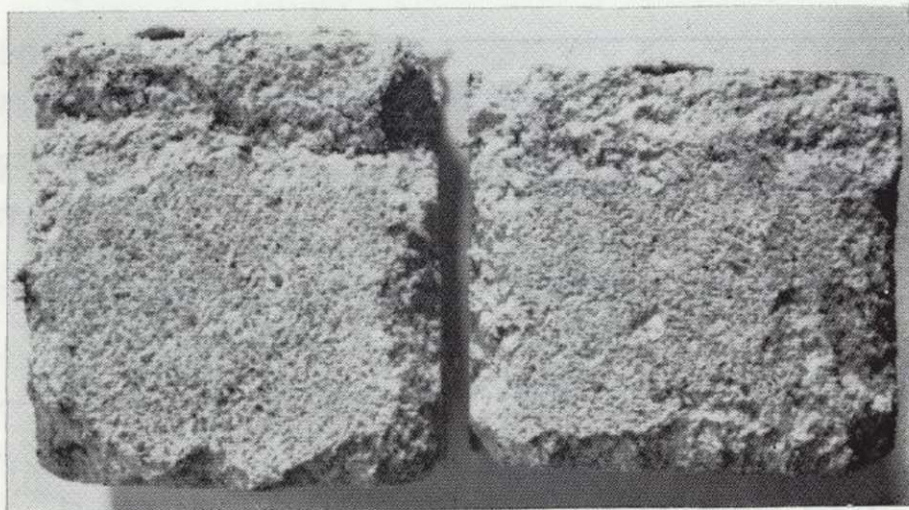


Figura 9.—Aspecto de dos caras no tratadas de probetas de la piedra de Vilafranca, después de 10 ciclos de cristalización de sales. Puede observarse un importante deterioro.

tamiento varía mucho de un tratamiento a otro (fig. 10).

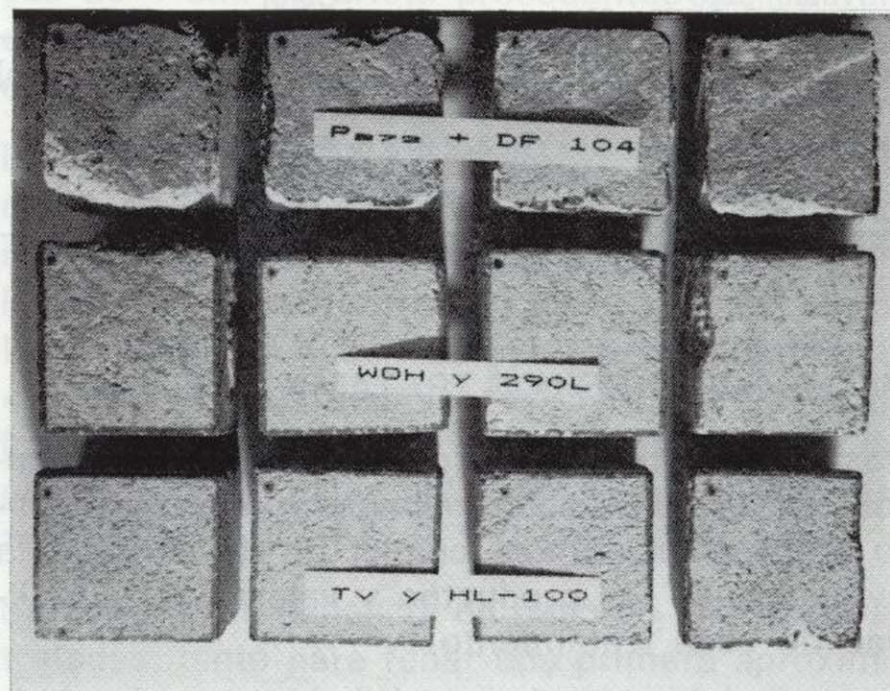


Figura 10.—Conjunto de probetas de piedra de Vilafranca, tratadas con diversos productos y sometidas al ensayo de cristalización de sales. Pueden observarse las diferencias de comportamiento en relación con los distintos tratamientos aplicados.

El mayor grado de deterioro lo presentan las probetas tratadas con el sistema *P B72 y DF 104*. Las caras tratadas se deterioran y la capa de tratamiento se despega, separándose del resto de la probeta (figs. 11 y 12). Este tratamiento con el grado de dilución aplicado no ha pasado de formar una película superficial (tabla I). Por tanto, la evolución de la pérdida de peso se refiere, en la práctica, a la piedra no tratada y coincide con la evolución descrita por otros autores (por ejemplo, NIESEL, 1978).

Las superficies de las probetas tratadas con los otros dos sistemas permanecen intactas después de 10 ciclos de cristalización de sales.

Sin embargo, en el conjunto de la probeta se marca el comportamiento diferencial acusado entre la zona hasta la que ha penetrado el tratamiento con relación al resto (fig. 13).

En todos los casos el hecho más destacable es la *separación* de las partes tratadas de la piedra de las no tratadas, durante los últimos ciclos de cristalización. Este hecho se produce antes en las probetas tratadas con *W OH y 290L*, que en las tratadas con *T V y HL-100*.





Figura 11.—Probetas después de los ciclos de cristalización de sales, en las que se aprecia una de las caras sin tratar (parte superior) y otra tratada (frontal) con PB 72+DF 104. Resalta la separación de esta última del resto del material.



Figura 13.—Probeta tratada con WOH y 290 L, después de los ciclos de cristalización de sales. Debido a la presencia de éstas, se produce una separación (fragmentación) de la piedra entre la parte impregnada y el resto no impregnado.

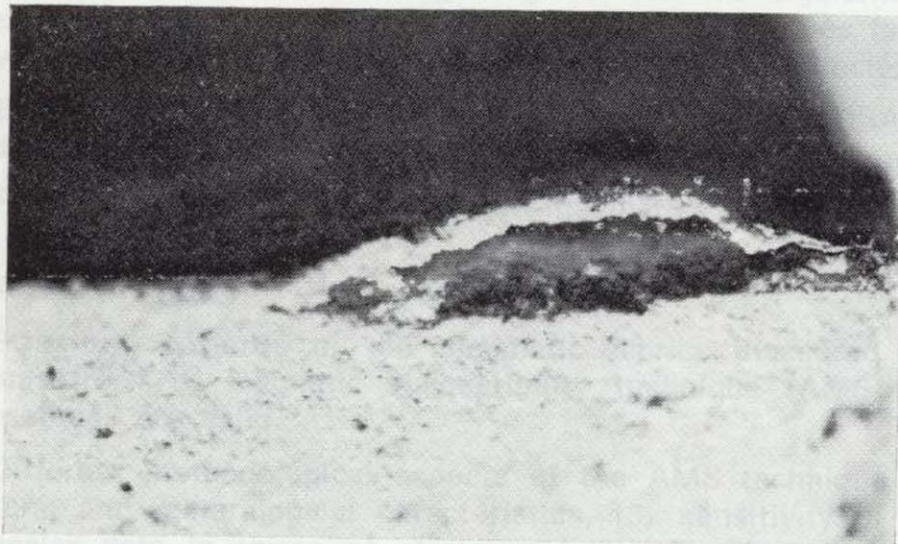


Figura 12.—Detalle de la anterior. Se observa el abombamiento y separación en el límite entre la parte tratada y el resto de la probeta.

Este hecho es debido, probablemente, a la acumulación de sales a lo largo de los ciclos que, al hidratarse, ejercen una presión en la interfase piedra tratada - piedra sin tratar. Desde el punto de vista práctico este hecho es de suma importancia en el caso de la consolidación o protección de un material pétreo de un monumento y nos indica que, si previamente no se eliminan las sales que eventualmente pueden encontrarse en

su interior, podrían producirse daños notables en la piedra. Estos tenderían a la descamación o desplazación del material, produciéndose un deterioro que podría ser incluso mayor que el que se intenta paliar con el tratamiento. Algo similar ha sido indicado por otros autores (por ejemplo, ALESSANDRINI et al., 1987).

#### AGRADECIMIENTOS

A la Comisión de Investigación de Ciencia y Tecnología, CICYT (Proyecto núm. 485/88), titulado «Materiales pétreos de construcción utilizados en el patrimonio monumental de Catalunya. Criterios para su conservación y restauración»; a los arquitectos M. Hernández Cros y R. Vila; y a la empresa Closa Alegret, S. A., responsables de las obras de conservación llevadas a cabo en el edificio de La Pedrera.

#### REFERENCIAS

ALESSANDRINI, G.; PERUZZI, R.; BUFINI, R., y DASSU, G. (1987): *Chiesa di S. Agostino a Bergamo, Documento interno*. Centro C. N. R., «G. Bozza», R. P. 83/II/087, pp. 130-134.



ALONSO, F. J.; ESBERT, R. M., y ORDAZ, J. (1987): *Comportamiento hídrico de calizas y dolomías*. Bol. Geol. y Min., 98, pp. 555-576.

CASTRO, E. DE (1979): *Evaluation de l'hygroscopicité des pierres*. 3rd. Int. Cong. on Deterioration and Preservation of Stone, Venecia, pp. 183-194.

ESBERT, R. M.; GROSSI, C. M., y MARCOS, R. M. (1987): *Estudios experimentales sobre la consolidación y la protección de los materiales calcáreos de la catedral de Oviedo (II Parte)*. Materiales de Construcción, vol. 37, n. 208, pp. 13-21.

ESBERT, R. M.; GROSSI, C. M.; VALDEON, L.; ORDAZ, J.; ALONSO, F. J., y MARCOS, R. M. (1989): *Studies for stone conservation at the cathedral of Murcia (Spain). La Conservazione dei Monumenti nel Bacino Mediterraneo*. I Int. Symp., Bari, pp. 437-441.

ESBERT, R. M.; GROSSI, C. M.; VALDEON, L.; ORDAZ, J.; ALONSO, F. J., y MARCOS, R. M. (1990): *Estudios de la*

*boratorio sobre la conservación de la piedra de la catedral de Murcia*. Materiales de Construcción, vol. 40, n. 217, pp. 5-15.

GODDARD, E. N.; TRASK, P. D.; DE FOD, R. K.; ROVE, O. N.; SINGEWALD, J. I., y OVERBECK, R. M. (1979): *Rock Color Chart*. The Geological Society of America, Boulder, Co., USA.

LAZZARINI, L., y LAURENZI-TABASSO, M. (1986): *Il restauro della pietra*. Dott. Antonio Milani Edit., Padova, 320 pp.

NIESEL, K. (1978): *L'évolution de la diminution de la masse comme base pour l'évaluation de l'essai de cristallisation*. Proc. Int. Symp. on Deterioration and Protection of Stone Monuments, París, 3.5, 13 pp.

ORDAZ, J.; ESBERT, R. M.; ALONSO, F. J.; RUIZ DE ARGANDOÑA, V. G., y RODRIGUEZ REY, A. (1989): *Petrophysical characterization and deterioration of the stones of «La Pedrera» (Barcelona, Spain). La Conservazione dei Monumenti nel Bacino Mediterraneo*. I Int. Symp., Bari, pp. 271-274.

Original recibido: Febrero de 1991.

Original aceptado: Marzo de 1991.

## El Batolito granítico de Cabeza de Araya (Extremadura): comparación de sus estructuras magmáticas y magnéticas.

Por M. AMICE (\*),

J.-L. BOUCHEZ (\*), A. ARANGUREN (\*\*), F. ALVAREZ (\*\*\*) y J.-L. VIGNERESSE (\*\*\*\*)

### RESUMEN

Con el fin de avalar la aplicación de la técnica de la anisotropía de susceptibilidad magnética (ASM) a las rocas magmáticas, se presenta aquí un estudio comparativo de los datos estructurales de campo y de ASM obtenidos en el plutón de Cabeza de Araya. La similitud de los mapas estructurales realizados a partir de datos de campo y de ASM demuestra la fiabilidad de las medidas obtenidas por cada uno de los dos métodos.

Se discuten detalladamente los aspectos metodológicos de la ASM: (1) representatividad del muestreo; (2) características estructurales y mineralógicas de la roca; (3) sensibilidad del aparato de medida; (4) validez de la utilización de los datos escalares de la ASM. A pesar de que son muchos los factores que pueden afectar a la precisión y/o validez de las medidas (tamaño de grano, influencias magnéticas parásitas, ...), en conjunto, se pone de manifiesto una homogeneidad estructural que permite avanzar que las diferentes fuentes de incertidumbre son despreciables en una primera aproximación.

Los principales resultados geológicos son los siguientes: (1) existe una organización estructural N 130° E, paralela al eje del plutón; (2) el emplazamiento de las diferentes facies se produjo en un mismo contexto magmático y cinemático; y (3) localización de una zona principal de alimentación al sur del plutón.

Este estudio, junto a los datos gravimétricos de AUDRAIN et al. (1989), constituye un paso necesario en la elaboración de un modelo de emplazamiento del plutón de Cabeza de Araya.

*Palabras clave:* Granito, Estructura magmática, Anisotropía de susceptibilidad magnética, Extremadura, España.

### ABSTRACT

Structural patterns of the magmatic fabrics measured in the Cabeza de Araya batholith both in the field and by the anisotropy of magnetic susceptibility technique (AMS) are presented. Their maps are very similar, implying that both methods are valid.

Different methodological aspects of the AMS technique are discussed: (1) sampling representativeness, (2) rock structural and mineralogical characteristics, (3) sensitivity of the measurement apparatus, and (4) validity of using the AMS scalar data in terms of strain analysis. The homogeneous structural patterns derived from AMS data suggest that, to a first order approximation, factors that may reduce precision of measurements (large grain size, parasitic contributions to the magnetic fabric) are negligible.

Main geological results are: (1) an overall pattern oriented at N 130° E, parallel to the axis of the pluton, (2) a magmatic and kinematic continuum during emplacement of all compositional units, and (3) a main feeder zone, or root, in the southern part of the batholith.

In conjunction with gravimetric data (AUDRAIN et al., 1989), that are briefly compared with the structural data, this study appears as a necessary step toward the elaboration of an emplacement model for the Cabeza de Araya batholith.

*Key words:* Granite, Magmatic structure, Anisotropy of magnetic susceptibility, Extremadura, Spain.

(\*) Laboratoire de Péetrophysique et Tectonique. Université Paul Sabatier. 38 rue des Trente-Six Ponts. 31400 Toulouse, France.

(\*\*) Departamento de Geodinámica. Universidad del País Vasco. Apartado 644. 48080 Bilbao. España.

(\*\*\*) Departamento de Geología. Universidad de Salamanca. Plaza de la Merced, s/n. 37008 Salamanca. España.

(\*\*\*\*) Laboratoire de Tectonophysique. Université de Nantes. 2 rue de la Houssinière. 44072 Nantes. Cédex 03. France.

## 1. INTRODUCCION

Los estudios estructurales sobre granitoides no deformados en estado sólido han sido escasos debido, principalmente, a la imprecisión que es habitual en las medidas directas realizadas sobre este tipo de materiales. Esta dificultad viene motivada, a la vez, por la débil anisotropía de las rocas magmáticas y por la necesidad de disponer de buenos afloramientos que permitan la observación en tres dimensiones. La técnica de la anisotropía de susceptibilidad magnética (ASM), cuyas principales aplicaciones en geología han sido resumidas por BORRADAILE (1988), permite obtener fácilmente medidas estructurales en los granitoides. La ASM está considerada desde hace tiempo como de gran utilidad en geología estructural (GRAHAM, 1954; DALY, 1970); sin embargo, su aplicación al estudio de granitoides se ha realizado de forma tímida (KING, 1966; ELLWOOD & WHITNEY, 1980, entre otros) por la falta de estudios comparativos entre sus resultados y los obtenidos mediante datos estructurales de campo, en particular de las estructuras lineares. Recientemente, sin embargo, se han realizado algunos trabajos de esta índole en el macizo hercínico francés, sobre pequeños plutones graníticos (GUILLET et al., 1983; LAUNEAU et al., 1989), y, localmente, sobre macizos de gran superficie (JOVER y BOUCHEZ, 1986).

Con el fin de avalar la utilización de la ASM como técnica de estudio de granitoides, o al menos de algunos de ellos (ver Discusión), presentamos un estudio comparativo de las medidas estructurales clásicas de campo y las medidas de ASM obtenidas en el plutón de Cabeza de Araya, cuya superficie está próxima a los 1.000 kilómetros cuadrados. Después de describir y situar el plutón en su contexto geológico, presentaremos sucesivamente el estudio de campo y el estudio de ASM y haremos una comparación de los resultados obtenidos por ambos métodos. La discusión tratará sobre ciertos problemas metodológicos y sobre los principales resultados obtenidos.

## 2. ENCUADRE GEOLOGICO

El plutón tardi-hercínico de Cabeza de Araya, situado en la provincia de Cáceres (fig. 1), forma

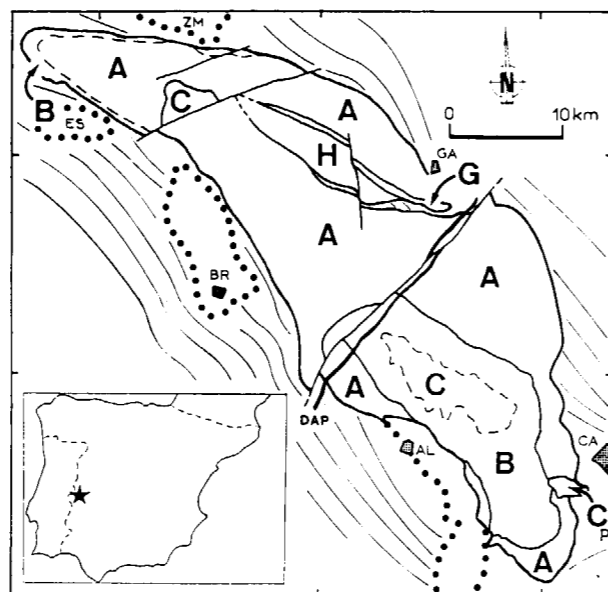


Figura 1.—Cartografía esquemática y localización del plutón de Cabeza de Araya. Se ha señalado la traza de la esquistosidad del encajante precámbrico (Complejo esquistograuváquico).

*Facies petrográficas* (según CORRETGE, 1971, modificadas): A, Facies con megacrístales. B, Facies de grano grueso con dos micas. C, Facies de grano fino con dos micas (moscovita dominante). Cp, Facies de tipo C del pequeño macizo de Corchuela. H, Facies heterogénea, mezcla de A. y sobre todo, de B y C, con fuerte alteración deutérica. G, Facies de microgranito con granate. DAP, Dique de Alentejo-Plasencia (diabasa).—*Trazo punteado*: límite progresivo (centro) o mal definido (norte).—*Trazo grueso*: límite neto.—*Puntos negros*: límites de los macizos satélites (Arroyo de la Luz, AL, Brozas, BR, Estorninos, ES, Zarza la Mayor, ZM).—*Localidades*: CA, Cáceres. GA, Garrayillas.

parte del Dominio de Pliegues Verticales de la Zona Centro Ibérica (DIEZ-BALDA et al., 1990). Presenta una forma aproximadamente elíptica y alargada según una dirección N 130° E, y está emplazado en una secuencia metapelítica epizonal perteneciente al complejo esquistograuváquico, de edad precámbrica, sobre la que reposa discordante la serie paleozoica (Ordovícico-Viseense) del sinclinal de Cáceres. El conjunto metamórfico está afectado por pliegues de plano axial subvertical de dirección media N 130° E, que, salvo en las formaciones masivas, cuarcíticas o areniscosas, del sinclinal de Cáceres, llevan asociada una esquistosidad penetrativa. Este

tipo de estructura es característica de la fase D<sub>1</sub> hercínica en esta región, que, precisamente por ello, se denomina «dominio sur» o «dominio de pliegues verticales» de la Zona Centro-Ibérica (DIEZ-BALDA et al., op. cit.). El sinclinal de Cáceres está interrumpido por el plutón y en algunos sectores se puede observar cómo el contacto de éste corta netamente la esquistosidad S<sub>1</sub> del encajante.

En el contexto de los granitoides hercínicos del macizo hespérico, el plutón de Cabeza de Araya es intermedio entre los términos alcalinos de la serie palingenética y los términos calco-alcalinos de la serie híbrida (CORRETGE, 1983). En él se reconocen tres facies principales, definiendo una zonación petrográfica centrípeta, que fueron puestas de manifiesto por CORRETGE (1971). Estas son, desde la periferia al interior del plutón (figura 1): la *facies A*, o granito con megacrístales de feldespatos potásico; la *facies B*, o granito de dos micas de grano grueso; y la *facies C*, o leucogranito de dos micas (con moscovita dominante), localmente aplítico. Además de estas tres facies principales se pueden reconocer una cuarta (*facies H*), consistente en una mezcla a todas las escalas de las facies A, B y C, que ha sufrido una fuerte alteración deutérica (PEREZ DEL VILLAR y MINGARRO, 1988), y una quinta (*facies G*), de microgranito con granate, que se presenta como un dique de 20 kilómetros de largo por 0,5 kilómetros de ancho, de dirección N 120° E, y que constituye la facies más tardía si se exceptúan ciertos filones.

