



Instituto Tecnológico
GeoMinero de España

boletín

geológico

y minero

VOLUMEN 104

Enero - Febrero 1993

NUMERO 1



REVISTA BIMESTRAL DEL ITGE FUNDADA EN 1874

ISSN 0366 -0176

Volumen 104
Número 1
Enero - Febrero 1993

boletín geológico y minero

20 OCT 1993

J. L. II



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

Sumario

Geología	F. SANCHEZ SERRANO, J. M. GONZALEZ CASADO y G. DE VICENTE MUÑOZ: Evolución de las deformaciones alpinas en el borde sur-oriental del Sistema Central Español (Zona de Tamajón, Guadalajara).	3
	A. RIAZA GARCIA: Reflectancia en rocas en función de su litología y fábrica interna.—III. El Complejo Esquisto-grauváquico. Estudio de estructuras menores y microestructuras como base para la comprobación del significado estructural de diferencias espectrales en imágenes ...	13
Minería	J. GOMEZ DE LAS HERAS, A. OCHOA BRETON y S. FALCON DE ANDRES: El programa DHH como apoyo a los estudios de subsidencia minera.	33
Aguas subterráneas	A. NAVARRO ALVARGONZALEZ: Miniprogramas (IV). Acuíferos Costeros.	41
Geoquímica	S. DEL BARRIO MARTIN, R. BENITO GARCIA y F. J. VALLE FUENTES: Efecto del reactivo de ataque sobre la determinación de boro en materiales geológicos por ICP-AES ...	52
Ingeniería geoambiental	B. MARISCAL: Fluctuación climática y actividad antrópica durante el Sub-boreal. Estudio polínico de Almizaraque, Herrerías (Cuevas de Almazora) Almería ...	58
Estudio de minerales y rocas	A. VERGARA PARDEIRO: Contribución al estudio del color del granito «Rosa Porriño» ...	65
Información	O. PUCHE RIART y F. J. AYALA CARCEDO: La «Orygthología» de Juan José Elhúyar (1754-1796) y la «Oritognosia» de Andrés Manuel del Río (1764-1849), primeros tratados geológicos escritos por españoles en América ...	72
	Noticias ...	109

DIRECCION, REDACCION Y PUBLICACION

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

ADMINISTRACION, DISTRIBUCION Y SUSCRIPCION

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

**INSTITUTO TECNOLOGICO
GEOMINERO DE ESPAÑA**

**CENTRO DE PUBLICACIONES
MINISTERIO DE INDUSTRIA, COMERCIO Y TURISMO**

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

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

EXPLICACION DE PORTADA

Las Blancas de La Larrí. Devoniano del valle de Pineta. Pirineo Central.
(Foto: Luis M.^a Ríos.)

Depósito legal: M. 3.279 - 1958
ISSN 0366 - 0176
NIPO 241 - 93 - 003 - 0

Imprenta Ideal, S. A. - Chile, 27 - Telef. 359 57 55 - 28016-MADRID

Evolución de las deformaciones alpinas en el borde suroriental del Sistema Central Español (Zona de Tamajón, Guadalajara).

Por F. SANCHEZ SERRANO (*), J. M. GONZALEZ CASADO (**), y G. DE VICENTE MUÑOZ (*)

RESUMEN

Los resultados del análisis estructural y del análisis de fallas (métodos de los diedros rectos Etchecopar, y modelo de deslizamiento), en el borde suroriental del Sistema Central Español, permiten establecer la siguiente sucesión de eventos deformativos: una primera etapa compresiva, con escasa incidencia macroestructural, que responde a una dirección de compresión N 55°-70° E, relacionada con la estructuración de la Cordillera Ibérica; una segunda etapa compresiva, con dirección de compresión próxima a N 150° E, durante la cual se originan las principales macroestructuras de la región (cabalgamientos de dirección ENE-OSO y desgarres N 10°-20° E y N 130°-140° E); y una última etapa, de carácter extensional, con extensión máxima según E-O, con la que se asocia la fracturación que controla el depósito de las series miocenas. Se ha encontrado una notable concordancia entre los resultados obtenidos con los diferentes métodos de análisis poblacional de fallas.

Palabras clave: Tectónica alpina, Análisis de fallas, Sistema Central Español.

ABSTRACT

In this paper, several methods of structural analysis and populational fault analysis have been used in order to establish the main Alpine deformation events in the South-east part of the Spanish Central System. The Alpine evolution shows a first compressional event with maximum shortening in N 55°-70° E and without macrostructures. A second one has maximum shortening direction around N 150° E, with N 60°-80° E thrusts and N 10°-20° E and N 130°-140° E strike-slip faults related. The main Alpine structures in this area were developed during this event. The last one has an extensional character, with E-W maximum extension trend. The Miocene sedimentation has been probably controlled by the faults developed during this deformation (N 10°-20° E and N 10°-20° W). The shortening and stretching directions deduced from the different analysis methods shown a good agreement between them.

Key words: Alpine tectonics, Fault Analysis, Spanish Central System.