Con el fin de completar el estudio estructural y modelizar el emplazamiento del plutón de Cabeza de Araya se realizó una campaña gravimétrica, cubriendo este plutón y sus macizos satélites con 760 medidas de campo. La malla, de 1 punto por 2 kilómetros cuadrados, es suficiente en relación con la escala de variación de facies.

El análisis gravimétrico (AUDRAIN et al., 1989) proporciona un modelo de forma tridimensional (fig. 2) en el que se observa un fuerte enraizamiento del plutón: (i) la base granítica está a más de 4 Km. de profundidad bajo el 40 por 100 de su superficie de afloramiento y a más de 8 Km. bajo el 8 por 100 de esta superficie; (ii) por otro lado, aparecen netamente señaladas dos zonas de enraizamiento, uno al SE, donde dos raíces principales alcanzan 10 y 11 Km. de profun-

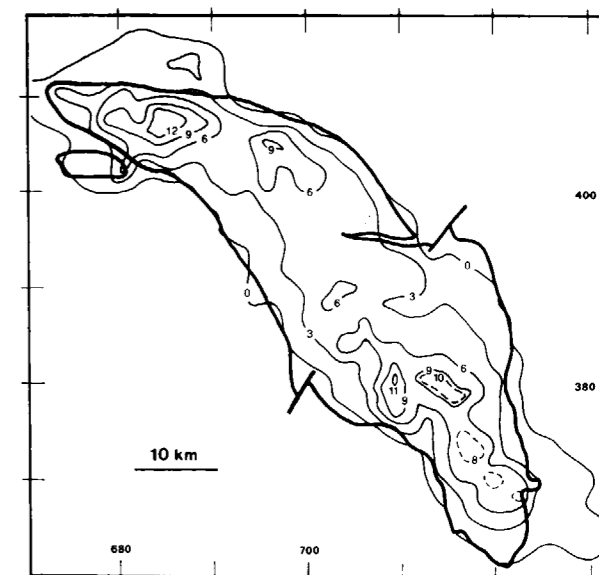


Figura 2.—Mapa simplificado de la profundidad de la base granítica del plutón (isobatas en Km) obtenido del estudio gravimétrico de AUDRIAN et al. (1989). Comparar las zonas de enraizamiento con los mapas de lineaciones magmáticas (fig. 4) y magnéticas (fig. 7).

dididad, y otra al NO, donde existe una raíz muy importante que sobrepasa los 12 Km. Estas dos raíces aparecen unidas a través de un pasillo de relativa poca profundidad (aprox., 5 Km.), y se disponen simétricamente respecto al centro del plutón. Estas zonas de enraizamiento coinciden espacialmente con áreas donde aparecen lineaciones fuertemente buzantes y se interpretan como zonas de alimentación del macizo. Con respecto a las paredes del plutón, destaca la fuerte inclinación (> 60°) que presentan los límites NE y SO, paralelos a las zonas de enraizamiento, y la suave inclinación (< 40°) que se observa a lo largo del borde NO, así como en el extremo SE, donde este hecho sugiere la prolongación del granito debajo del encajante.

## 3. ESTUDIO ESTRUCTURAL DEL PLUTON A PARTIR DE LOS DATOS DE CAMPO Y EL ANALISIS DE LAS MICROESTRUCTURAS

Para realizar este estudio se han analizado 420 estaciones, de las cuales sólo en 364 ha sido posible observar estructuras magmáticas. Las estaciones restantes, situadas principalmente so-



bre la facies C, no muestran su estructura magmática mesoscópica debido a la ausencia de megacristales y al débil contenido en biotita. El análisis estructural en los granitoides se realiza midiendo sobre el terreno las orientaciones planares (foliación) y lineares (lineación) medias de los cristales precoces, planos y/o alargados, que «fossilizan» el flujo del magma durante el período inmediatamente anterior a su completa cristalización (OERTEL, 1955).

En el plutón de Cabeza de Araya, el plano de foliación magmática está definido según los casos, bien sólo por la biotita (facies B y C), bien por la biotita y el feldespato (facies B), o bien sólo por los megacristales de feldespato (facies A). La lineación magmática está definida por la dirección media de alargamiento de los cristales de feldespato potásico, o por la dirección del eje común de rotación, o eje de zona, de los minerales planos (biotita y feldespato). Las medidas de lineación son generalmente muy delicadas de efectuar sobre el afloramiento, ya que para ello se necesita disponer de superficies naturales orientadas paralelamente, o casi paralelamente, a la foliación magmática. A pesar de esta dificultad, se han buscado sistemáticamente las lineaciones en todas las estaciones con el fin de poder compararlas con las direcciones de-

ducidas de la anisotropía magnética. Asimismo, se ha puesto de manifiesto el carácter linear, planar o plano-linear de la fábrica para compararlo con la forma del elipsoide de anisotropía magnética:

(i) Cuando los minerales están claramente dispuestos alrededor de un eje, la lineación se marca relativamente bien y el plano de foliación es difícil de definir, la fábrica ha sido considerada como *linear* (fig. 3a).

(ii) Cuando el plano medio de distribución de minerales está bien definido y sobre él existe además una lineación, la fábrica ha sido considerada como *plano-linear* (fig. 3b).

(iii) Por último, cuando sobre el plano de foliación no se observa una orientación linear preferente, la fábrica ha sido considerada *planar* (figura 3c).

En general, las texturas mesoscópicas y las microestructuras ponen de manifiesto que las diferentes facies han adquirido su anisotropía antes de la cristalización total del granito. El carácter eminentemente magmático de las microestructuras queda evidenciado por la ausencia casi generalizada de deformación intracristalina del cuarzo y, en menor medida, de los feldespatos. Sin

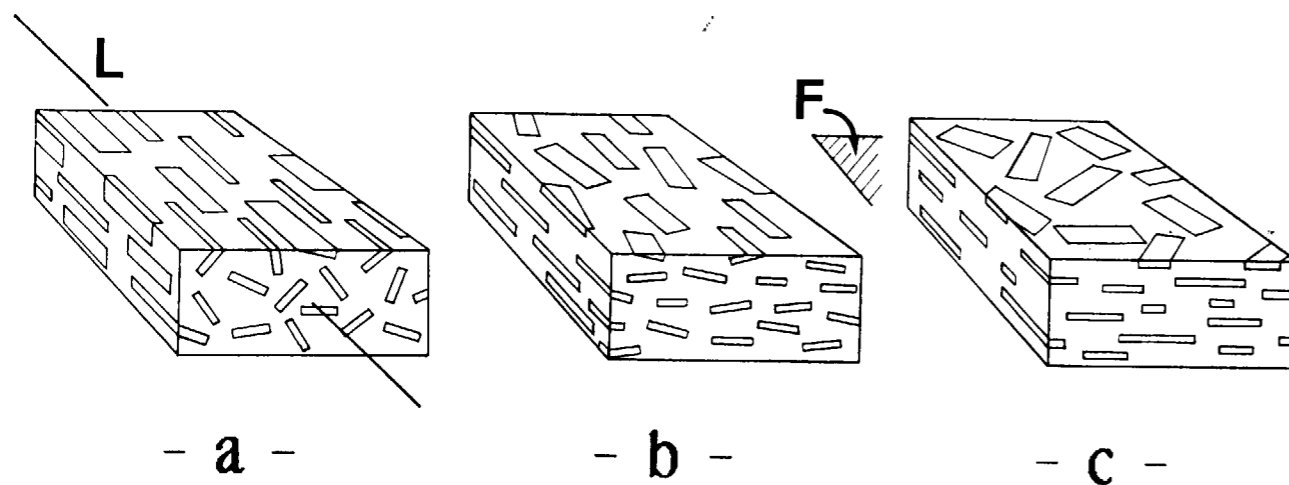


Figura 3.—Esquema de los tres tipos de fábricas magmáticas: (a) *Linear*: Los marcadores se disponen en zona alrededor de la lineación [L]. (b) *Plano-linear*: El plano medio de aplastamiento está bien definido (foliación magmática [F]), y existe una orientación preferente de los ejes largos de los marcadores en ese plano. (c) *Planar*: Los marcadores señalan claramente la foliación magmática [F], pero no existe orientación preferente de sus ejes largos. El tipo de fábrica depende del régimen y del mecanismo de la deformación magmática, así como de la forma de los marcadores.

embargo, en algunos sectores hay evidencias locales de deformación en estado sólido: este es el caso de la clara ortogneisificación de la facies A que, a lo largo de una banda de 1 a 2 m. de espesor, se observa en el contacto del pequeño macizo de Corchuela (Cp en la fig. 1); otros ejemplos son el de las facies miloníticas existentes al NE de Brozas, en el límite del plutón, y el de las milonitas aparentemente generadas por la intrusión de la facies G en la facies A (fig. 1).

Las estructuras de campo representadas en la figura 4 corresponden a rocas deformadas solamente en el estado magmático. En los diagramas de orientación de dicha figura, en la que se han suprimido los contornos inferiores al 1 por 100, se pone de manifiesto que existe una orientación preferente de las lineaciones en torno a la dirección N 130° E, es decir, paralelamente al eje del plutón. Las lineaciones se inclinan mayoritariamente hacia el E, siendo su orientación media de 137° SE 21°. Los planos de foliación están dispuestos en zonas alrededor de esta lineación media y presentan en su mayoría un buzamiento medio a fuerte; la dirección media calculada para las foliaciones es 139° NE 54°. La distribución sobre el mapa de las lineaciones magmáticas (fig. 4) muestra las siguientes características.

En la mitad sur del plutón, cerca del límite SE, las lineaciones se inflexionan claramente hacia la dirección N 90° E, con inclinaciones medias (<45°) hacia el este; allí, las lineaciones son claramente oblicuas al contacto entre el granito y su encajante. Esto sugiere que el granito se prolonga hacia el SE, debajo de la secuencia epimetamórfica. Por el contrario, a lo largo del límite SO del plutón, y en las proximidades de la facies C, las lineaciones están fuertemente inclinadas. De modo general se observa que las facies A y B presentan en conjunto la misma orientación, aunque, localmente, pueden ser discordantes de un lado al otro del contacto A/B. Esto sugiere que existe una discontinuidad magmática entre ambas facies.

En la mitad norte las lineaciones son, en general, paralelas al eje del plutón y tienen inclinaciones suaves. Únicamente presentan inclinaciones fuertes (45° a 90°) en algunos puntos de la periferia, cerca de la facies H y del microgranito con gra-

nate (facies G), y sobre todo en la terminación NO del plutón.

Los planos de foliación magmática (fig. 5) buzán, por lo general, fuertemente en los límites del plutón; generalmente son paralelos al contacto con el encajante, excepto en el borde SE, donde se orientan según la dirección E-O, perpendicular al contacto, con fuertes buzamientos que pueden ser tanto hacia el N como hacia el S. Los planos de foliación con buzamientos suaves se sitúan principalmente, para la mitad S del plutón, en su parte NE, y para la mitad N del plutón en su parte SO.

#### 4. ESTUDIO ESTRUCTURAL DEL PLUTÓN A PARTIR DE LOS DATOS DE SUSCEPTIBILIDAD Y ANISOTROPIA MAGNÉTICAS

Este estudio se ha realizado a partir del muestreo y la medida magnética (susceptibilidad y anisotropía) de 230 estaciones. El muestreo se ha efectuado tomando en cada estación dos testigos orientados de 25 mm. de diámetro, mediante una máquina de sondeo portátil; a partir de ellos se han tallado dos muestras de 22 mm. de altura por testigo, obteniendo un total de cuatro muestras por estación, cuyo volumen individual es de aproximadamente 10.8 cm<sup>3</sup> (cilindro de 22 mm. de altura y 25 mm. de diámetro). En la facies con megacristales la toma de muestras se ha realizado de modo que se evitase incluir megacristales en los testigos.

El aparato utilizado para las medidas magnéticas es del tipo Minisep (Molspin®), que permite realizar medidas en campo débil ( $7 \times 10^{-4}$ T) alternativo (10 kHz) y suministra los valores de intensidad y dirección de los tres ejes del elipsoide de susceptibilidad magnética,  $K_{max}$ ,  $K_{int}$  y  $K_{min}$  (HROUDA, 1982; BORRADAILE, 1988). La intensidad de la susceptibilidad retenida por una muestra es  $K = 1/3 (K_{max} + K_{int} + K_{min})$ , y para una estación es la media aritmética de las intensidades de la susceptibilidad de las cuatro muestras. Después de efectuar las correcciones de calibrado del Minisep, las susceptibilidades medias de las facies para el conjunto de las estaciones del plutón expresadas en 10<sup>-5</sup> SI, son las siguientes: *facies A*: 10,3; *facies B*: 5,2; *facies C*: 3,8. Los histogramas de frecuencia de estas susceptibi-

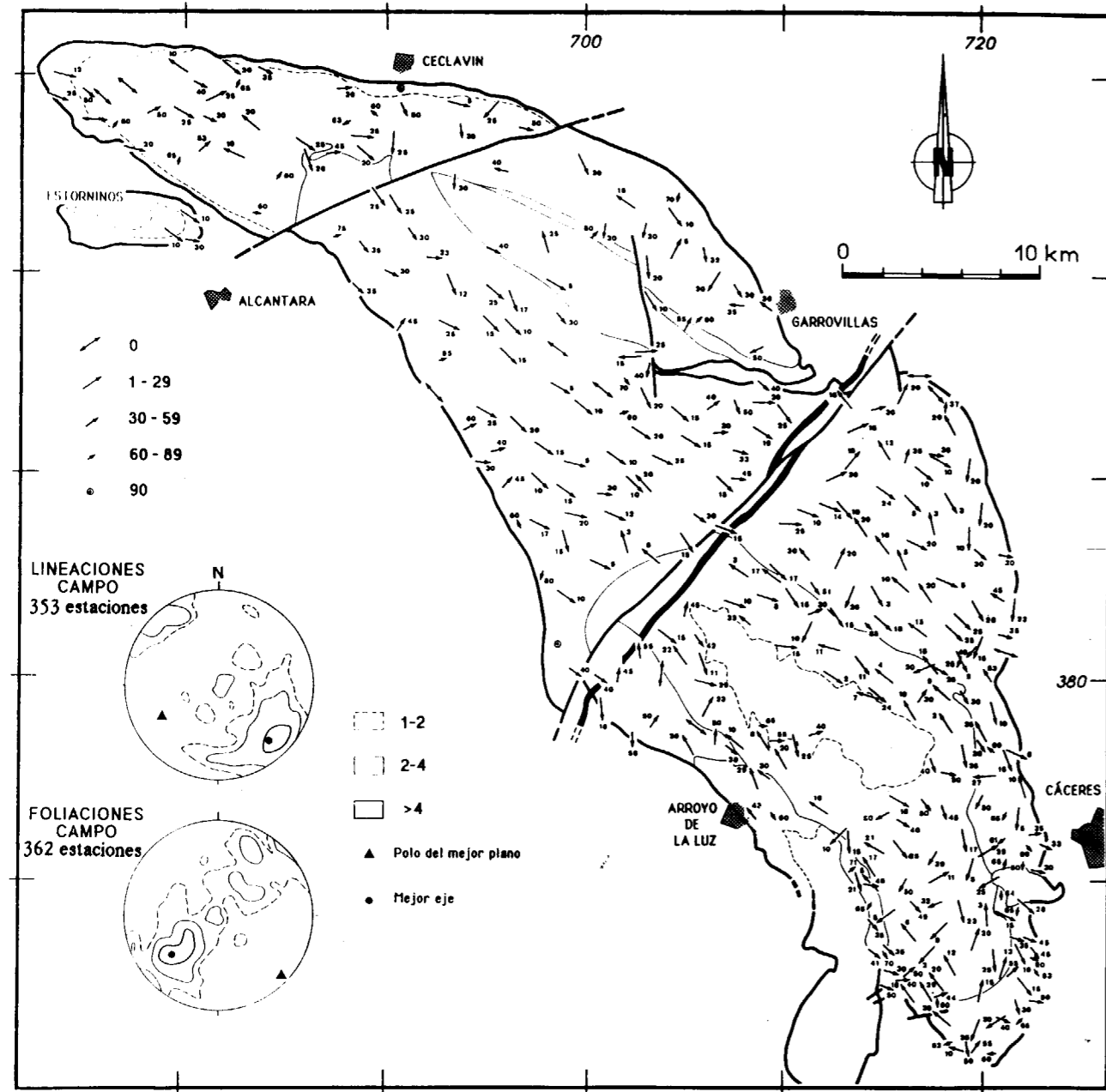


Figura 4.—Mapa de lineaciones magmáticas del plutón de Cabeza de Araya (353 medidas de campo). Los contornos petrográficos son los mismos que en la figura 1.

Obsérvese que la dirección dominante de las lineaciones es NO-SE, y que son oblicuas al contacto granito encajante, en el límite SE del plutón. Las medidas efectuadas sobre la facies C son poco abundantes debido a la dificultad o imposibilidad de realizarlas.—*Estereogramas* (hemisferio inferior; los contornos de <1 por 100 han sido eliminados); las lineaciones están orientadas mayoritariamente en la dirección NO-SE (mejor eje calculado: 137 SE 21); las foliaciones (mejor plano calculado: 139 NE 54), se disponen en zona alrededor de la lineación media.

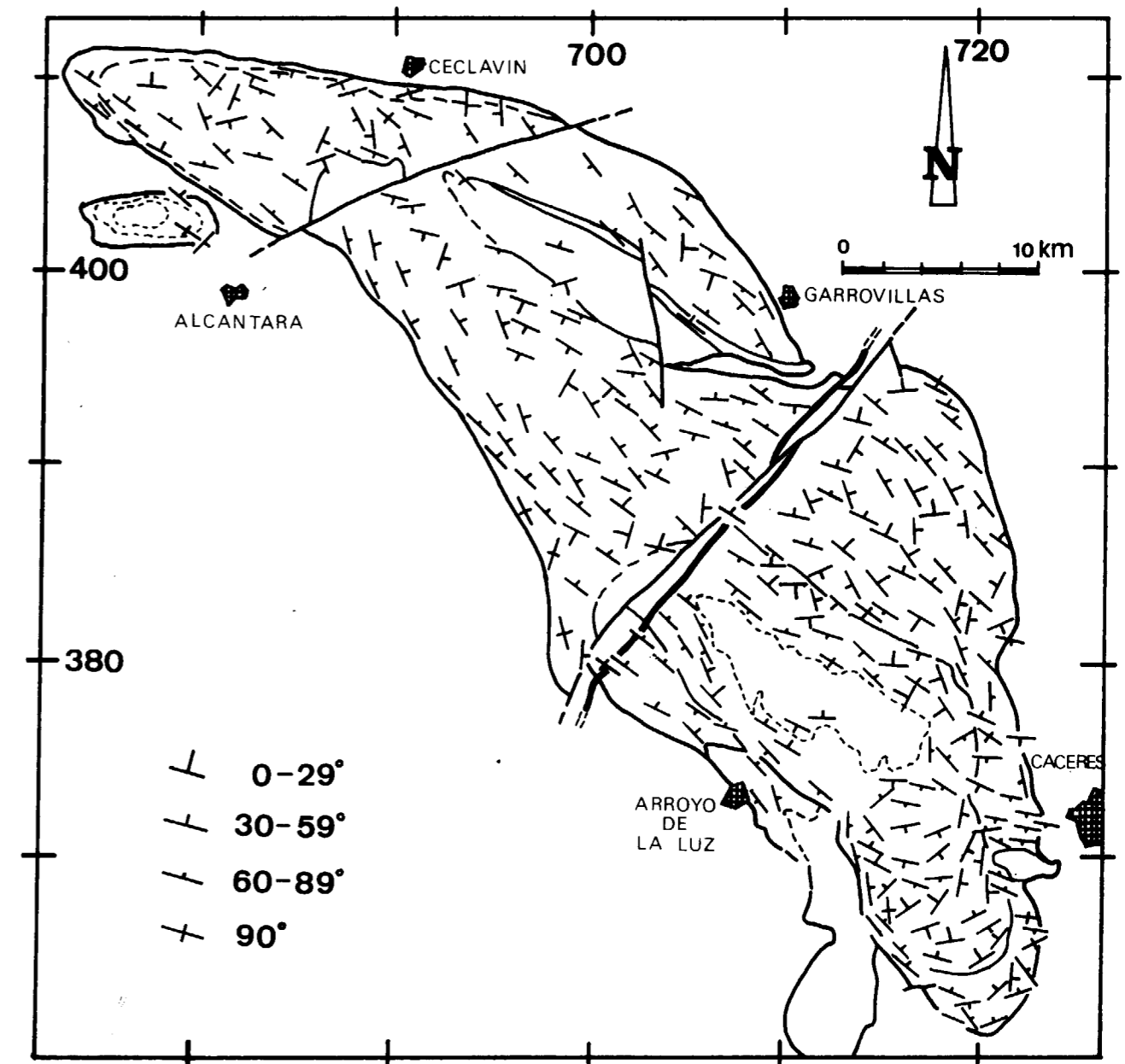


Figura 5.—Mapa de foliaciones magmáticas del plutón de Cabeza de Araya. Marcadores utilizados: megacrystalos de FK para la facies A, biotitas y feldespatos para la facies B. Casi no hay medidas en la facies C debido a la dificultad de apreciar sus estructuras magmáticas en el campo.

lidades, así como su distribución en el mapa, se presentan en el trabajo de AMICE y BOUCHEZ (1989).

En las facies graníticas de Cabeza de Araya la biotita es el principal mineral que contiene hierro. Otros minerales con hierro que localmente

tienen influencia en la susceptibilidad y anisotropía magnéticas de las rocas son: la cordierita (a menudo pinnitizada) en la facies A y el granate en la facies C; por otra parte, la turmalina está presente como mineral accesorio en muchas muestras, principalmente en las de las fa-

cies C. También hay que señalar que la moscovita, que puede ser débilmente ferrífera, aparece en todas las facies en cantidad creciente desde la A hasta la C. Teniendo en cuenta la ausencia de magnetita y de sulfuros en estas rocas, y la reducida presencia de óxidos (Fe+Ti), siempre en cantidades accesorias y en su mayor parte ligados a la cloritización precoz de la biotita (CORRETGE, 1971), se considera que el paramagnetismo de los silicatos ferríferos es el principal responsable a la vez de la susceptibilidad y de la anisotropía de los granitos. Considerando que la biotita es el silicato ferrífero predominante, es razonable suponer que el elipsoide de ASM es, en una primera aproximación, coaxial con el elipsoide de la fábrica de forma de las micas (ROCHETTE, 1987; BOUCHEZ et al., 1990).  $K_{max}$ , el eje mayor de este elipsoide o lineación magmática, representa entonces la lineación magmática marcada por las micas; el plano perpendicular a  $K_{min}$ , o foliación magnética, representa la foliación magmática.

A) Desde el punto de vista direccional, la orientación de  $K_{max}$  para una estación se obtiene por la media vectorial de los  $K_{max}$  de las cuatro muestras (y del mismo modo se procede para  $K_{min}$ ).

La medida de las desviaciones angulares de las cuatro muestras de una estación se determina por la desviación media de las cuatro  $K_{max}$  (y, respectivamente, de  $K_{min}$ ) a su media (fig. 6).

Los histogramas acumulados de estas desviaciones medias (fig. 6) ponen de manifiesto la variabilidad de las direcciones de  $K_{max}$  y  $K_{min}$  en una misma estación, la cual depende principalmente de la anisotropía intrínseca de la estación considerada (ver apartado 4B). La desviación sobre  $K_{max}$  (y, respectivamente, sobre  $K_{min}$ ) será tanto más débil cuanto más elevada sea la anisotropía lineal (planar para  $K_{min}$ ). Estas desviaciones permiten evaluar la representatividad de las estaciones:

(i) Para aproximadamente el 90 por 100 de las estaciones, la desviación es inferior a 35°; si se considera que la medida no es significativa cuando existan desviaciones mayores de 35°, tanto para  $K_{max}$  como para  $K_{min}$ , sólo pueden ser tenidas como dudosas el 10 por 100 de las estaciones.

(ii) La desviación es inferior a 25° en el 75 por 100 de las estaciones, e inferior al 20 por 100 en el 50 por 100 de las mismas; de este modo, la

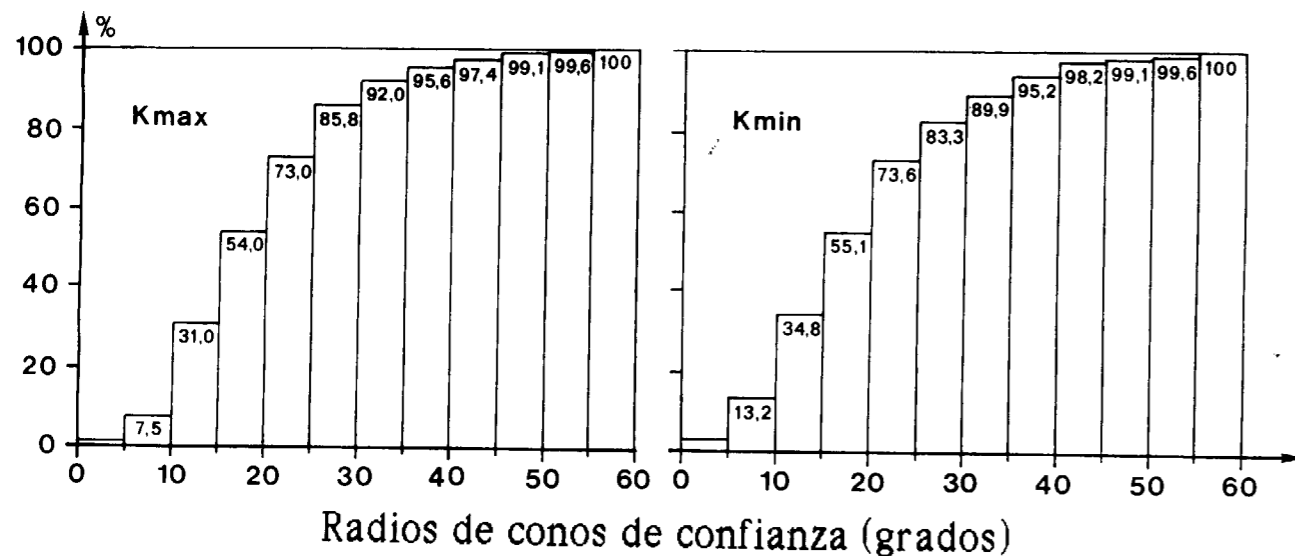


Figura 6.—Medidas direccionales de ASM: frecuencias acumuladas de los radios de los conos de confianza definidos en cada estación alrededor de  $K_{max}$  (lineación magnética) y  $K_{min}$  (polo de la foliación magnética). El radio correspondiente a cada estación representa la media de las desviaciones angulares entre  $K_{max_i}$  (y  $K_{min_i}$ ) individuales ( $i=1$  a 4) de las cuatro muestras de una estación y su media vectorial  $K_{max}$  (y  $K_{min}$ ), de forma que cuanto menor sea su valor, mayor es la validez y el grado de confianza de la medida. El 90 por 100 de las estaciones presentan un radio inferior a 35°.

medida de la anisotropía puede ser considerada como muy satisfactoria para la mayor parte de las estaciones.

Aparte de la anisotropía intrínseca existen otras causas de desviaciones direccionales para una misma estación que serán tratadas en el apartado de Discusión (metodología: (1), (2) y (3)).

Los estereogramas de  $K_{max}$  y  $K_{min}$  realizados sobre un conjunto de estaciones (fig. 7) confirman el claro predominio de la dirección N 130° E en el plutón. También se pone de manifiesto a primera vista que las foliaciones magnéticas (representadas por los polos de  $K_{min}$ ) buzan habitualmente más que las foliaciones medidas sobre el terreno y que no presentan la disposición en zona de estas últimas. Por el contrario, existe una concentración de  $K_{max}$  en posición subvertical, orientación poco representada en el diagrama de lineaciones magmáticas (fig. 4), que se corresponden con las lineaciones de la facies C que no han podido ser medidas sobre el terreno.

En la mitad sur del plutón las lineaciones magnéticas de dirección N 130° E giran hacia la dirección N 90° E en las proximidades del contacto SE del granito. Las lineaciones con inclinaciones fuertes se localizan principalmente en la facies C y en el borde del plutón. El pequeño macizo leucogranítico de Corchuela (Cp en fig. 1) presenta también lineaciones fuertemente inclinadas con tendencia radial; la discordancia estructural entre este pequeño macizo y su encajante granítico de la facies A subraya su carácter intrusivo y tardío en relación con otras facies que, por otro lado, también se pone de manifiesto con las observaciones de campo. Asimismo, se constata por ambos métodos que las facies A y B están globalmente estructuradas de la misma manera, aunque un examen de detalle permite apreciar que, localmente, existen diferencias notables a un lado y otro del contacto A/B.

En la mitad norte del plutón las lineaciones de fuerte inclinación están situadas a lo largo de los límites del macizo y en una zona próxima a su extremo NO. En la parte oriental del macizo satélite de Estorninos (ES en fig. 1), las lineaciones tienen una inclinación mediana a suave hacia el plutón de Cabeza de Araya y podría suponerse que constituye una apófisis relacionada con el plutón principal.

Los estereogramas de cada facies analizados aisladamente (fig. 8) muestran que la orientación N 130° E y la fuerte inclinación de las foliaciones magnéticas son caracteres comunes de todas las facies. En las facies A y B se observan dos poblaciones de  $K_{max}$ : una que se inclina suavemente hacia el E y otra subvertical. Esta última población corresponde, para la facies A, a las estaciones situadas en el borde del macizo y en su extremidad NO; para la facies B se trata de estaciones situadas en las proximidades de la facies central C. En la facies C se observa un máximo de  $K_{min}$  correspondiente a foliaciones fuertemente inclinadas con direcciones próximas a la dirección NNE-SSO; esta familia forma, con las orientaciones «habituales» del macizo, una corona de  $K_{min}$  en la periferia del diagrama (facies C,  $K_{min}$ ), lo que pone de manifiesto una disposición global en zona alrededor de la lineación magnética subvertical (facies C,  $K_{max}$ ).

B) Desde el punto de vista cuantitativo, se utilizan las intensidades de los tres ejes del elipsoide de ASM, ya que éstos permiten cuantificar la anisotropía magnética de la roca (ver HROUDA, 1987). En el plutón de Cabeza de Araya, donde la susceptibilidad magnética es siempre débil, las intensidades de estos ejes han sido corregidas para eliminar la influencia diamagnética del cuarzo y el feldespato; esta influencia es considerada como isotropa y constante, y su valor es  $D = -1.4 \times 10^{-5}$  SI (ROCHETTE, 1987; BERNIER et al., 1987). De este modo, en este trabajo, se utiliza para describir la anisotropía total, P, la relación  $P = K_{max} \cdot D / K_{min} \cdot D$ ; de manera complementaria se utiliza  $L = K_{max} \cdot D / K_{int} \cdot D$  y  $F = K_{int} \cdot D / K_{min} \cdot D$  para describir, respectivamente, la anisotropía lineal (fig. 9b) y la anisotropía planar (fig. 9c).

Los histogramas de frecuencia de estos valores para el conjunto del macizo se calculan, respectivamente, mediante las relaciones  $P\% = (P-1) \times 100$ ,  $L\% = (L-1) \times 100$  y  $F\% = (F-1) \times 100$ , y se han representado en la figura 9. En ellos puede verse que: (1) la anisotropía total, P%, varía entre el 1 y el 9 por 100, con una gran mayoría de valores entre el 2 y el 5 por 100, y un máximo entre el 2 y el 3 por 100 (fig. 9a); (2) los valores de L son siempre inferiores al 4.5 por 100 y el 70 por 100 de ellos inferiores incluso al 1.5 por 100 (fig. 9b); (3) los valores de F presentan un abanico más amplio, entre el 0 y el 6 por 100,

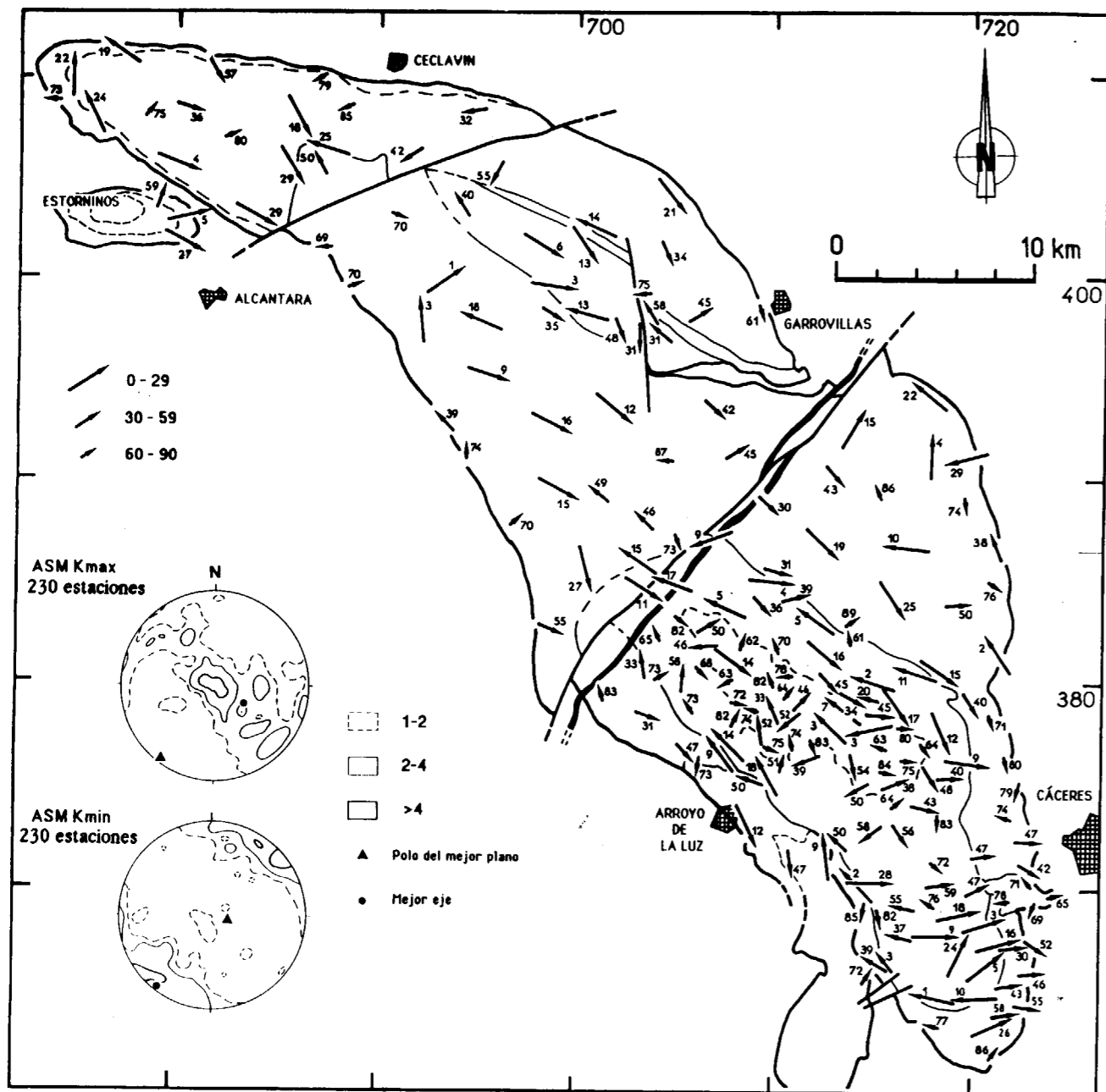


Figura 7.—Mapa de las lineaciones magnéticas (Kmax) del plutón de Cabeza de Araya (230 estaciones). Observar (viendo también fig. 2) la dirección dominante NO-SE y la oblicuidad de los Kmax con el contacto granito-encajante, en el borde SE del plutón. La facies C presenta sus Kmax fuertemente inclinados.—Esteriogranas (hemisferio inferior; contornos de <1 por 100 eliminados); Kmax: Existen dos poblaciones, una de inclinación suave de dirección NO-SE (comparable a los estereogramas de lineaciones de la figura 2) y otra subvertical (correspondiente en su mayor parte a la facies C central). Kmin: La foliación magnética es en conjunto subvertical y de dirección NO-SE; la orientación magnética de las foliaciones no está tan marcada como en la figura 2 (ver Discusión).

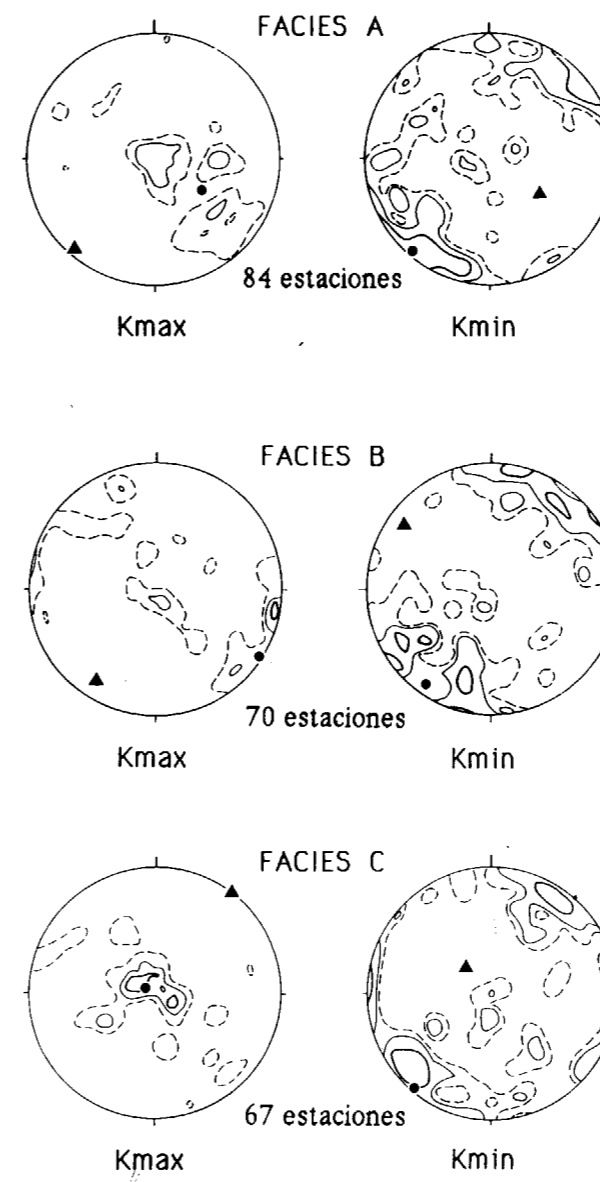


Figura 8.—Esteriogranas de Kmax y Kmin por facies (hemisferio inferior, contornos: 1-2 por 100, 2-4 por 100, >4 por 100).

Con independencia de las facies, la orientación dominante de la foliación magnética (perpendicular a Kmin) es NO-SE, con buzamientos elevados.—Facies A: El diagrama Kmax muestra dos poblaciones; la población fuertemente inclinada corresponde a puntos situados en la periferia y en el extremo N del plutón; la población suavemente inclinada corresponde a puntos del interior del plutón en continuidad con la facies B.—Facies B: La subpoblación de Kmax con fuertes inclinaciones corresponden a puntos situados en la transición con la facies C.—Facies C: Los Kmax son francamente subverticales; los Kmin están repartidos en la periferia del diagrama indicando una foliación subvertical en zona alrededor de la lineación.

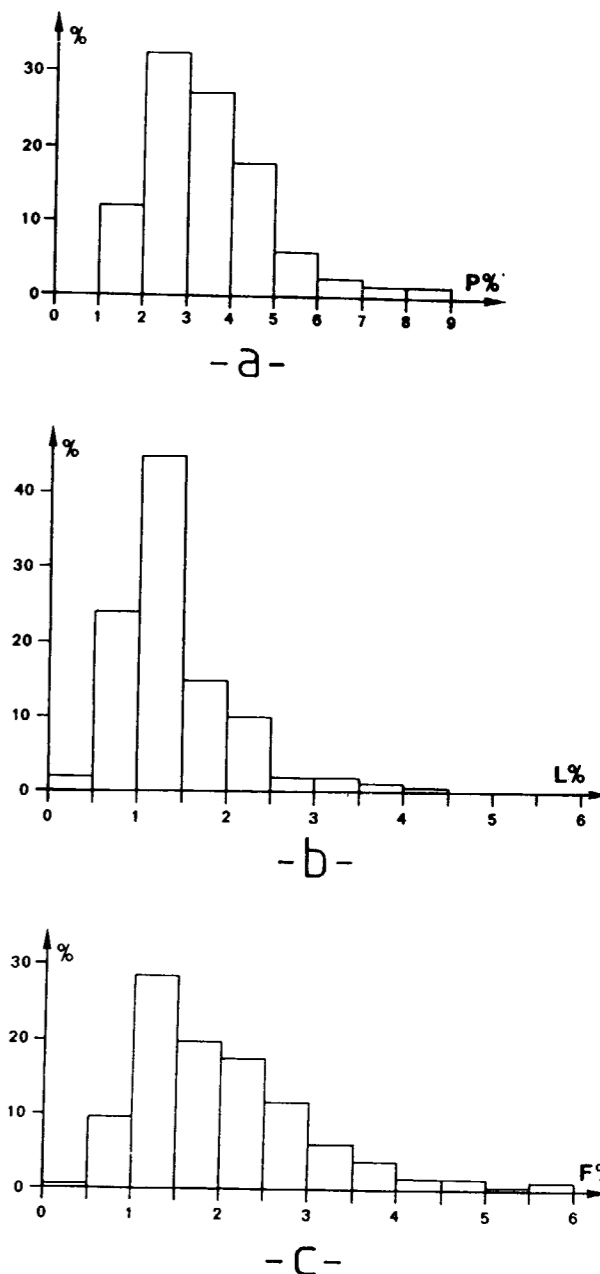


Figura 9.—Histogramas de frecuencia de la tasa de anisotropía de susceptibilidad magnética (ver texto).

- (a) Anisotropía total  $P\% = [(K_{max}-D)/(K_{min}-D)-1] \times 100$ .
  - (b) Anisotropía lineal  $L\% = [(K_{max}-D)/(K_{int}-D)-1] \times 100$ .
  - (c) Anisotropía planar  $F\% = [(K_{int}-D)/(K_{min}-D)-1] \times 100$ .
- D=Influencia diamagnética, considerada como constante e isotropa =  $-1.4 \times 10^{-5}$  SI.

y más del 70 por 100 están comprendidos entre el 1 y el 3 por 100 (fig. 9c). Estos parámetros ex-

presan indirectamente el grado de orientación preferencial de los minerales portadores de imanación (biotita, etc...) (ver Discusión).

Los mapas detallados de estos parámetros de anisotropía son complejos en detalle y, aunque no se presentan aquí (ver AMICE, 1990), queremos destacar de ellos las siguientes características:

(i) Las anisotropías más fuertes con componente lineal ( $P > 4$  por 100 y  $L > 2$  por 100) se localizan principalmente en el límite septentrional del plutón, en el borde SE y, localmente, en la facies C.

(ii) Las anisotropías más fuertes con dominante planar ( $P > 4$  por 100 y  $F > 2$  por 100) se sitúan igualmente en la periferia del plutón, pero, además, en la parte sur del mismo se encuentran a ambos lados de los límites entre las facies A/B y B/C.

## 5. COMPARACION DE LA ANISOTROPIA OBTENIDA POR AMBOS METODOS

En las 115 estaciones en las cuales se han realizado al mismo tiempo medidas de campo y de ASM, la naturaleza lineal, plano-lineal o planar de la fábrica estimada sobre el terreno se ha comparado con las formas del elipsoide de ASM (fig. 10). Para ello se ha utilizado el parámetro de JELINEK (1981),  $T = 2 [\text{Log } F / \text{Log } P] - 1$ , que varía entre  $T = -1$  (elipsoide puramente lineal) y  $T = +1$  (elipsoide puramente planar). Tres modas resaltan claramente sobre el histograma compuesto de la figura 10, disponiéndose de forma aproximadamente simétrica en relación a  $T = 0.15$  (elipsoide ligeramente planar), valor para el cual una fábrica plano-lineal puede ser a menudo reconocida sobre el terreno. Este desfase de moda plano-lineal puede tener dos orígenes:

(i) Una mala estimación de la fábrica sobre el terreno: la naturaleza aproximativa de esta esti-

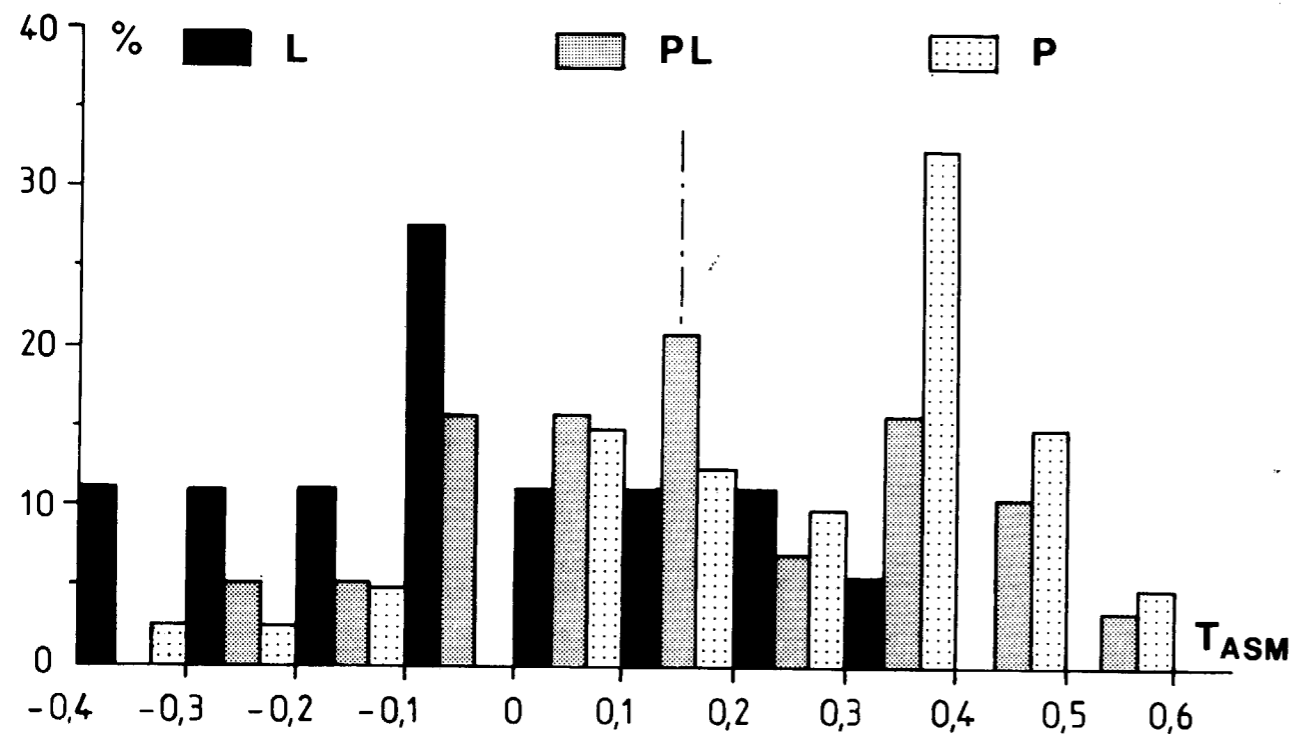


Figura 10.—Histogramas compuestos de correlación entre fábrica lineal/fábrica planar (campo) y  $T_{ASM} = 2 [\text{Log } F / \text{Log } P] - 1$  (JELINEK, 1981).

El tipo lineal (L), plano-lineal (PL) y planar (P) de la fábrica se ha asignado a partir de una estimación sobre el terreno (ver texto). La correlación con  $T_{ASM}$  es débil pero evidente, con PL centrada sobre  $T = 0.15$  (ver Discusión).

mación se refleja entonces por la existencia de tres categorías de fábrica sobre casi todo el dominio de T.

(ii) Una sobreestimación de la anisotropía planar obtenida por la ASM, consecuencia de la anisotropía magnetocristalina planar de la biotita, principal marcador de la susceptibilidad y de la anisotropía (ver Discusión).

## 6. DISCUSION

Este estudio permite constatar que las medidas estructurales clásicas y las medidas de ASM suministran resultados análogos (comparar las figuras 4 y 7). En este apartado vamos a realizar una discusión metodológica sobre la ASM y a continuación pasaremos a presentar los resultados geológicos que se obtienen de este estudio.

A) Desde el punto de vista metodológico, las similitudes estructurales no deben hacer olvidar que la ASM conlleva un cierto grado de incertidumbre debido a varios factores que actúan conjuntamente: (1) la representatividad del muestreo, (2) las características mineralógicas y estructurales de la roca, y (3) a la sensibilidad del aparato de medida; por otra parte, también hay que considerar (4) el grado de validez de la utilización de los valores escalares de la anisotropía magnética.

(1) Con respecto al primer punto, la metodología seguida en este trabajo consiste en determinar la anisotropía de un volumen de roca de aproximadamente  $43 \text{ cm}^3$  (4 muestras provenientes de dos testigos). En las facies de grano fino se puede considerar que tal volumen es representativo. En la facies de megacristales esta suposición está menos justificada, ya que, de hecho, en esta facies se observa siempre una mayor variabilidad de las direcciones obtenidas para cada una de las cuatro muestras. Por otra parte, si la heterogeneidad a la escala de un único testigo es tanto mayor cuanto más grande sea el tamaño de grano (facies A y B), también hay que considerar además la heterogeneidad existente en el propio afloramiento, ya que los dos testigos son tomados a distancias que varían entre 1 y 10 metros.

(2) En los leucogranitos de Cabeza de Araya,

los minerales ferromagnéticos pueden ser considerados como accesorios en comparación con los paramagnéticos. Para asegurar esta suposición habría que realizar medidas de susceptibilidad en campo fuerte, mediante un susceptómetro cryogénico, que permitieran aislar totalmente la contribución paramagnética. Aunque estas medidas no se han realizado, de acuerdo con los trabajos de ROCHETTE (1987), JOVER et al. (1989) y BOUCHEZ et al. (1990), se puede admitir que la contribución paramagnética es la dominante en virtud de los siguientes hechos:

(i) La débil susceptibilidad de los granitos estudiados, siempre inferior a  $14 \times 10^{-5} \text{ SI}$ , y la escasa variación del porcentaje de esta susceptibilidad, tanto de una muestra a la otra como de una facies granítica a otra.

(ii) La débil anisotropía de susceptibilidad ( $P\%$  siempre inferior a 10 por 100), con variaciones regulares de una estación a otra.

Se puede admitir por tanto que la ASM medida en campo débil (como es el caso del presente trabajo) está determinada principalmente por la orientación de los silicatos ferríferos, en particular de las micas. Sin embargo, la fábrica de las micas no refleja necesariamente la fábrica medida sobre el terreno. Esto es particularmente evidente en la facies de megacristales donde, sobre el afloramiento, la orientación preferente que se mide es la de los feldespatos que actúan como objetos rígidos triaxiales, con el eje mayor claramente diferenciado. Por el contrario, las micas son marcadores con simetría de revolución, es decir, con un elipsoide magnetocristalino uniaxial oblató, con  $K_{max} = K_{int} > K_{min}$  (donde  $K_{min}$  es perpendicular al clivaje (001)). Esta diferencia en la morfología de los marcadores podría explicar el carácter más lineal de las fábricas obtenidas mediante observación directa sobre el terreno con respecto a las fábricas magnéticas (fig. 10), ya que los marcadores triaxiales tienen una gran tendencia a oscilar alrededor de los marcadores planos de revolución (micas; ver leyenda fig. 3). Esta propiedad explica también las diferencias entre los diagramas de polos para el conjunto del macizo: clara disposición en zona de los polos de foliación (fig. 4) y ausencia de disposición en zona de los polos de  $K_{min}$  (fig. 7). Por último no se debe excluir que la fábrica de las micas sea diferente a la de los megacristales, ya sea por la existencia de subfá-



bricas debidas a diferencias de forma de los marcadores (FERNANDEZ, 1987), o bien a procesos de reorientación de micas en el seno de los espacios existentes entre los megacristales donde la deformación es heterogénea.

Hay que considerar además la presencia de influencias magnéticas «parásitas». Entre los silicatos ferríferos, la cordierita prismática presente en la facies A, produce una influencia inversa en la anisotropía magnética, debida a que el  $K_{\min}$  magnetocristalino de este mineral es paralelo al alargamiento del prisma (ROCHETE, comunicación personal: medidas sobre monocristales de cordierita de la facies A). Esta influencia inversa es producida también por la turmalina (ROCHETE, 1988), como ha sido puesto claramente de manifiesto en el leucogranito de Gangotri (SCAILLET, 1990). La facies de grano fino (C), que siempre lleva turmalina aunque en escasísima proporción, está también afectada por esta influencia parásita que, sin embargo, no excede de un pequeño porcentaje. Por último, siempre puede aparecer una débil influencia de algunas fases minerales tardías tales como ciertos óxidos (LAPOINTE et al., 1986) o filosilicatos (pinita...) que aquí parecen jugar un papel menor (AMICE y BOUCHEZ, 1989).

De manera más general no hay que olvidar que si intervienen además otros minerales ferromagnéticos, pueden aparecer otras influencias parásitas cuya importancia es poco conocida. En cualquier caso, se ha comprobado que, en el caso del plutón de Cabeza de Araya su papel parece despreciable. En consecuencia, las conclusiones de este trabajo no son extrapolables necesariamente a granitoides que presenten fuertes susceptibilidades ( $K > 50 \times 10^{-5}$  SI) y elevadas tasas de anisotropía ( $P\% > 30$ ) (ROCHETTE, 1987). Esta extrapolación puede ser justificada, sin embargo, cuando, en presencia de una influencia ferromagnética demostrada (JOVER et al., 1989) o sospechada (DIOT y BOUCHEZ, 1989), existe una homogeneidad estructural entre rocas de susceptibilidades muy diferentes. En este caso el elipsoide de susceptibilidad de los minerales paramagnéticos es probablemente coaxial con el elipsoide de susceptibilidad de los minerales ferromagnéticos.

(3) La sensibilidad del aparato de medida influye de igual modo para rocas débilmente susceptibles y débilmente anisótropas. El aparato

utilizado para este trabajo es del tipo Minisep (Molspin®) y permite realizar medidas con una sensibilidad del orden de  $10^{-7}$  SI. En estas condiciones, a partir de las muestras menos susceptibles del plutón (facies C  $\approx 3 \times 10^{-5}$  SI), sólo se pueden poner de manifiesto anisotropías superiores al 1 por 100. De hecho, aunque  $P\%$  es siempre superior al 1 por 100 (fig. 9c), el aparato se ha utilizado en condiciones próximas al límite de su sensibilidad. Para un estudio más exacto se necesitaría usar un susceptómetro más sensible.

(4) En lo que concierne al aspecto cuantitativo, se admite que existe una correlación positiva entre la tasa de deformación del granito y su anisotropía magnética total. Por otra parte, existe también una cierta correlación entre las anisotropías magnéticas lineal y planar y la fábrica de forma de los marcadores (fig. 10). Sin embargo, el elipsoide magnético depende a la vez de la tasa de deformación, del mecanismo de esta deformación y, sobre todo, de la mineralogía magnética. Por lo tanto, no se puede considerar que un diagrama L/F sea equivalente a un diagrama de deformación finita (PEARCE y FUETEN, 1989). Basándose en el modelo teórico en dos dimensiones de MARCH (1932)-FERNANDEZ (1987) para deformación coaxial, HENRI y HROUDA (1989) proponen ábacos de correlación entre elipsoide magnético y elipsoide de deformación finita. En nuestra opinión, estas correlaciones no son adecuadas si no se consideran modelos más realistas (deformación tridimensional, no coaxial, marcadores con interacciones) y no se tienen en cuenta calibrados apropiados a las diversas mineralogías magnéticas.

B) Desde el punto de vista geológico, nuestros datos magneto-estructurales ponen claramente de manifiesto los siguientes hechos:

(1) En la parte S del plutón existe una ancha zona con lineaciones subverticales y tasas de anisotropía lineal a veces elevada, que está alargada paralelamente al eje del plutón y que coincide con las facies más evolucionadas (principalmente la facies C, y en menor medida la facies B). En la parte N del plutón, aunque menos señalada, existe también una zona con lineaciones subverticales. Estas zonas coinciden con los sectores en los que, según los estudios gravi-

métricos, el granito alcanza las mayores profundidades (fig. 2). Por ello, pueden ser consideradas como raíces o zonas de alimentación magmática (GUILLET et al., 1985) y, de este modo, establecer que las facies con lineaciones subverticales constituyen los últimos aportes magmáticos procedentes de las zonas de alimentación.

(2) Existe dentro del granito una orientación N 130° E muy regular, señalada tanto por las foliaciones como por las lineaciones, que es paralela al eje del plutón y concordante con la esquistosidad principal del encajante. Esta dirección es probablemente la del movimiento de los primeros aportes de magma durante los últimos estadios de su emplazamiento.

(3) Existe una clara oblicuidad, en el contacto SE del plutón, entre el encajante y las estructuras lineares y planares del granito, que se curvan en las proximidades del contacto hasta la dirección N 90° E. Esto sugiere que el granito se prolonga por debajo su encajante, lo cual concuerda con lo indicado por los estudios gravimétricos (fig. 2).

(4) La continuidad aparente de orientaciones entre las facies A y B sugiere que, a pesar de la existencia de un contacto magmático neto entre ambas en la parte S del plutón, las dos fases han sido deformadas en estado viscoso de manera sincrónica. Por otra parte, ambas facies presentan en las inmediaciones del contacto un aumento de la anisotropía planar.

(5) La distribución de sectores con anisotropías planares y lineares no es aleatoria. Los dominios planares se localizan preferentemente en el borde del plutón y a lo largo de los límites entre facies, por lo que se supone que son consecuencia de efectos de pared. Por el contrario, el dominio lineal principal se sitúa preferentemente sobre la zona de alimentación S del plutón.

Estos datos estructurales y gravimétricos podrían encajar en un modelo de abertura y relleno de una «megafente» de tensión de orientación NO-SE tal y como propone CASTRO (1986). Sin embargo, existen en este modelo contradicciones geométricas expresadas por MARTINEZ-CATALAN y DIEZ-BALDA (1987), en cuanto a la dirección E-O del cizallamiento dextro propuesto y la orientación de la esquistosidad  $S_2$ , que, según

dicho autor, estaría relacionada con él. Por todo ello, la discusión de un modelo de emplazamiento para el plutón de Cabeza de Araya, que, lógicamente, debe tener en cuenta los datos estructurales del encajante regional, se hará más detenidamente en una nota posterior.

## 7. CONCLUSIONES

- La técnica de la ASM aplicada a granitos tiene la ventaja sobre las medidas estructurales de campo, de cuantificar una propiedad física y ser por tanto menos subjetiva.
- A la vista de las comparaciones direccionales que nosotros hemos efectuado, la ASM parece poder reemplazar las medidas sistemáticas de campo al menos en los casos donde los minerales portadores de imantación inducida son esencialmente paramagnéticos. Esta técnica es particularmente útil, y rápida de aplicar, en las facies poco anisótropas en las cuales las medidas convencionales sobre el terreno proporcionan en la mayor parte de los casos resultados aleatorios.
- La interpretación cuantitativa de la anisotropía es delicada, ya que intervienen a la vez las anisotropías intrínsecas de diferentes marcadores, el valor y el mecanismo de deformación.
- Este estudio estructural proporciona, para el plutón de Cabeza de Araya, una descripción precisa de las condiciones de emplazamiento de los magmas que se resumen en los siguientes puntos: (1) una organización estructural regular, paralela al eje del plutón y a la esquistosidad regional; (2) un emplazamiento casi sincrónico de las tres facies principales, y (3) la existencia de una zona principal de alimentación magmática al S, correspondiente a la facies más evolucionada, y otra, más restringida y menos señalada, al N del plutón.

Estos datos son completados por el estudio gravimétrico de AUDRIAN et al. (1989), el cual precisa la geometría en profundidad del plutón, confirma la existencia de zonas de enraizamiento y delimita mejor su localización. Ello pone de manifiesto que el estudio conjunto de las estructuras magmáticas y de la gravimetría proporció-

na una base fundamental para poder proponer modelos de emplazamiento para este tipo de plutones.

#### AGRADECIMIENTOS

A. Aranguren agradece su financiación a la Universidad del País Vasco. Proyecto UPV 121.310-0075/88.

#### REFERENCIAS

- AMICE, M., et BOUCHEZ, J. L. (1989): *Susceptibilité magnétique et zonation du batholite de Cabeza de Araya (Extremadura, Espagne)*. C. R. Acad. Sci. Paris, t. 308, série II, pp. 1171-1178.
- AMICE, M. (1990): *Le complexe granitique de Cabeza de Araya (Estrémadure, Espagne): zonation, structure magmatiques et magnétiques, géométrie. Discussion du mode de mise en place*. Thèse, Université de Toulouse III.
- AUDRAIN, J.; AMICE, M.; VIGNERESSE, J. L., et BOUCHEZ, J. L. (1989): *Gravimétrie et géométrie tri-dimensionnelle du pluton de Cabeza de Araya (Estrémadure, Espagne)*. C. R. Acad. Sci. Paris, t. 309, Série II, pp. 1757-1764.
- BERNIER, S.; BOUCHEZ, J. L., et ROCHETTE, P. (1987): *Anisotropie de la susceptibilité magnétique du granite de Beauvoir (Sondage G. P. F. d'Echassière, Massif Central français)*. C. R. Acad. Sci. Paris, t. 305, série II, pp. 1167-1173.
- BORRAIDALE, G. J. (1988): *Magnetic susceptibility, petrofabrics and strain*. Tectonophysics, 156, pp. 1-20.
- BOUCHEZ, J. L.; GLEIZES, G.; DJOUADI, T., and ROCHETTE, P. (1990): *Microstructure and magnetic susceptibility applied to emplacement kinematics of granites: the example of the Foix zoned pluton (French Pyrenees)*. Tectonophysics, 184, pp. 157-171.
- CASTRO, A. (1985): *The central Extremadura batholith: geotectonic implications (european hercynian belt) - an outline*. Tectonophysics, 120, pp. 57-68.
- CORRETGE, L. G. (1971): *Estudio petrológico del batolito de Cabeza de Araya (Cáceres)*. Tesis, Universidad de Salamanca, 2 tomos, 453 pp.
- CORRETGE, L. G. (1983): *Las rocas graníticas y granitoides del Macizo Ibérico*. In: *Geología de España*, IGME, Ed. Madrid, pp. 569-592.
- DALY, L. (1970): *Etudes des propriétés magnétiques des roches métamorphiques ou simplement tectonisées*. Thèse d'état, Université de Paris, 340 pp.
- DIEZ-BALDA, M. A.; VEGAS, R., and GONZALO-LODEIRO, F. (1990): *Structure of the Central Iberian Zone*. In: *Pre-Mesozoic Geology of Iberia*. Springer-Berlin.
- DIOT, H., et BOUCHEZ, J. L. (1989): *Les granitoïdes hercyniens de la Haute-Moulouya (Maroc): leur structure primaire déduite de l'ASM. Indications sur leur mise en place*. Bull. Soc. Géol. France (8), t. V, núm. 4, pp. 705-716.
- ELLWOOD, B. B., and WHITNEY, J. A. (1980): *Magnetic fabric of the Elberton granite, Northeast Georgia*. J. Geophys. Res., 85, pp. 1481-1486.
- FERNANDEZ, A. (1987): *Preferred orientation developed by rigid markers in two dimensional simple shear strain: a theoretical and experimental study*. Tectonophysics, 136, pp. 151-158.
- GRAHAM, J. W. (1954): *Magnetic susceptibility anisotropy, an unexploited petrofabric element*. Geol. Soc. Am. Abstr. Programs, 65, pp. 1257-1258.
- GUILLET, P.; BOUCHEZ, J. L., and WAGNER, J. J. (1983): *Anisotropy of magnetic susceptibility and magmatic structures in the Guérande granite massif*. Tectonics, 2, 5, pp. 419-429.
- GUILLET, P.; BOUCHEZ, J. L., et VIGNERESSE, J. L. (1985): *Le complexe granitique de Plouaret (Bretagne): Mise en évidence structurale et gravimétrique de diapirs emboîtés*. Bull. Soc. Géol. France, t. 1, núm. 4, pp. 503-513.
- HENRY, B., et HROUDA, F. (1989): *Analyse de la déformation finie des roches par détermination de leur anisotropie de susceptibilité magnétique*. C. R. Acad. Sci. Paris, t. 308, série II, pp. 731-737.
- HROUDA, F. (1982): *Magnetic anisotropy of rocks and its application in geology and geophysics*. Geophys. Surv., 5, pp. 37-82.
- HROUDA, F. (1987): *Mathematical model relationship between the paramagnetic anisotropy and strain in slates*. Tectonophysics, 142, pp. 323-327.
- JEJINEK, V. (1981): *Characterization of the magnetic fabric of rocks*. Tectonophysics, 79, pp. 563-567.
- JOVER, O., et BOUCHEZ, J. L. (1986): *Mise en place syn-tectonique des granitoïdes de l'Ouest du Massif Central français*. C. R. Acad. Paris, t. 303, série II, núm. 10, pp. 969-974.
- JOVER, O.; ROCHETTE, P.; LORAND, J. P.; MAEDER, M., and BOUCHEZ, J. L. (1989): *Magnetic mineralogy of some granites from the French Massif Central: inference on magnetic fabric interpretation*. Phys. Earth Plan Int., 55, pp. 79-92.
- KING, R. F. (1966): *The magnetic fabric of some irish granites*. Geol. J., vol. 5, Pt. 1, pp. 43-66.
- LAPOINTE, P.; MORRIS, W. A., and HARDING, K. L. (1986): *Interpretation of magnetic susceptibility: a new approach to geophysical evaluation of the degree of rock alteration*. Can. J. Earth Sic., 23, pp. 393-401.
- LAUNEAU, P.; BOUCHEZ, J. L., et BLUMENFELD, P. (1988): *Structuration magmatique horizontale SE-NW du leucogranite de Crozant (Marche, Massif Central français)*. C. R. Acad. Sci. Paris, 307, série II, 1988, pp. 295-302.

MARCH, A. (1932): *Mathematische theorie der regelung nach der korngestalt bei affiner deformation*. Z. Kristallog., 81, pp. 285-298.

MARTINEZ-CATALAN, J. R., and DIEZ-BALDA, A. (1987): *Structural pattern and ascent model in the Central Extremadura Batholith, Hercynian belt, Spain: Discussion*. J. Struct. Geol., vol. 9, núm. 3, pp. 381-382.

OERTEL, G. (1955): *Der pluton von Loch Doon in Sud-scotland*. Geotektonischer Forschungen, v. 11, pp. 1-83.

PEARCE, G. W., and FUETEN, F. (1989): *An intensive study of magnetic susceptibility anisotropy of amphibolite layers of the Thompson Belt, North Manitoba*. Tectonophysics, 162, pp. 315-329.

PEREZ DEL VILLAR, L. P., y MINGARRO, E. (1988): *Carac-*

*terización geoquímica de la subfacies neumatolítica de la Sierrita y su relación con las facies graníticas colindantes (batolito de Araya, Cáceres)*. In: *Geología de los granitoides y rocas asociadas del Macizo Hespérico*, Ed. Rueda, pp. 329-343.

ROCHETTE, P. (1987): *Magnetic susceptibility of the rock matrix related to magnetic fabric studies*. J. Struct. Geol., vol. 9, núm. 8, pp. 1015-1020.

ROCHETTE, P. (1988): *La susceptibilité anisotrope des roches faiblement magnétiques: Origines et applications*. Thèse d'état. Université J. Fourier. Grenoble, 211 pp.

SCAILLET, B. (1990): *Structure et géochimie d'un leucogranite en régime de collision continentale: l'exemple du massif de Gangotri-Badrinath*. Thèse, INPL Nancy, 142 pp.

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

## INFORMACION

### La actualidad minera ante el mercado interior europeo (\*).

Por C. ARANZADI

En primer lugar quiero agradecer de nuevo al Club de la Minería la oportunidad que por segunda vez me ha brindado para intervenir en este foro, donde se tocan a gran altura temas de actualidad en el mundo industrial.

Con ocasión de mi anterior conferencia en este Club de la Minería sobre «La integración de la actividad minera en la actividad industrial», expresábamos nuestro criterio sobre la relevancia de las materias primas minerales como soporte del proceso industrial, si bien en un contexto técnico y económico muy diferente del que ha regido hasta hace pocos años. Contexto que supone una ruptura con la tradicional política minera que fue, como la económica en general, marcadamente intervencionista y proteccionista.

La industria minera se ha visto muy determinada: Primero, por los cambios estructurales acaecidos en los mercados internacionales con una imparable tendencia a su globalización en un mercado grande y homogéneo en cuanto a la demanda y muy heterogéneo en cuanto a la oferta y —por otra parte, ya en el origen de aquellos cambios—, por el alto grado de cooperación internacional alcanzado, que configura un marco económico mundial mucho más estable e irreversible, y donde ya no son concebibles las economías cerradas.

En este sistema económico crecientemente abierto, hay que repetir una vez más que lo sustantivo es la competitividad, que ha de armonizarse con la seguridad en el aprovisionamiento de las materias primas. La explotación

del subsuelo propio, en condiciones de eficiencia, constituye, lógicamente, una gran aportación a la seguridad de abastecimiento, con independencia de su favorable efecto en la balanza comercial y en un empleo estable.

Cuando la libre actuación de las fuerzas del mercado no permiten alcanzar un nivel suficiente de seguridad de abastecimiento, se definen determinadas ayudas de Estado, medidas fiscales o parafiscales o disposiciones administrativas complementarias. Con ello puede suceder que la seguridad de aprovisionamiento conduzca a la adopción de medidas que, en determinados aspectos, puedan producir distorsiones en la competencia o restricciones a la libre circulación de mercancías.

Nuestra condición de país miembro de las Comunidades Europeas ha impuesto, sin duda, a la actividad minera española directrices determinadas. En este sentido, el Consejo de las Comunidades Europeas, en su Resolución de julio de 1989, consideraba que el sector minero debe integrarse en el Mercado Interior de 1993 reforzando su competitividad, y estimaba que el desarrollo de la industria minera comunitaria debe realizarse en condiciones de competencia normal y con un compromiso resuelto de la Comunidad en favor del libre acceso a los recursos mundiales. Por tanto, nuestras empresas mineras, como se ha dicho en otras ocasiones, deberán abrirse al exterior tal como ya se está haciendo en algunos casos, buscando los complementos necesarios para su efectiva realización, al igual que otras empresas europeas.

Expuestos estos antecedentes, vamos a pasar al objeto de esta conferencia.

A) Comenzamos por el carbón en razón de su singularidad, tanto por encontrarse dentro del tratado específico de la CECA como por su participación en el Plan Energético Nacional.

En este campo, las cuestiones de actualidad ante el mercado interior europeo, sobre las que queremos llamar la atención, son las referentes:

— Al marco jurídico.

— La libre práctica.

— Al establecimiento de las reglas de la competencia en relación con el Convenio Marco UNESA-CARBUNION.

\* En el marco institucional tenemos que el tratado CECA expira en el año 2002. Sin embargo, en los medios comunitarios se ha iniciado una reflexión sobre el futuro de este tratado, por una serie de razones:

— La plena realización del gran mercado único y la construcción, actualmente en curso, de la unión económica y monetaria, sitúan la aplicación de las políticas sectoriales, entre ellas la del carbón, en un nuevo contexto basado en condiciones de política global, muy diferente al que existía en 1951, cuando fue suscrito en París este tratado fundacional.

— Por otra parte, la próxima Conferencia Intergubernamental sobre la unión política, debatirá cuestiones institucionales y podría plantearse el futuro del tratado CECA.

Entre las diversas opciones, parece, en principio, que la expiración del Tratado en el año 2002 es la más probable, por contar con ventajas como la de ofrecer una mayor certidumbre en el marco jurídico a los productores de carbón, así como un período de transición suficientemente largo, habida cuenta de la inercia que tanto el carbón como la siderurgia presentan para una adaptación rápida a los cambios. Esta opción, bajo el punto de vista político y de procedimiento, parece, asimismo, menos complicada al no existir el procedimiento complejo y difícil de ratificación parlamentaria en los doce Estados miembros.

\* Libre política.

La libre circulación de mercancías es un principio fundamental de la CECA y, en consecuencia, su restricción debe tener carácter excepcional y limitado y ser autorizada por la Comisión. No cabe la adopción de medidas unilaterales por parte de los Estados Miembros.

Habida cuenta de que el plan de reordenación del carbón para las empresas sin contratos-programas, enviado a Bruselas, prevé, además de medidas extraordinarias de carácter financiero, otras importantes, como es la continuidad de determinadas restricciones a las importaciones en régimen de libre práctica, la Administración española ha reiterado su petición de un período transitorio para continuar aplicando medidas de protección sobre las importaciones, con un horizonte temporal semejante al fijado por los planes de reordenación y, asimismo, se limiten las importaciones totales originarias de terceros países a lo previsto en el contingente anual libre de derechos, que establez-

can las autoridades energéticas españolas de acuerdo con las necesidades de los sectores consumidores básicos.

\* En cuanto a la compatibilidad con las reglas de la competencia con el vigente sistema de contratación de carbón termoeléctrico (Convenio marco UNESA-CARBUNION, de 10 de diciembre de 1986), la Comisión —preocupada por los sistemas dirigidos a asegurar las ventas de los carbones nacionales entre los productores de electricidad que existen en varios Estados miembros—, actúan sobre las disposiciones y acuerdos que rigen la utilización del carbón doméstico en la producción de electricidad, todo ello al considerar que la competitividad es un objetivo energético comunitario, que ha adquirido una mayor importancia para la consecución del mercado interior de la energía.

A este respecto, las actuaciones de la Comisión ya se están concretando, básicamente, en conseguir la reducción de las ayudas, tendiendo a la disminución de aquellas que se aplican a saldar las pérdidas en explotación y sea cual fuere el origen de estos fondos. Aquí se inscriben la Decisión de 20 de diciembre de 1989, por la que España debe reducir los pagos compensatorios en el régimen de suplementos de precios financiados por la OFICO, y la Decisión de 25 de julio de 1990, respecto a la reducción de las ayudas a las empresas con contratos-programas. Estas decisiones, por su rango, tienen el carácter de obligado cumplimiento para los Estados a quienes van dirigidas, y para otorgar las ayudas, éstas deben ser autorizadas previamente y con carácter anual por la Comisión de las Comunidades.

Con relación a los precios, conviene advertir que, aunque han sido establecidos unos precios de costo admisibles a largo plazo para autorizar las inversiones, que es otra de las facultades de la Comisión, no existe una precisión cualitativa para los precios que pueden ser admisibles. Como quiera que la energía, además de un problema en principio comercial y económico, tiene una componente estructural en razón de la participación en el mismo de cada una de las energías primarias disponibles, y dada la disponibilidad de recursos propios, extraordinariamente variable entre los países miembros, no parece que pueda asegurarse la obtención de una definición general.

En relación con el binomio subvenciones-precios hay que considerar el objetivo central de la política energética, que es garantizar a escala comunitaria la seguridad del abastecimiento en condiciones que permitan aumentar la competitividad de la economía; en este sentido, la política en que se basa el mercado interior deberá desarrollarse en etapas sucesivas. Durante la fase de transición, en la que nos encontramos, el concepto nacional de la seguridad de abastecimiento deberá evolucionar hacia un concepto comunitario, y la Comisión establecerá un marco general para las ayudas nacionales en este período, viendo la com-

(\*) Conferencia pronunciada el pasado 17 de diciembre de 1990 por el Ministro de Industria y Energía, don José Claudio Aranzadi Martínez, en un acto organizado por el Club Español de la Minería, que estaba presidido por don José Rosón Trespalacios, Presidente del Club, acompañado de directivos del mismo, como don Pedro Fontanilla Soriano, don Pedro Martínez Arévalo, don Fernando Plá y Ortiz de Urbina y don Emilio Llorente Gómez, Director General del Instituto Tecnológico GeoMinero de España.

El señor Aranzadi Martínez estaba acompañado por doña María Luisa Huidobro, Directora General de la Energía, y don Enrique García Alvarez, Director General de Minas y de la Construcción.

patibilidad de las medidas complementarias destinadas a garantizar la seguridad de abastecimiento con el derecho comunitario. La idea de bandas límite, que ya se está manejando en distintos foros del ámbito comunitario, nos parece una idea válida para compatibilizar el mencionado binomio subvenciones-precios. En todo caso es en la duración de esa fase de transición donde deberemos disponer de la necesaria flexibilidad, para poder desarrollar con orden la realización del mercado interior europeo.

B) Respecto a la minería no energética, la actualidad minera se ve desde una atalaya diferente, más cercana a la idea de un mercado interior europeo. Al no existir subvenciones directas para saldar las pérdidas de explotación, la Comisión no ha tenido que plantear en este caso cuestiones semejantes a las del carbón y, durante el último año, los temas de mayor actualidad se han centrado en los trabajos sobre las medidas específicas a las que se refería la Resolución del Consejo de las Comunidades Europeas de 28 de julio de 1989. A este respecto, la Comisión, en enero de 1990, ha creado diversos grupos de trabajo para el estudio de diversas cuestiones, tales como difusión de la información geológico-minera, fiscalidad, regulación sobre acceso a la exploración y explotación de los recursos minerales y acclones en el exterior. Estos grupos de trabajo han desarrollado una labor que esperamos que en los próximos meses conduzca a definir una clara política minera comunitaria a desarrollar dentro y fuera del territorio comunitario.

A pesar de que la resolución de 28 de julio de 1990, antes mencionada, no propone una dirección definitiva a seguir para construir una política minera exterior comunitaria, sí establece el objetivo de reconocer el papel que juegan las empresas mineras como clave para suministrar materia prima a precios competitivos a la industria europea. En este sentido, la política dirigida a incrementar la competitividad de las empresas mineras deberá cubrir aspectos como los siguientes:

- La minería comunitaria deberá ser competitiva. En este sentido, no debe tener desventajas respecto a otras industrias mineras que se desenvuelven dentro de los grandes países productores.
- La seguridad de suministro no estará amenazada en la CEE si la tecnología europea sigue estando presente en el escenario minero internacional.
- Las empresas mineras no deben buscar protección de tarifas, pero la Comisión debe controlar el «dumping» y la distorsión de mercados.
- La política de cooperación y ayuda, fundamentalmente con países ACP y del Este, no debe olvidar el funcionamiento del mercado de materias primas, que deberá contemplar que los mineros comunitarios invierten allí donde están localizados los recursos.

Con estas ideas voy a tratar de esbozarles a grandes rasgos cuáles son las líneas de política minera que

intenta poner en práctica el Ministerio de Industria y Energía (MINER).

### C) Política del MINER.

Son conocidas las líneas básicas de apoyo al sector minero manifestadas por mí mismo en el Parlamento, y que hoy quisiera reiterarles a la vista de esta actualidad que les estoy comentando.

Por sus peculiaridades antes comentadas, me referiré primero al carbón y posteriormente a la minería con carácter general.

En el caso del carbón pueden resumirse las actuaciones, en línea con lo anterior, dirigidas concretamente a:

- Actuaciones para mejorar la competitividad. Se están centrando en la reordenación del sector minero, con un plan de reordenación para las empresas sin contrato-programa, presentado en julio a la Comisión y que probablemente será aprobado en los próximos días por este alto organismo, y el Plan de Reordenación de las empresas con contrato-programa cuya negociación ya ha sido iniciada.

El objetivo de ambos planes pretende que las empresas del sector hayan mejorado su competitividad al término de 1993, en que el código de ayudas CECA definido en la Decisión 2064, pierde su vigencia. Estos planes, que requerirán un indudable esfuerzo en lo económico y en lo social, se han hecho con el objetivo de «reflotar» el máximo número posible de empresas, aunque, eso sí, compartiendo debidamente los esfuerzos para conseguirlo.

La reordenación del sector, según nuestras previsiones, permite vaticinar al menos el mantenimiento de la actividad minera del carbón en términos globales, aspecto que sin ninguna duda quedará reflejado en el nuevo equipamiento que establecerá el nuevo PEN.

No hay que olvidar tampoco que los problemas del carbón no son sólo de competitividad, sino también de calidad del mismo, sobre todo desde una perspectiva medioambiental. En este campo deberán realizarse importantes inversiones en Desarrollo Tecnológico de nuevos sistemas de combustión, que permitan garantizar el uso de nuestros carbones en nuevos grupos, pues en todo el ámbito comunitario las nuevas centrales térmicas deberán cumplir unos límites de contaminación, que exigirán, según la calidad de los carbones, tecnología de combustión más o menos complejas. Un muestrario de nuevas tecnologías, aplicado específicamente a nuestros carbones, deberá ser realidad en nuestro país en los próximos años.

Podemos, por tanto, resumir que a la competitividad, como objetivo del sector minero productivo, hay que añadir la reconversión tecnológica del sector consumidor principal, que son las nuevas centrales térmicas.

En cuanto a la minería no energética, en mi intervención ante este Club en el otoño del pasado año expuse algunas consideraciones sobre la integración de la minería en la industria, señalando la gran trascendencia que para un desarrollo industrial equilibrado y estable supone el contar con un abastecimiento suficiente en cantidad, calidad y precio de materias primas minerales, lo que lleva aparejado, en un marco de racionalidad, no bajar la guardia en nuestra actividad minera, y no cejar en las dos tareas fundamentales que la sustentan:

- a) La exploración minera en el interior y en el exterior.
- b) El I+D aplicado a la valorización de materias primas minerales de producción propia.

En esta ocasión me veo en la obligación de reiterar este punto de vista, ya que, a medida que transcurre el tiempo, se hace más patente la necesidad de orientar nuestra actividad minera de forma cada vez más selectiva, que aproveche los puntos fuertes que sin duda tenemos, en un contexto de mercado cada vez más competitivo que demanda un continuado esfuerzo tecnológico.

Veamos con un poco de detalle estos aspectos:

**Exploración minera.** En el interior debe estar basada en la más avanzada tecnología disponible, y orientada hacia aquellas sustancias de mayor demanda actual o previsible; las actuaciones administrativas pretenden:

Facilitar el acceso y difundir entre nuestras empresas la mejor tecnología de exploración disponible.

Facilitar el acceso a nuestro subsuelo al capital exterior que esté en condiciones de aportar un acervo tecnológico avanzado para desarrollar nuestro potencial productivo.

Fomentar nuestra relación con los países de la CE para aunar y coordinar esfuerzos en pro de una política minera comunitaria moderna y activa.

También es de interés del Ministerio animar a nuestras empresas mineras e industriales a intervenir activamente en la exploración geológico-minera en el exterior, participando en proyectos de interés común en concurrencia con empresas de otros países de la CE.

Estas actitudes pretenden trasladarse a la legislación básica del régimen minero a través de la cual el Estado desea asumir un papel de animador de la iniciativa empresarial, facilitando y potenciando su labor, más que supliéndola.

I+D aplicado a la valorización de materias primas minerales. El MINER entiende que en esta materia caben muchas e interesantes posibilidades para nuestra minería no energética, muchos de cuyos problemas derivan hoy de la dificultad para colo-

car sus productos en las mejores condiciones de precios en un mercado cada vez más influido por la calidad, y no de insuficiencia de recursos, o carencia de tecnología minera.

El I+D es una actividad ya consustancial e indisoluble con la actividad minera, y lo será más en el futuro; el proceso tradicional de exploración, explotación y beneficio, entendido este como la actividad mínima necesaria para hacer vendible el producto mineral a la industria de primera transformación, debe completarse de forma más activa con el I+D de producto en la generalidad de los casos; el minero debe rescatar cuotas de soberanía sobre el valor de su producto que ha ido perdiendo al no responder con tecnología a las demandas de calidad de la industria; en esta materia no debemos ni podemos abandonarnos en el escepticismo de considerar que lo que la naturaleza no da de forma generosa, no podemos nosotros conseguirlo con nuestra imaginación y nuestro esfuerzo.

Todas estas ideas se vienen ya plasmando en realidades en algunos proyectos singulares en los que el MINER viene trabajando con las Administraciones Autonómicas y con las empresas correspondientes, y que nos consta son de interés de la Comunidad Europea. Me refiero en concreto a la Comisión de I+D para los minerales piríticos (piritas y sulfuros complejos), constituida en la Dirección General de Minas y de la Construcción, en la que participan la Junta de Andalucía y un Comité de empresas del Grupo de Cobre y Piritas de CONFEDEM, que viene trabajando desde hace más de seis meses en la coordinación de iniciativas públicas y privadas en materia de I+D de estas sustancias, a fin de potenciarlas en un marco de colaboración técnica y económica. También vemos con interés los deseos de generalizar estas actuaciones al campo de la exploración de la Faja Pirítica en momentos trascendentales de nuestro futuro minero en los que se están gestando nuevos marcos legales nacionales y comunitarios para la actividad minera.

Nueva Ley de Minas. Todo lo anterior implica suficientes novedades como para no contemplarlas en el marco legislativo vigente.

La nueva Ley de Bases del Régimen Minero presentará algunos aspectos novedosos, que merecen destacarse:

Intenta conseguir el adecuado punto de equilibrio entre las bases de un ordenamiento jurídico general que atañe al Gobierno y la capacidad de incorporar aspectos concretos al régimen minero por parte de las CC. AA., a las que han sido transferidas en su mayor parte las competencias en el Régimen Minero.

Integra otras leyes vigentes, tales como la Ley 54/80, que crea la Sección de Minerales Energéticos, y la Ley 61/77, de fomento a la minería.

Supera el concepto de ley exclusiva de derechos mineros, dando entrada a aspectos técnicos, fiscales y propios de la actividad minera vistos desde una perspectiva actual, sin perjuicio de la atención lógica a los derechos mineros.

Se pretende crear el registro minero nacional, con carácter público, en el seno del Instituto Tecnológico GeoMinero de España (ITGE), creándose un Centro Nacional GeoMinero de Información y Documentación.

Se pretende crear el Consejo Superior de Minería, como órgano consultivo superior, con re-

presentación de las CC. AA. y de la Administración Central.

Se define el régimen competencial, donde las modificaciones sobre la presente Ley obedecen fundamentalmente a la creación de las CC. AA.

Introduce los hidrocarburos como objeto de la misma.

Para terminar, espero que estas palabras hayan contribuido a clarificar la perspectiva de un sector como es el minero, dentro de la realidad que hoy vemos en Europa.

Muchas gracias.

## Noticias

### LA PIEDRA NATURAL: UNA INDUSTRIA EN EXPANSION

La extracción, elaboración y comercialización de Piedra Natural (Rocas Ornamentales, «Dimensión Stone») son actividades económicas cuyo volumen de negocio en todo el mundo se estima en unos 1,25 billones de pesetas anuales, excluidas comisiones, transportes e impuestos.

En España, el valor de la Piedra Natural a pie de cantera, en términos de roca bruta extraída, supone unos 80.000 millones de pesetas anuales, lo cual es alrededor del 19 por 100 del valor de la producción minera nacional, excluidos los hidrocarburos. Solamente la minería del carbón supera a la de la piedra. Ello sitúa a España en segunda posición mundial, por detrás de Italia, con la ventaja de que en este país las tasas de crecimiento de la industria de la Piedra Natural fueron negativas en 1990, mientras que en nuestro país, el tonelaje de roca bruta extraída creció un 20 por 100 y las exportaciones de bloques y elaborados un 6,2 por 100, referidos al mismo período.

La minería mundial de estos productos produce anualmente unos 10 millones de metros cúbicos de rocas diversas, que se transforman en menos del 50 por 100 de ese volumen de productos elaborados, aproximadamente. La maquinaria instalada en canteras y naves de elaboración ha supuesto una inversión de unos 1,2 billones de pesetas.

Desde el punto de vista del mercado, la Piedra Natural se divide generalmente en dos grupos: rocas silíceas (granitoides, pórfidos, gabros, rocas ultrabásicas, etc.), y rocas calcáreas (mármoles, travertinos, calizas, serpentinitas...). A estos se deberían añadir otros dos grupos: la pizarra, de gran incidencia en la producción española (unos 21.000 millones de pesetas de ventas en 1990) y el de la «Piedra de Cantería», escasamente trabajada y cuya explotación se realiza casi siempre por medios manuales (unos 9.000 millones de pesetas anuales en España).

La explotación de las rocas silíceas, cuyo crecimiento venía siendo muy rápido desde los años 70, ha experimentado cierta retracción, mientras que ha aumentado la tasa de crecimiento de los mármoles, calizas y travertinos.

El mercado demanda actualmente materiales de colores suaves y texturas poco marcadas, lo cual es síntoma de un cierto cambio en las preferencias de los clientes. En rocas silíceas se demandan rocas migmatíticas y gneíscas, con estructuras fluidales y deformativas, texturas de grano no muy grueso y colores grises, rosadas suaves y blancos. En rocas calcáreas se tiende a colores en tonos pastel y texturas poco usuales (travertínicas, bandeadas).

La nueva tecnología de extracción se centra en el corte directo de los bloques en el banco de cantera, mediante hilo adiamantado. En elaboración se van introduciendo lentamente los «telares» de aserrado con lamas adiamantadas y corte vertical, en lugar de los de corte horizontal que utilizan granalla de acero como abrasivo.

La investigación de nuevos yacimientos y productos de Piedra Natural en todo el mundo es aún hoy, y salvo contadas excepciones, no sistemática y carente de programas metódicos de prospección. La mayor parte de los yacimientos puestos en explotación en los últimos años, casi todos en países en vías de desarrollo, han sido descubiertos de forma aislada y fortuita.

En este sentido, los servicios geológicos de los países con mayor tradición en la prospección y explotación de Piedra Natural (Italia, España, Portugal...) podrían jugar un papel muy importante como asesores de los gobiernos nacionales de los países menos desarrollados que poseen los recursos y de las empresas mineras que los extraen.

### MUSEO GEOLOGICO «SOS BAYNAT»

Vicente Sos Baynat, hijo predilecto de Castellón, asistió el pasado 23 de abril al acto inaugural de la primera fase del Museo Provincial de Geología instalado en el Instituto de Bachillerato que lleva su mismo nombre.

Tras las palabras inaugurales del señor Sos Baynat, el profesor de Geodinámica de la Universidad de Zaragoza, José Luis Simón Gómez, pronunció una interesante conferencia, clausurando la sesión la Directora del Centro, Pilar Aparicio.

El Museo comenzó a gestarse hace unos dos años, cuan-

do la Consellería de Educación aportó consecutivamente, cada año, fondos para su formación. La dotación material se nutrió de la donación desinteresada de la importante colección de fósiles de Cano Forner, así como con pertenencias personales del propio Sos Baynat y un importante conjunto de libros, entre los cuales se encuentran sus más representativas publicaciones. A propósito de esto, recordamos que hace unos tres años el ITGE le dedicó la edición de un Libro Homenaje que recogía gran parte de las obras agotadas y que le fue entregado al profesor Sos Baynat en un solemne acto celebrado en la E. T. S. de Ingenieros de Minas de Madrid.



**CONFERENCIA INTERNACIONAL  
sobre el  
PALEOZOICO INFERIOR DE IBERO-AMERICA**

**Presentación**

En el marco de la conmemoración del Quinto Centenario se organiza en Extremadura una reunión científica del máximo nivel, en torno a objetivos específicos de temática iberoamericana encuadrados en el Programa Internacional de Correlación Geológica (IUGS-UNESCO). De ellos, los estudios relativos al Paleozoico Inferior revisten una importancia particular para el conocimiento de la historia geológica común a América y la Península Ibérica, en un período (hace 550-400 millones de años) en que ambos territorios formaban parte de un mismo continente (Gondwana), con anterioridad a la apertura del Océano Atlántico.

La Conferencia Internacional planteada pretende constituir un lugar de encuentro de los principales investigadores involucrados en los Proyectos del PICG 249 (Magmatismo Andino y su Ambiente Tectónico), 270 (Eventos del Paleozoico Inferior de América Latina para la Génesis del Gondwana) y 271 (Conodontología del Paleozoico de América del Sur). La realización de una reunión conjunta de estos Proyectos, incorporando una contribución europea calificada a los mismos, potenciará el logro de una mayor resolución en el conocimiento de la correlación geológica intercontinental, promoviendo a su vez el desarrollo de investigaciones cooperativas con Iberoamérica en el marco de la geología del Paleozoico Inferior. A la Conferencia han sido convocados igualmente miembros de otros Proyectos del PICG de temática afín, tanto en curso como de reciente conclusión. La presencia iberoamericana en esta Conferencia está garantizada, además, por la participación de una veintena de destacados ponentes de países representativos del área.

La proyección de esta cooperación en el campo de los recursos naturales será el tema de una Mesa Redonda específica, que incidirá también en la preparación de proyectos conjuntos dentro de los Programas Marco y Países Terceros de la Comunidad Europea.

La Conferencia Internacional se ha coordinado con la VIII Reunión del Grupo de Ossa Morena (GOM), que aglutina a geólogos de España y Portugal interesados esencialmente en los materiales paleozoicos de este sector del SO de la Península Ibérica.

La elección de Extremadura como sede para esta Conferencia Internacional ha sido aprobada por los líderes institucionales y ejecutivos de los Proyectos de PICG correspondientes, y cuenta con el auspicio de sociedades científicas españolas y de ámbito internacional. No en vano la Comunidad Extremeña dispone de extensos afloramientos de rocas del Paleozoico Inferior, cuya problemática e interés son bien conocidos en la literatura geológica internacional. Los resultados científicos de la Conferencia se plasmarán en un volumen que incluirá los textos de todas las Ponencias presentadas, y que pretende erigirse en una referencia esencial para futuras investigaciones sobre el tema en el ámbito de la comunidad geológica internacional.

**Entidades organizadoras**

- Consejo Superior de Investigaciones Científicas, a través del Instituto de Geología Económica (CSIC-UCM, Madrid) e Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Salamanca.
- Universidad de Extremadura (Facultad de Ciencias, Badajoz).
- Junta de Extremadura.

**Instituciones patrocinadoras**

Se cuenta inicialmente con el patrocinio de la Junta de Extremadura, Diputaciones Provinciales extremeñas, Universidad de Extremadura y CSIC. Otras entidades nacionales e internacionales de muy diversa índole, así como empresas públicas y privadas, han mostrado igualmente su interés en colaborar con esta Conferencia. Sus nombres serán anunciados en la segunda circular.

**Auspicios científicos y técnicos de la conferencia**

- Sociedad Geológica de España.
- Sociedade Geológica de Portugal.
- Instituto Tecnológico GeoMinero de España.
- Serviços Geológicos de Portugal.
- Sociedad Española de Paleontología.
- Real Sociedad Española de Historia Natural.
- Comité Español del Programa Internacional de Correlación Geológica.

**Sede y fechas**

La Conferencia Internacional se celebrará del 8 al 12 de mayo de 1992. Previamente tendrá lugar una excursión del Grupo de Ossa Morena titulada «El Orógeno Cadomiense en el Sector Meridional de la Península Ibérica y su Evolución durante el Hercínico», que se desarrollará entre los días 6 y 7 de mayo, con salida y regreso a la ciudad de Mérida (Badajoz). Los detalles de la misma serán ampliados en la segunda circular.

Las sesiones científicas de la Conferencia ocuparán los tres primeros días de actividad (viernes 8 a domingo 10), centrándose en la ciudad de Mérida. El domingo 10 de mayo tendrá lugar la Mesa Redonda sobre Recursos Naturales del Paleozoico Inferior Perigondwánico.

Las dos últimas jornadas (lunes 11 y martes 12) se dedicarán a itinerarios geológicos que compendiarán diversos aspectos del Paleozoico Inferior de Extremadura (Cámbrico de Zafra, Ordovícico de Herrera del Duque y Silúrico de Alía) y Magmatismo Paleozoico (complejo plutónico de Barcarrota, y plutones zonados de Trujillo, Albalá y Plasenzuela). Durante la realización de estos itinerarios geológicos se pernoctará igualmente en Mérida.

Una vez concluida la Conferencia, está en estudio la realización de una visita colectiva opcional, de un día de duración (miércoles 13) a la EXPO-92 de Sevilla —sin pernoctar en esta ciudad—, alternativa que se planteará en próximas circulares.

**Idiomas**

Los Idiomas Oficiales de la Conferencia serán español, portugués e inglés, si bien las Ponencias se expondrán y publicarán en los dos primeros.

Eventualmente se aceptará la presentación de comunicaciones en otros idiomas, previa solicitud al Comité Organizador.

**Inscripción**

La cuota de inscripción normal será de 10.000 pesetas, y cubrirá los siguientes conceptos:

- Programa y libro de resúmenes.
- Libro «Paleozoico Inferior de Iberoamérica» que incluirá los textos de todas las Ponencias.

**V SIMPOSIO DE HIDROGEOLOGIA****Presentación**

La Asociación Española de Hidrología Subterránea (Grupo de Trabajo de Hidrogeología) anuncia la convocatoria del Simposio de Hidrogeología en su quinta edición, que se celebrará en Alicante, en el mes de marzo de 1992.

El tiempo transcurrido desde la conclusión del anterior Simposio de Palma de Mallorca, los acontecimientos acaecidos en estos años y los retos próximos cuales son: la necesaria innovación tecnológica, soluciones imaginativas a situaciones extremas (fuertes incrementos de la demanda, sequías, desequilibrios regionales), imperativos medioambientales con énfasis relevante sobre la calidad y protección del patrimonio hídrico, adaptación metodológica a la planificación hidrológica, consecuencia de la implantación y desarrollo del marco legal vigente, etc., constituyen motivos sobrados para ofrecer el tradicional y ya veterano foro del Simposio para la reflexión, debate y contraste de pareceres.

**Temática**

El espíritu abierto que siempre ha distinguido al Simposio condiciona que la temática no quede circunscrita a determinados aspectos. Por ello se pretende abarcar la variada gama disciplinaria cuyo argumento sea el agua y sus problemas, recomendando la orientación de los trabajos que se presenten hacia los temas de mayor interés y actualidad, como:

- Planificación hidrológica.
- Gestión de recursos.
- Avances científicos y metodológicos.
- Medio ambiente hidráulico (calidad, contaminación, protección, impacto ambiental, etc.).
- Práctica hidrológica (perforación, ensayos, redes, inventarios, usos, estadística, etc.).
- Nuevas tecnologías (aplicación informática, programas, control remoto, teledetección, etc.).
- Aspectos legales y económicos.

**Idioma**

El idioma oficial del Simposio será el castellano.

**Comunicaciones y publicaciones**

Los trabajos que se presenten, versados en la temática

- Asistencia a las reuniones científicas y actos sociales (cafés, recepción en el Ayuntamiento de Mérida y cena de clausura).
- Excursiones geológicas: desplazamiento en autocar, comida fría y guías.

Igualmente, se prevé otorgar un cierto número de inscripciones con cuantía reducida (5.000 ptas.) para estudiantes del segundo ciclo de licenciatura, becarios pre-doctorales y profesores de EGB, BUP o FP, previa acreditación.

También está en estudio la concesión de becas de inscripción para postgraduados latinoamericanos que asistan a la Conferencia.

La VIII Reunión del Grupo de Ossa Morena tendrá por su parte una cuota específica referida a la excursión y al libro guía de la misma.

del Simposio, deben ser inéditos y originales, con una extensión máxima de 15 páginas, mecanografiados a un espacio por una sola cara y en formato A-4.

La fecha límite de recepción de trabajos será el 31 de diciembre de 1991.

El Comité Organizador velará por la calidad de los mismos y decidirá su aceptación definitiva antes del 31 de enero de 1992.

Los trabajos aceptados serán editados en la colección «Hidrogeología y recursos hidráulicos», volumen XV y siguientes, que se presentarán en el acto de inauguración del Simposio. Cada participante inscrito recibirá un ejemplar de la edición y el primer firmante de la comunicación, diez separatas de la misma.

La edición será realizada por reproducción fotográfica, con reducción aproximada de 1/3. El Comité Organizador se reserva el derecho de publicar sólo los trabajos que cumplan los requisitos.

**Desarrollo del Simposio**

Aparte de las sesiones técnicas de exposición y coloquio de las ponencias y comunicaciones, se ha previsto la celebración de tertulias y conferencias sobre aspectos concretos y profesionales, acompañadas de un variado programa de actos sociales para inscritos y acompañantes.

**Participación e inscripción**

Puede participar en el Simposio toda persona cuya actividad tenga relación con la problemática de las aguas subterráneas.

Se ruega remitir la ficha de preinscripción a la mayor brevedad, a fin de facilitar la tarea organizativa y asegurar la recepción de próximas circulares.

**Correspondencia**

D. Antonio Fernández Uría

Secretario

V SIMPOSIO DE HIDROGEOLOGIA  
Santa Feliciano, 14, 1.º C  
28010 MADRID

## Notas bibliográficas

### GEOLOGIA GENERAL

901109. **Libro homenaje a Vicente Sos Baynat: Antología de sus obras sobre la geología de Extremadura.** ETSI Minas Madrid.

ITGE (1988), 502 pp., ref. disem., esp., bibl. ITGE.

\* Bibliografía personal, Geología, Extremadura.

901220. **El Servicio Geográfico del Ejército en la Antártida. Primera parte: Campaña verano austral 1987-1988.** ESTRADA, R.

*Bol. inf. Serv. Geogr. Ejército* (1989), núm. 68, 95-130, esp., bibl. ITGE.

\* Informe actividad, Institución, Expedición crucero, Investigación científica, Geodesia, Antártida.

### GEOLOGIA REGIONAL

901110. **Geología y morfología de las Sierras de las Villuercas (Cáceres).** SOS BAYNAT, V.

Libro Homenaje a Vicente Sos Baynat.

ITGE (1988), vol. 1, 19-129, 53 ref., esp., bibl. ITGE.

\* Cámbrico, Ordovícico, Silúrico, Devónico, Carbonífero, Pliogeo, Falla, Orogenia hercínica, Lineación, Relieve continente, Relieve estructural, Provincia Cáceres, Hercínico Centro.

901111. **Geología de las inmediaciones de Mérida (Badajoz).** SOS BAYNAT, V.

Libro Homenaje a Vicente Sos Baynat.

ITGE (1988), vol. 1, 189-287, 42 ref., esp., bibl. ITGE.

\* Silúrico, Devónico, Terciario, Cuaternario, Granito, Pegmatita, Diorita, Análisis químico, Batolito, Stock, Falla, Orogenia hercínica, Orogenia alpina, Provincia Badajoz.

901112. **Geología, Mineralogía y Mineralogía de la Sierra de San Cristóbal, Logrosán (Cáceres).** SOS BAYNAT, V.

Libro Homenaje a Vicente Sos Baynat.

ITGE (1988), vol. 1, 295-447, 77 ref., esp., bibl. ITGE.

\* Granito, Stock, Estaño sustancia, Uranio sustancia, Paragénesis, Cámbrico, Silúrico, Hercínico Centro, Provincia Cáceres.

### ESTRATIGRAFIA

901046. **Las biozonas de ammonoideos del Devónico (Emiense Inf. - Famenliense Inf.): Crítica al sistema de clasificación zonal.** MONTESINOS, J. R.

*Rev. esp. Paleontol.* (1990), vol. 5, 8-17, 8 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

\* Ammonoidea, Biostratigrafía, Fauna específica, Devónico, Provincia Palencia.

901048. **Una aproximación al límite Frasnense-Famenliense en la Sierra de Tabuena (Cordillera Ibérica, NE de España).** MONTESINOS, J. R.; TRUYOLS, M., y GOZALO, R.

*Rev. esp. Paleontol.* (1990), vol. 5, 35-39, 23 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

\* Límite estratigráfico, Frasnense, Famenliense, Biostratigrafía, Fauna ammonites, Fauna gastrópodos, Macizo Ibérico.

901049. **Biostratigraphy and tectonically controlled sedimentation of the Maestrichtian in Israel and adjacent countries.** ALMOGI, A.; FLEXER, A.; HONIGSTEIN, A.; ROSENFELD, A., y ROSENTHAL, E.

*Rev. esp. Paleontol.* (1990), vol. 5, 41-52, 54 ref., ing., res. esp., bibl. ITGE.

\* Biostratigrafía, Fauna foraminíferos, Litofacies, Asociación fósil, Isopaca, Paleogeografía, Maestrichtiense, Israel.

901051. **Modern Paleontology: Using biostratigraphy to the utmost.** BOUCOT, A. J.

*Rev. esp. Paleontol.* (1990), vol. 5, 63-70, 30 ref., ing., res. esp., bibl. ITGE.

\* Teoría, Biostratigrafía, Biogeografía, Evolución biológica, Adaptación, Extinción.

901117. **Relaciones bioestratigráficas y paleogeográficas del Paleozoico Superior Marino en el Gondwana sudamericano.** GONZALEZ, C. R.

*Acta geol. Lilloana* (1989), vol. 17, núm. 1, 5-20, 48 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

\* Paleogeografía, Gondwana, Biostratigrafía, Fauna invertidos, Carbonífero, Pérmico, América del Sur.

### GEMORFOLOGIA

901018. **Morfología glaciar del valle de Benasque (Pirineo Aragonés).** MARTINEZ DE PISON, E.

*Eria* (1989), núm. 18, 51-64, 12 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

\* Morfología glaciar, Erosión glaciar, Circo glaciar, Morrena, Periglaciario, Pleistoceno, Pirineos españoles, España.

901114. **Geomorfología del sector comprendido entre el Sistema Central y el Macizo de Santa María la Real de Nieva, Segovia.** FERNANDEZ GARCIA, M. P.

*Tesis doct. cienc. geol. Univ. Complut. Madrid* (1989), 336 pp., 182 ref., esp., bibl. ITGE.

\* Tesis, Geomorfología cuantitativa, Superficie erosión, Peneplanización, Sedimento, Terraza, Glacis, Relieve estructural, Terciario, Cuaternario, Provincia Segovia.

901115. **Morfología granítica de un sector del Guadarrama Occidental (Sistema Central Español).** CENTENO, J. D.

*Tesis doc. cienc. geol. Univ. Complut. Madrid* (1988), 321 pp., 250 ref., esp., bibl. ITGE.

\* Tesis, Geomorfología cuantitativa, Superficie erosión, Penillanura, Exposición relieve, Terraza, Piedemonte, Glacis, Alteración, Morfología erosión, Granito, Plioceno, Cuaternario, Sierra de Guadarrama, Provincias Madrid, Avila.

901221. **Digitalización de la altimetría de la Serie L. SANDOVAL, L.**

*Bol. inf. Serv. Geogr. Ejército* (1989), núm. 68, 131-143, esp., bibl. ITGE.

\* Topografía, Altimetría, Cartografía automática, Tratamiento datos.

### CUATERNARIO

901019. **Las aportaciones más recientes sobre las glaciaciones cuaternarias de los Pirineos.** SERRANO, E.

*Eria* (1989), núm. 18, 74-77, 42 ref., esp., bibl. ITGE.

\* Síntesis bibliográfica, Investigación en curso, Glaciación, Pirineos españoles.

### GEOLOGIA MARINA

901233. **Geología marina.** ITGE.

*Ind. min.* (1990), núm. 299, 35-38, esp., bibl. ITGE.

\* Geología marina, Histórico, Recurso natural, Legislación, Perspectiva.

### GEOLOGIA DEL INGENIERO

900804. **Catálogo nacional de riesgos geológicos.** ITGE. *Inst. Tecn. GeoMinero de Esp.* (1988), 263 pp., 479 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

\* Catálogo, Riesgo natural, España.

900805. **Estabilidad de laderas y taludes en el Valle del Guadalquivir.** ITGE.

*Inst. Tecn. GeoMinero de Esp.* (1989), 58 pp., 23 ref., esp., bibl. ITGE.

\* Estabilidad ladera, Riesgo natural, Mapa geológico medio ambiental, Neotectónica, Plioceno, Cuaternario, Cuenca Guadalquivir.

900806. **Plan director territorial de coordinación de Doñana y su entorno.**

*Junta de Andalucía* (1989), 2 vols., esp., bibl. ITGE.

\* Planificación regional, Utilización terreno, Protección medio ambiente, Legislación, Mapa geológico medioambiental, Mapa utilización terreno, Cuenca Guadalquivir, Provincias Cádiz, Huelva, Sevilla.

900807. **Doñana y su entorno: Catálogo de la Exposición del Plan Territorial de Coordinación de Doñana y su entorno.**

*Junta de Andalucía* (1989), 76 pp., esp., bibl. ITGE.

\* Planificación regional, Utilización terreno, Protección medio ambiente, Cuenca Guadalquivir, Provincias Cádiz, Huelva y Sevilla.

900907. **Sistema de evaluación cuantitativa de alternativas en la ubicación del nuevo Vertedero de Residuos Sólidos Urbanos de Málaga.** GALLEGO VALCARCE, E., y BARETTINO, D.

*Bol. Geol. Min.* (1990), vol. 101, núm. 2, 282-292, 10 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

\* Vertido controlado, Elección lugar, Estudio impacto medio, Residuo doméstico, Residuo sólido, Vertedero, Protección medio ambiente, Provincia Málaga.

900981. **Estudio de los materiales, procesos de alteración y metodología restauradora en la portada de la Casa de Castril (Museo Arqueológico de Granada).** RODRIGUEZ GORDILLO, J.; NAVARRETE, C., y GARATE, I.

*Bol. Soc. Esp. Mineral* (1989), vol. 12, núm. 1, 39-40, 7 ref., esp., bibl. ITGE.

\* Alteración meteórica, Piedra de construcción, Edificio, Calcarenita, Prevención, Caliza bioclástica, Provincia Granada.

900982. **Estudio mineralógico de un hormigón antiguo.** SORIANO, J.; GARCIA CALLEJA, M. A., y DE BENITO, A. *Bol. Soc. Esp. Mineral.* (1989), vol. 12, núm. 1, 41-42, 4 ref., esp., bibl. ITGE.

\* Hormigón, Túnel, Cambio iónico, Ión sulfato, Estabilidad, Carbonatación, Ión carbonato, Alteración química.

900983. **Estudio y caracterización de calizas ornamentales utilizadas en época romana.** ALVAREZ PEREZ, A., y PLANA LLEVAT, F.

*Bol. Soc. Esp. Mineral.* (1989), vol. 12, núm. 1, —43—, esp., bibl. ITGE.

\* Caliza, Piedra de construcción, Cantera, Material ornamentación, Jurásico, Cretácico, Provincia Soria.

900984. **Minería y Metalurgia en el asentamiento prehistórico de los Gavines (Mazarrón, Murcia).** ROS SALA, M. M.; ARANA, R., y GALVEZ, J.

*Bol. Soc. Esp. Mineral.* (1989), vol. 12, núm. 1 —44—, esp., bibl. ITGE.

\* Escoria, Mineralurgia, Oxido, Litargirio, Minio, Provincia Murcia.

901020. **La gestión de los residuos tóxicos y peligrosos en España.** UDAONDO, M.

*Estratos* (1990), núm. 16, 6-13, esp., bibl. ITGE.

\* Planificación, Política Estado, Legislación, Residuo industrial, Residuo peligroso, Sustancia tóxica, España, CEE.

901021. **Propuesta metodológica para la presentación cartográfica de los tipos dinámicos de ocupación y uso del suelo.** MARTINEZ VEGA, J.

*Estud. geogr.* (1989), núm. 195, 235-258, 18 ref., esp., res. ing., fr., bibl. ITGE.

\* Cartografía, Utilización terreno, Tratamiento dato, Conservación, Planificación regional.

901022. **La observación de la tierra desde el espacio: El mapa de ocupación de suelo de la Comunidad Económica Europea.** LOPEZ VIZOSO, J. M.

*Estud. geogr.* (1989), núm. 196, 409-434, 49 ref., esp., res. ing., fr., bibl. ITGE.

\* Cartografía, Utilización terreno, Teledetección multispectral, Planificación regional, Programa CORINE, CEE.

901057. **Eliminación y recuperación de metales pesados de efluentes industriales: análisis y comparación de procesos de tratamiento.** MARAÑON, E., y SASTRE, H.

*Rev. Tec. Medio Ambiente* (1990), núm. 17, 9-23, 85 ref., esp., bibl. ITGE.

\* Protección medio ambiente, Metal pesado, Efluente, Residuo industrial, Depuración.

901105. **II Jornadas de Educación Ambiental, celebradas en Valsain, Segovia, del 12 al 15 de noviembre de 1987.**

*MOPU*, 3 vols., esp., bibl. ITGE.

\* Reunión, Protección medio ambiente, Enseñanza.

901225. **Posibilidades de reutilización de los terrenos afectados por las canteras y minas a cielo abierto.** LOPEZ JIMENO, C., y MANGLANO, S.

*Cant. explot.* (1990), núm. 278, 81-93, 10 ref., esp., bibl. ITGE.

\* Protección medio ambiente, Reacondicionamiento, Cielo abierto, Cantera, Utilización terreno, Vertedero, Urbanización, Suelo recreativo, Agricultura.

901228. **Geotecnia y seguridad minera: evolución y ejemplos de aplicación en las explotaciones francesas.** PIGUET, J. P.

*Cant. explot.* (1990), núm. 280, 112-120, esp., bibl. ITGE.

\* Mecánica roca, Mina, Estabilización, Seguridad, Acción preventiva, Modelo, Francia.

901229. **Evaluación del impacto ambiental de los depósitos de estéril en la minería del carbón según el índice Qe. Cuenca de Ciñera-Matallana (Sector Oriental).** LEÓN. REDONDO, J. M.

*Eria* (1988), núm. 17, 251-258, esp., res. ing., fr., bibl. ITGE.

\* Estudio impacto medio, Protección medio ambiente, Planificación regional, Carbón, Estéril, Provincia León.

## PALEONTOLOGIA: INVERTEBRADOS

901047. **Aportación al conocimiento del subgénero Sphaeronassa (Locard) (Gasteropoda, Neogasteropoda) del Plioceno del Mediterráneo y del Atlántico adyacente.** GILI, C., y MARTINEZ, J.

*Rev. esp. Paleontol.* (1990), vol. 5, 19-33, 43 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

\* Neogasteropoda, Prosobranchia, Nassariidae, Ornamentación cabeza, Enrollamiento concha, Paleoecología, Evolución biológica, Filogenia, Biogeografía, Plioceno, Océano Atlántico, Mar Mediterráneo.

901052. **Metrarabdotos oriense N. sp. (Bryozoa Cheilostomata Ascophora) del Eoceno Medio de Vic (Barcelona). Una forma ramosa singular.**

*Rev. esp. Paleontol.* (1990), vol. 5, 71-76, 9 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

\* Cheilostomata, Nuevo taxón, Paleoecología, Biogeografía, Eoceno Medio, Provincia Barcelona.

901053. **Ammobaculites hiberensis sp. Nov. (Foraminifera) from the Upper Muschelkalk of Catalonia rangiers (Spain).** MARQUEZ, L., y TRIFONOVA, E.

*Rev. esp. Paleontol.* (1990), vol. 5, 77-80, 11 ref., ing., res. esp., bibl. ITGE.

\* Textulariina, Nuevo taxón, Muschelkalk, Cadena Costero Catalana.

901054. **Sobre la caracterización biométrica del crecimiento y la forma de los foraminíferos planctónicos. Aplicación de las series de Fourier al análisis de las formas de las cámaras.** GONZALEZ DONOSO, J. M., y PALMQVIST, P.

*Rev. esp. Paleontol.* (1990), vol. 5, 81-90, 33 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

\* Foraminíferos, Biometría, Morfología, Análisis multivariable, Análisis armónico.

901055. **Braquiópodos carboníferos de la costa E de Astu-**

**rias (España).** I. Orthida, Strophomenida, Rhynchonellida y Athyridida. MARTINEZ CHACON, M. L.

*Rev. esp. Paleontol.* (1990), vol. 5, 91-110, 65 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

\* Orthida, Strophomenida, Rhynchonellida, Spiriferida, Biostratigrafía, Carbonífero, Asturias.

901056. **Origen de las Globorotalias margaritate Bolli y Bermudez, del dominio del Mediterráneo. Un estudio biométrico.** GONZALEZ DONOSO, J. M.; LINARES, D.; PALMQVIST, P., y SERRANO, F.

*Rev. esp. Paleontol.* (1990), vol. 5, 111-118, 8 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

\* Globorotalia, Globorotaliidae, Globigerinacea, Biometría, Filogenia, Análisis multivariable, Análisis armónico, Mar Mediterráneo.

## PALEOBOTANICA

901050. **Distribución y microtafonomía de las asociaciones de diatomeas de sedimentos superficiales en el sector atlántico del Océano Antártico.** BARCENA, M. A., y FLORES, J. A.

*Rev. esp. Paleontol.* (1990), vol. 5, 53-62, 26 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

\* Diatomeas, Tafonomía, Biogeografía, Disolución, Holoceno, Antártico.

## TECTONICA

901106. **Geología del subsuelo de la Cuenca del Tajo.** QUEROL, R.

*ITGE* (1989), 48 pp., 14 planos, 28 ref., esp., SP ITGE.

\* Mapa geológico, Mapa geofísico, Cuenca Tajo, Levantamiento sísmico, Sísmica reflexión, Levantamiento gravimétrico, Levantamiento magnético, Levantamiento eléctrico, Sondeo eléctrico, Isocrona, Isobata, Anomalía Bouger, Secundario, Terciario.

901116. **Tectónica de los macizos paleozoicos al NE de Calatayud, rama aragonesa de la Cordillera Ibérica, provincia de Zaragoza.** TEJERA LOPEZ, R. M.

*Tesis doct. cienc. geol. Univ. Complut. Madrid* (1988), 320 pp., 220 ref., esp., bibl. ITGE.

\* Tesis, Tectónica superpuesta, Deformación polifásica, Pliegue, Falla, Geometría, Microtectónica, Esquistosidad, Precámbrico, Primario, Macizo Ibérico, Provincia Zaragoza.

## HIDROLOGIA - HIDROGEOLOGIA

901023. **El régimen del río Duero en la provincia de Soria.** ARCHILLA, R., y MUÑOZ MUÑOZ, J.

*Estud. geogr.* (1989), núm. 197, 501-530, 15 ref., esp., res. ing., fr., bibl. ITGE.

\* Río, Caudal río, Perfil longitudinal, Escorrentía, Variación temporal, Cuenca del Duero, España.

901025. **Mapa Orientación Vertido Residuos Sólidos Urbanos, escala 1:50.000** Instituto Tecnológico GeoMinero de España.

*Núm. 12 (Busto)*, 20 pp., 1 mapa, esp., SP ITGE.

\* Memoria explicativa, Mapa, Vertedero, Vertido controlado, Residuo sólido, Residuo doméstico, Acuífero, Protección medio ambiente, Estudio impacto medio, Asturias.

901026. **Mapa Orientación Vertido Residuos Sólidos Urbanos, escala 1:50.000.** Instituto Tecnológico GeoMinero de España.

*Núm. 13 (Avilés)*, 20 pp., 1 mapa, esp., SP ITGE.

\* Memoria explicativa, Mapa, Vertedero, Vertido controlado, Residuo sólido, Residuo doméstico, Acuífero, Protección medio ambiente, Estudio impacto medio, Asturias.

901027. **Mapa Orientación Vertido Residuos Sólidos Urbanos, escala 1:50.000.** Instituto Tecnológico GeoMinero de España.

*Núm. 15 (Lastres)*, 20 pp., 1 mapa, esp., SP ITGE.

\* Memoria explicativa, Mapa, Vertedero, Vertido controlado, Residuo sólido, Residuo doméstico, Acuífero, Protección medio ambiente, Estudio impacto medio, Asturias.

901028. **Mapa Orientación Vertido Residuos Sólidos Urbanos, escala 1:50.000.** Instituto Tecnológico GeoMinero de España.

*Núm. 27 (Tineo)*, 20 pp., 1 mapa, esp., SP ITGE.

\* Memoria explicativa, Mapa, Vertedero, Vertido controlado, Residuo sólido, Residuo doméstico, Acuífero, Protección medio ambiente, Estudio impacto medio, Asturias.

901029. **Mapa Orientación Vertido Residuos Sólidos Urbanos, escala 1:50.000.** Instituto Tecnológico GeoMinero de España.

*Núm. 28 (Grado)*, 20 pp., 1 mapa, esp., SP ITGE.

\* Memoria explicativa, Mapa, Vertedero, Vertido controlado, Residuo sólido, Residuo doméstico, Acuífero, Protección medio ambiente, Estudio impacto medio, Asturias.

901030. **Mapa Orientación Vertidos Residuos Sólidos Urbanos, escala 1:50.000.** Instituto Tecnológico GeoMinero de España.

*Núm. 30 (Villaviciosa)*, 20 pp., 1 mapa, esp., SP ITGE.

\* Memoria explicativa, Mapa, Vertedero, Vertido controlado, Residuo sólido, Residuo doméstico, Acuífero, Protección medio ambiente, Estudio impacto medio, Asturias.

901031. **Mapa Orientación Vertido Residuos Sólidos Urbanos, escala 1:50.000.** Instituto Tecnológico GeoMinero de España.

*Núm. 52 (Proaza)*, 20 pp., 1 mapa, esp., SP ITGE.

\* Memoria explicativa, Mapa, Vertedero, Vertido contro-

lado, Residuo sólido, Residuo doméstico, Acuífero, Protección medio ambiente, Estudio impacto medio, Asturias.

901032. **Mapa Orientación Vertido Residuos Sólidos Urbanos, escala 1:50.000.** Instituto Tecnológico GeoMinero de España.

Núm. 53 (Mieres), 20 pp., 1 mapa, esp., SP ITGE.

\* Memoria explicativa, Mapa, Vertedero, Vertido controlado, Residuo sólido, Residuo doméstico, Acuífero, Protección medio ambiente, Estudio impacto medio, Asturias.

901033. **Mapa Orientación Vertido Residuos Sólidos Urbanos, escala 1:50.000.** Instituto Tecnológico GeoMinero de España.

Núm. 77 (La Plaza), 20 pp., 1 mapa, esp., SP ITGE.

\* Memoria explicativa, Mapa, Vertedero, Vertido controlado, Residuo sólido, Residuo doméstico, Acuífero, Protección medio ambiente, Estudio impacto medio, Asturias.

90104. **Mapa Orientación Vertido Residuos Sólidos Urbanos, escala 1:50.000.** Instituto Tecnológico GeoMinero de España.

Núm. 1.026 (Padul), 19 pp., 1 mapa, esp., SP ITGE.

\* Memoria explicativa, Mapa, Vertedero, Vertido controlado, Residuo sólido, Residuo doméstico, Acuífero, Protección medio ambiente, Estudio impacto medio, Asturias.

901058. **La sobreexplotación de acuíferos, Almería, 1989.** PULIDO, A.; CASTILLO, A., y PADILLA, A.

Congreso Nacional «La sobreexplotación de acuíferos». Almería, 11-14 diciembre 1989.

*Temas Geológico-Mineros, ITGE*, núm. 10, 687 pp., ref. disem., esp., SP ITGE.

\* Reunión, Hidrogeología, Acuífero, Sobreexplotación, Captación, España.

901059. **Unidades hidrogeológicas con problemas de sobreexplotación en el territorio peninsular e Islas Baleares.** BATLLE, A.; GARCIA BERRIDO, F.; LOPEZ CAMACHO, B.; OCTAVIO DE TOLEDO, F.; SANCHEZ GONZALEZ, A., y VICENS, J. M.

Congreso Nacional «La sobreexplotación de acuíferos». Almería, 11-14 diciembre 1989.

*Temas Geológico-Mineros, ITGE*, núm. 10, 3-19, esp., SP ITGE.

\* Acuífero, Captación, Sobreexplotación, Balance de agua, Acción preventiva, Baleares, España.

901060. **Estado de la sobreexplotación estacional mediante un modelo de flujo en el acuífero de Río Verde (Almuñécar, Granada).** CALVACHE, M. L., y PULIDO, A.

Congreso Nacional «La sobreexplotación de acuíferos». Almería, 11-14 diciembre 1989.

*Temas Geológico-Mineros, ITGE*, núm. 10, 21-34, 7 ref., esp., res. ing., SP ITGE.

\* Acuífero, Captación, Sobreexplotación, Modelo matemático, Balance de agua, Intrusión agua salada, Superficie piezométrica, Estiaje, Hidrodinámica, Provincia Granada.

901061. **Sobreexplotación de acuíferos en la cuenca de Almanzora, Almería.** CASTILLO, E.; LUPIANI, E.; HIDALGO, J.; GONZALEZ ASENSIO, A., y ARANDA, J. A.

Congreso Nacional «La sobreexplotación de acuíferos». Almería, 11-14 diciembre 1989.

*Temas Geológico-Mineros, ITGE*, núm. 10, 35-41, 3 ref., esp., SP ITGE.

\* Acuífero, Captación, Sobreexplotación, Depresión acuífero, Recursos agua, Provincia Almería.

901062. **Consideraciones sobre la sobreexplotación de acuíferos en España.** CUSTODIO, E.

Congreso Nacional «La sobreexplotación de acuíferos». Almería, 11-14 diciembre 1989.

*Temas Geológico-Mineros, ITGE*, núm. 10, 43-64, 40 ref., esp., res. ing., SP ITGE.

\* Acuífero, Captación, Sobreexplotación, Recarga acuífero, Legislación, Acción preventiva, España.

901063. **La sobreexplotación en el acuífero de Ayamonte, Huelva.** GARCIA HERNAN, O.; VIRGOS, L. I.; SANCHEZ BIEC, J. M., y MOLINA, M. A.

Congreso Nacional «La sobreexplotación de acuíferos». Almería, 11-14 diciembre 1989.

*Temas Geológico-Mineros, ITGE*, núm. 10, 65-83, 14 ref., esp., res. ing., SP ITGE.

\* Acuífero, Captación, Sobreexplotación, Intrusión agua salada, Calidad agua, Piezometría, Acción preventiva, Provincia Huelva.

901064. **Características hidrodinámicas e hidroquímicas de la sobreexplotación del acuífero 25 en el sector Lepe-La Antilla-Isla Cristina, provincia de Huelva.** GONZALEZ MARTINEZ, A.; GRANDE, J. A.; ROMERO, E. M., y CABALLERO, M. A.

Congreso Nacional «La sobreexplotación de acuíferos». Almería, 11-14 diciembre 1989.

*Temas Geológico-Mineros, ITGE*, núm. 10, 85-101, 7 ref., esp., res. ing., SP ITGE.

\* Acuífero, Captación, Sobreexplotación, Hidroquímica, Intrusión agua salada, Descenso nivel de agua, Acción preventiva, Hidrodinámica, Provincia Huelva.

---

## MINERALOGIA: GENERALIDADES

---

901113. **Cinética del crecimiento cristalino por la técnica del gel.** SANTOS SANCHEZ, A.

*Tesis doc. cienc. geol. Univ. Compl. Madrid* (1989), 197 pp., 119 ref., esp., bibl. ITGE.

\* Tesis, Cinética, Crecimiento cristalino, Gel coloidal, Nucleación, Síntesis.

901224. **El momento actual de la fotomicrografía gemológica.**

*Bol. Inst. Gemol. Esp.* (1989), núm. 31, 19-23, esp., bibl. ITGE.

\* Gema, Investigación en curso, Fotografía, Microscopio.

---

## MINERALOGIA: SILICATOS

---

900989. **Estado estructural y composición de los feldespatos alcalinos de pegmatitas asociados a materiales metamórficos de alto grado (Macizo de Ursuya, Pirineos vascos).** ONDARROA, C., y PESQUERA, A.

*Bol. Soc. Esp. Mineral.* (1989), vol. 12, núm. 1, 52-53, 3 ref., esp., bibl. ITGE.

\* Grupo feldespatos alcalino, Feldespatos alcalino, Orden desorden, Macía, Diagrama monocristal, Fórmula, Pertita, Pegmatita, Cámbrico, Ordovícico, Provincias vascas, Pirineos españoles.

900992. **Características composicionales y geotermométricas de clinopiroxenos en doleritas triásicas («Ofitas») del área de «El Grado-Aguinallu» (provincia de Huesca).** LAGO, M.; AMIGO, S. M., y POCOVI, A.

*Bol. Soc. Esp. Mineral.* (1989), vol. 12, núm. 1, 57-58, esp., bibl. ITGE.

\* Piroxeno, Grupo piroxeno, Dato mineral, Geotermometría, Cristalización, Dolerita, Trías, Provincia Huesca.

900993. **Características composicionales y geotermométricas de piroxenos en rocas calco-alcalinas, stephaniensepérmicas, en la Cadena Ibérica (provincia de Teruel).** LAGO, M.; AMIGO, J. M.; TORRES, J. A.; BAMBO, C.; HIDALGO, M. A., y POCOVI, A.

*Bol. Soc. Esp. Mineral.* (1989), vol. 12, núm. 1, 59-60, esp., bibl. ITGE.

\* Piroxeno, Grupo piroxeno, Dato mineral, Geotermometría, Composición calcoalcalina, Stephaniense, Pérmico, Macizo Ibérico, Provincia Teruel.

901223. **Determinación de rasgos de tratamiento, en topacios azules irradiados, por espectroscopía gamma de alta resolución.** COZAR, J. S.

*Bol. Inst. Gemol. Esp.* (1989), núm. 31, 8-18, 15 ref., esp., res. ing., bibl. ITGE.

\* Topacio, Nesosilicato, Gema, Espectrometría gamma, Alta resolución, Irradiación.

---

## MINERALOGIA: NO SILICATOS

---

900958. **Estudio espectroscópico por IR y RAMAN de sulfatos dobles del tipo Langbeinita cristalizados a partir de soluciones hirvientes.** RULL, F.; ALIA, J. M., y VEINTEMI LLAS, S.

*Bol. Soc. Esp. Mineral.* (1989), vol. 12, núm. 1, 7-8, 2 ref., esp., bibl. ITGE.

\* Sulfato, Langbeinita, Solución acuosa, Crecimiento cristalino, Nucleación, Precipitación, Estabilidad.

900959. **Crecimiento de cristales de Anglesita y Celestina en gel de sílice. Transferencia de masa y criterios de cristalización.** FERNANDEZ DIAZ, L.; ZAVALA, C.; SAN MIGUEL, A.; LOPEZ ANDRES, S., y PRIETO, M.

*Bol. Soc. Esp. Mineral.* (1989), vol. 12, núm. 1, —9—, 2 ref., esp., bibl. ITGE.

\* Sulfato, Celestina, Anglesita, Crecimiento cristalino, Gel coloidal, Nucleación.

900960. **Tl, As and Hg sulfides and sulfosalts as suitable microprobe reference material: synthesis analytical characterization and applications.** SCHMIDT, S. TH.; PANIAGUA, A.; GRZETIC, I., y PIESTRYZNSKI, A.

*Bol. Soc. Esp. Mineral.* (1989), vol. 12, núm. 1, —10—, 3 ref., ing., bibl. ITGE.

\* Sulfosal, Sulfuro, Microsonda electrónica, Teluro, Arsenico, Mercurio, Síntesis.

900961. **Synthetic chalcogenides, antimonides and arsenides of precious metals as suitable microprobe reference material.** PANIAGUA, A.; SCHMIDT, S. TH., y KLEIN, D.

*Bol. Soc. Esp. Mineral.* (1989), vol. 12, núm. 1, —11—, 1 ref., ing., bibl. ITGE.

\* Síntesis, Microsonda electrónica, Antimoniuro, Arseniuro, Chalcogenidos, Sulfosal, Metal precioso.

900968. **Discusión sobre el papel estructural del agua de hidratación en el yeso y la basanita.** ALIA, J. M., y RULL, F.

*Bol. Soc. Esp. Mineral.* (1989), vol. 12, núm. 1, —21—, 1 ref., esp., bibl. ITGE.

\* Sulfato, Yeso, Basanita, Deshidratación, Hidratación, Estructura cristalina.

900970. **Estudio de las propiedades magnéticas del mineral tavorita, LiFe(PO<sub>4</sub>)(OH, F). Natural y sintético.** PIZARRO, J. L.; DANCE, J. M.; VILLANEUVE, G., y ARRIBOR-TUA, M. I.

*Bol. Soc. Esp. Mineral.* (1989), vol. 12, núm. 1, 23-24, 2 ref., esp., bibl. ITGE.

\* Fosfato, Ambligonita, Tavorita, Estructura cristalina, Dato RX, Propiedad magnética, Síntesis.

900978. **Caracterización óptica de fluoritas españolas.** MILLAN, A.; GARCIA GUINEA, J.; ARRIBAS, J. G., y CALDERON, T.

*Bol. Soc. Esp. Mineral.* (1989), vol. 12, núm. 1, —35—, esp., bibl. ITGE.

\* Fluoruro, Fluorita, Color, Impureza, Propiedad óptica, España.

900979. **Caracterización óptica de la esparragina.** LIFANTE, G., y CALDERON, T.

*Bol. Soc. Esp. Mineral.* (1989), vol. 12, núm. 1, —36—, esp., bibl. ITGE.

\* Fosfato, Apatito, Esparragina, Color, Impureza, Propiedad óptica, Luminiscencia, Provincia Murcia.

900980. **Determinación de sulfatos hidratados por fluorescencia de Rayos X.** PEREZ SIRVENT, C.; ORTIZ, R.; ARANA, R.; LOPEZ AGUAYO, F., y MANCHEGO, M. A.

*Bol. Soc. Esp. Mineral.* (1989), vol. 12, núm. 1, 37-38, bibl. ITGE.

\* Dato mineral, Sulfato, Patrón químico, Fluorescencia RX, Provincia Murcia.

---

## PETROLOGIA DE ROCAS SEDIMENTARIAS

---

901016. **Génesis de rocas epiclásticas a partir de la erosión de domos ácidos submarinos, un ejemplo del Paleozoico del Sarrabus (SE de la isla de Cerdeña, Italia).** GIMENO TORRENTE, D.



*Bol. Soc. Esp. Mineral.* (1989), vol. 12, núm. 1, 95-96, 2 ref., esp., bibl. ITGE.

\* Roca clástica, Génesis, Erosión, Domo, Primario, Cerdeña, Italia.

## PETROLOGIA DE ROCAS IGNEAS Y METAMORFICAS

901104. **Field trip to Tenerife (Cañadas, Caldera).** MARTI, J.; MITJAVILA, J., y ARAÑA, V.

European Science Foundation. Meeting on Canarian Volcanism.

*ITGE* (1989), 42 pp., 29 ref., ing., bibl. ITGE.

\* Excursión, Libro guía, Reunión, Volcán, Caldera, Manifestación volcánica, Isla Tenerife, Canarias.

## YACIMENTOLOGIA: METALES

900991. **Estudio de las magnetitas de Latedo. Contribución al conocimiento geológico y metalogénico de las mineralizaciones de Fe asociadas a los materiales ordovícicos de la provincia de Zamora.** FERNANDEZ FERNANDEZ, A., y MORO BENITO, M. C.

*Bol. Soc. Esp. Mineral.* (1989), vol. 12, núm. 1, —56—, esp., bibl. ITGE.

\* Yacimiento estratiforme, Hierro sustancia, Anomalía magnética, Magnetita, Singénesis, Diagénesis, Ordovícico, Provincia Zamora.

900995. **Geología y mineralogía de los niveles calcosilicatados con scheelita interstratificados en el complejo esquistograuváquico de Villalcampo (Zamora).** GIL ACERO, M., y MORO, M. C.

*Bol. Soc. Esp. Mineral.* (1989), vol. 12, núm. 1, 63-64, 2 ref., esp., bibl. ITGE.

\* Tungsteno sustancia, Scheelita, Yacimiento estratoide, Roca metamórfica, Riolita, Granodiorita, Precámbrico, Primario, Provincia Zamora.

900996. **Las mineralizaciones de Sn asociadas a la zona de cizalla dextra del complejo granítico-metamórfico de Villaseco-Pereruela (Zamora).** HERNANDEZ PACHECO, E., y MORO, M. C.

*Bol. Soc. Esp. Mineral.* (1989), vol. 12, núm. 1, 65-66, 2 ref., esp., bibl. ITGE.

\* Estaño sustancia, Filón, Yacimiento hidrotermal, Granito, Metasomatosis, Zona cizalla, Provincia Zamora.

900997. **Relaciones genéticas entre las mineralizaciones de Sn (W y P) del complejo esquistograuváquico de Villalcampo y las de Sn del complejo granítico laminar de Villa-**

**seco-Pereruela.** GIL ACERO, M.; HERNANDEZ SANCHEZ, E., y MORO, M. C.

*Bol. Soc. Esp. Mineral.* (1989), vol. 12, núm. 1, —67—, esp., bibl. ITGE.

\* Yacimiento hidrotermal, Estaño sustancia, Tungsteno sustancia, Fosfato sustancia, Granito, Anfibolita, Metamorfismo regional, Asimilación magmática, Provincia Zamora.

900999. **Contenido y distribución del U y Th en el granito de Montánchez (Cáceres).** REGUILLON, R. M., y ARRIBAS, A.

*Bol. Soc. Esp. Mineral.* (1989), vol. 12, núm. 1, —69—, esp., bibl. ITGE.

\* Granito, Granito alcalino, Granito de dos micas, Análisis elemento traza, Uranio sustancia, Torio sustancia, Provincia Cáceres.

901002. **Características de los fluidos hidrotermales asociados a los filones de cuarzo con Sn y W del yacimiento de San Flinx, La Coruña, España.** MANGAS, J., y ARRIBAS, A.

*Bol. Soc. Esp. Mineral.* (1989), vol. 12, núm. 1, 74-75, esp., bibl. ITGE.

\* Tungsteno sustancia, Estaño sustancia, Filón, Yacimiento hidrotermal, Fluido mineralizador, Asociación mineral, Provincia La Coruña.

901003. **Estudio mineralógico y textural de la zona de alteración supergénica del yacimiento de sulfuros complejos (Mina Antonia, Los Oscos, Asturias).** GARCIA IGLESIAS, J., y LAREDO PEREZ, J.

*Bol. Soc. Esp. Mineral.* (1989), vol. 12, núm. 1, —76—, esp., bibl. ITGE.

\* Montera de hierro, Hierro sustancia, Cobre sustancia, Plomo sustancia, Cinc sustancia, Plata sustancia, Oro sustancia, Proceso exógeno, Ordovícico Medio, Asturias.

901004. **An example of hydrothermal zoning As-Sb-Au and Hg mineralisation in the Cantabrian Zone (N Spain). The Pedrosa del Rey Area, NE León.** GUTIERREZ, J. L.; PANIAGUA, A.; RODRIGUEZ PEVIDA, L. S., y LUQUE, C.

*Bol. Soc. Esp. Mineral.* (1989), vol. 12, núm. 1, —77—, 4 ref., ing., bibl. ITGE.

\* Yacimiento hidrotermal, Antimonio sustancia, Mercurio sustancia, Oro sustancia, Arsénico sustancia, Control litológico, Control tectónico, Carbonífero, Pérmico, Provincia León.

## YACIMENTOLOGIA: SUSTANCIAS NO METALICAS

901015. **Mineralizaciones fosfático-baríticas (+sulfuros) en litofacies carbonáticas condensadas Devónicas del Sarabus (SE de la isla de Cerdeña, Italia).** GIMENO, D.; MARRINI, C., y SISTU, G.

*Bol. Soc. Esp. Mineral.* (1989), vol. 12, núm. 1, 93-94, 3 ref., esp., bibl. ITGE.

\* Yacimiento sedimentario, Fosfato sustancia, Barita sus-

tancia, Diagénesis precoz, Fosfatización, Roca carbonatada, Devónico, Cerdeña, Italia.

901227. **El yacimiento de Wollastonita de Aroche, Huelva.** GRIFFO, J. L., y RINCON, A.

*Cant. explot.* (1990), núm. 280, 95-108, esp., bibl. ITGE.

\* Wollastonita, Cerámica, Composición mineralógica, Análisis químico, Calidad mineral, Yacimiento metamorfoógico, Histograma, Provincia Huelva.

## FISICA DEL GLOBO

901219. **Concepto de precisión y fiabilidad en redes geodésicas.** NUÑEZ GARCIA DEL POZO, A.

*Bol. inf. Serv. Geogr. Ejército* (1989), núm. 68, 67-94, 7 ref., esp., bibl. ITGE.

\* Red geodésica, Precisión, Fiabilidad, Ecuación matemática.

## MAPAS

901222. **Información cartográfica. Designación y numeración de hojas.** SGE.

*Bol. inf. Serv. Geogr. Ejército* (1989), núm. 68, 197-223, esp., bibl. ITGE.

\* Mapa topográfico, Mapa índice, España.

901234. **Puebla de Lillo.** ALVAREZ MARRON, J.; PEREZ ESTAUN, A.; ALLER, N., y HEREDIA, N.

*Mapa geol. Esp.*, escala 1:50.000. MAGNA. ITGE.

Núm. 79, 60 pp., 128 ref., 1 mapa, esp., SP ITGE.

\* Memoria explicativa, Mapa geológico, Cámbrico, Ordovícico, Devónico, Carbonífero, Cuaternario, Tectónica imbricada, Carbón, Provincia León, Arco Asturiano.

901235. **Hinojosa del Duque.** MIRA, M.; ORTEGA, E.; RODRIGUEZ, P., y SOUBRIER, J.

*Mapa geol. Esp.*, escala 1:50.000. MAGNA. ITGE.

Núm. 833, 57 pp., 52 ref., 1 mapa, esp., SP ITGE.

\* Memoria explicativa, Mapa geológico, Precámbrico, Ordovícico, Silúrico, Devónico, Carbonífero, Terciario, Cuaternario, Granito, Granodiorita, Aplita, Roca volcánica, Tectónica superpuesta, Provincias Córdoba, Ciudad Real, Hercínico Sur.

901236. **Oliva de la Frontera.** JORQUERA, A.; DELGADO, J., y APALATEGUI, O.

*Mapa geol. Esp.*, escala 1:50.000. MAGNA. ITGE.

Núm. 874, 39 pp., 23 ref., 1 mapa, esp., SP ITGE.

\* Memoria explicativa, Mapa geológico, Cámbrico, Ordovícico, Silúrico, Devónico, Carbonífero Inf., Cuaternario,

Roca metamórfica, Roca ígnea, Tectónica superpuesta, Calbagamiento, Provincia Badajoz, Hercínico Sur.

901237. **Santa Olalla del Cala.** APALATEGUI, O.; CONTRERAS, F., y EGUILUZ, L.

*Mapa geol. Esp.*, escala 1:50.000. MAGNA. ITGE.

Núm. 918, 65 pp., 33 ref., 1 mapa, esp., SP ITGE.

\* Memoria explicativa, Mapa geológico, Precámbrico, Cámbrico, Ordovícico, Silúrico, Devónico, Carbonífero, Cuaternario, Ortoanfíbrolita, Ortogneis, Granodiorita, Tectónica encajante, Hercínico Sur, Provincias Badajoz, Huelva.

## ECONOMIA MINERA

901024. **Desarrollo de Operaciones Mineras. Informe Anual 1989.**

*DOMI*, 43 pp., esp., bibl. ITGE.

\* Informe anual, Informe actividad, Sociedad, Trabajos públicos, Carbón, España, Colombia.

901037. **Memoria ASERPETROL 1988.**

*Asoc. de Empresas Refinadoras de Petróleo*, 136 pp., esp., bibl. ITGE.

\* Informe anual, Informe actividad, Hidrocarburos, Refino, España.

901038. **Memoria CARBOEX 1989.**

*Soc. Esp. Carbón Exterior*, 52 pp., esp., bibl. ITGE.

\* Informe anual, Informe actividad, Carbón, Sociedad, Mercado, España.

901041. **Memoria ENCASUR 1989.**

*Empresa Nacional Carbonífera del Sur*, 43 pp., esp., bibl. ITGE.

\* Informe anual, Informe actividad, Sociedad Estado, Carbón, España.

901042. **Memoria ENRESA 1988.**

*Empresa Nacional de Residuos Radioactivos, S. A.*, 55 pp., esp., bibl. ITGE.

\* Informe actividad, Informe anual, Sociedad Estado, Residuo radioactivo, España.

901108. **La minería murciana contemporánea (1840-1930).** VILAR, J. B.; EGEA, P. M., y VICTORIA, D.

*Univ. Murcia* (1990), vol. 1, 362 pp., ref. disem., esp., bibl. ITGE.

\* Histórico, Panorama minero, Plomo sustancia, Hierro sustancia, Cinc sustancia, Provincia Murcia.

901226. **Posibilidades de obtención de mica blanca a partir de subproductos del tratamiento de pegmatitas.** LOPEZ GOMEZ, F. A.; FORMOSO, A.; MEDINA, J.; SAINZ VELICIA, E., y GARCIA FRUTOS, J.

*Cant. explot.* (1990), núm. 279, 53-57, 2 ref., esp., bibl. ITGE.

\* Mica sustancia, Pegmatita, Recuperación secundaria, Granulometría, Composición mineralógica, Concentración.

# 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

## Áreas tecnológicas y sectores de actuación del ITGE

**GEOLOGIA Y GEOFISICA:** Cartografía geológica (Mapa Geológico Nacional), Cartografía temática.—Estudios geológicos específicos.—Investigación geofísica.—Cartografía marina y estudio de la plataforma continental.—Teledetección aplicada a la investigación geológico-minera.

**RECURSOS MINERALES:** Infraestructura metalogenética y minera.—Recursos energéticos y no energéticos.—Minerales y rocas industriales y ornamentales.—Desarrollo minero y mineralurgia.—Seguridad minera.

**AGUAS SUBTERRANEAS Y GEOLOGIA AMBIENTAL:** Infraestructura hidrogeológica.—Investigación, captación y protección de aguas subterráneas.—Vertidos y control de contaminación de acuíferos.—Recursos geotérmicos.—Geología ambiental: Riesgos geológicos, medio ambiente minero, etc.

**CENTRO DE LABORATORIOS Y ENSAYOS:** Análisis químicos y mineralógicos.—Mineralurgia y ensayos geotécnicos.—Sondeos de investigación hidrogeológica y minera.—Ensayos de bombeo y tratamientos especiales de sondeos.—Desarrollo de nuevas tecnologías para procesos metalúrgicos.

**INFORMACION, DOCUMENTACION Y BANCO DE DATOS:** Banco de datos geológico-mineros y de Ciencias de la Tierra.—Ordenación del fondo documental y bibliográfico.—Desarrollo de aplicaciones geomatemáticas, cartografía automática, análisis multivariante, etc.—Catastro Minero Nacional.—Publicaciones e informes.