1. INTRODUCCION

El borde suroriental del Sistema Central Español está formado por una orla de rocas sedimentarias de edad mesozoica y cenozoica (paleógeno), situada entre las rocas metamórficas del Macizo Hespérico, al norte, y los rellenos sedimentarios de edad neógena de la Cuenca del Tajo, al sur. Este conjunto de rocas se encuentra

afectado por una serie de pliegues y fallas desarrollados durante la orogenia alpina. Estas estructuras originan los relieves de lo que hoy conocemos como Sistema Central Español. Estos pliegues y fallas alpinas han comenzado a ser estudiados recientemente, dentro del conjunto del Sistema Central (DE VICENTE, 1988a; CAPOTE et al., 1990; CALVO et al., 1991; SANCHEZ-SERRANO, 1991). Los resultados de estos estudio indican que las estructuras tectónicas se han desarrollado, mayoritariamente, bajo esfuerzos compresivos. En el presente trabajo se estudia la evolución temporal de las orientaciones de los esfuerzos y los tipos de elipsoides de deforma-

(*) Dpto. Geodinámica. Fac. CC. Geológicas. Univ. Complutense. 28040 Madrid.

(**) Dpto. Química Agrícola, Geología y Geoquímica. Fac. Ciencias. Univ. Autónoma. 28049 Madrid.

ción desarrollados durante el ciclo alpino en la zona de Tamajón-Cogolludo, al noroeste de la provincia de Guadalajara (fig. 1).

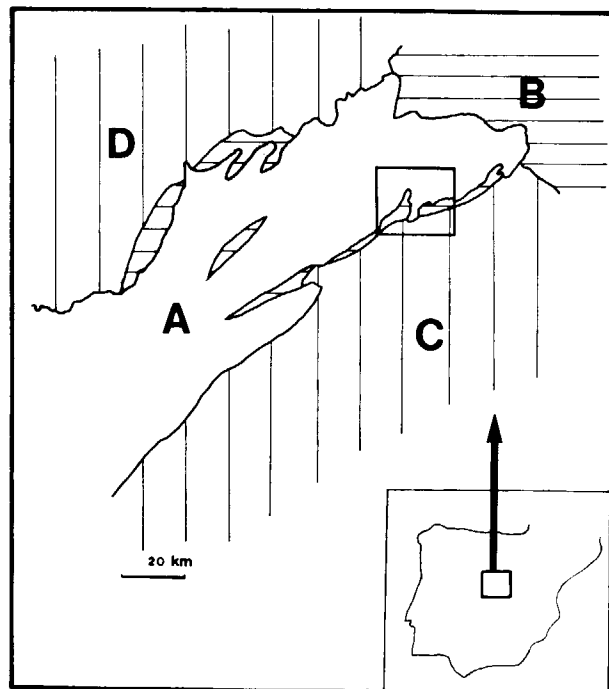


Figura 1.—Situación geográfica y geológica del área de estudio. En blanco, materiales paleozoicos y prepaleozoicos; en rayado horizontal, materiales mesozoicos y paleógenos; en rayado vertical, materiales neógenos. A: Sistema Central Español; B: Cordillera Ibérica; C: Cuenca del Tajo; D: Cuenca del Duero. El recuadro indica el área correspondiente a la figura 2.

En esta región, las estructuras más importantes, de carácter compresivo, son un conjunto de pliegues y cabalgamientos de dirección $N 60^{\circ}-70^{\circ} E$, concordantes con la orientación del borde del Sistema Central. Las estructuras citadas están acompañadas por fallas de desgarramiento transversales (SANCHEZ-SERRANO, 1991). El estudio tectónico de las estructuras alpinas se ha abordado desde varios puntos de vista; se han analizado, por ejemplo, las orientaciones y características de los estilolitos, estrías de fallas, y otras microestructuras tectónicas, aplicando sobre los datos obtenidos varios métodos de análisis poblacional de microestructuras. Las deformaciones más recientes se han estudiado de

forma macroestructural, a través de su relación con la sedimentación de las series aluviales del Mioceno Superior.

2. METODOLOGIA DE ANALISIS DE FALLAS

Para determinar los parámetros tectónicos deducibles del análisis de fallas (orientación de esfuerzos, tipos de elipsoides de deformación y de esfuerzo, dirección de máximo acortamiento horizontal, etc.), se ha optado por la aplicación simultánea de diversos métodos, como propone DE VICENTE (1988b). Los resultados han sido complementados y contrastados con los datos obtenidos del estudio de otros indicadores cinemáticos, estilolitos y venas de tensión.

Se han utilizado tres métodos diferentes de análisis poblacional de fallas (diedros rectos, Etchecopar y modelo de deslizamiento). Todos ellos son métodos estadísticos, que conservan la individualidad de cada dato, para así evitar errores de sesgo que podrían falsear el resultado final (DE VICENTE, 1988b). Las principales características de cada método son las siguientes:

El método de los Diedros Rectos, o de los diagramas P-T (ANGELIER y MECHLER, 1977; ANGELIER, 1984) es un método gráfico, basado en el criterio de fracturación de ANDERSON (1951), que da como resultado unas áreas, sobre proyección estereográfica, más o menos grandes, dentro de las cuales se situarán los máximos esfuerzos de compresión (P) y extensión (T). Debido a la escasa precisión de este método para pequeñas poblaciones de fallas, sólo lo utilizaremos como una primera aproximación para determinar las orientaciones de los ejes de esfuerzos, previamente a la aplicación de los otros métodos.

El método de Etchecopar (ETCHECOPAR, 1984; ETCHECOPAR y MATTAUER, 1988) es un método matemático que, a partir de la ecuación de BOTT (1959), intenta encontrar un tensor de esfuerzos que explique el mayor número posible de fallas dentro de la población estudiada. Este ajuste se produce por comparación entre la estría teórica que produciría dicho tensor sobre un plano de falla, y la estría real medida en esa falla. Este método proporciona la orientación de los ejes y un parámetro que define la forma del elipsoide

de esfuerzos. Además, permite comprobar la calidad de la solución para cada una de las fallas mediante un histograma de desviaciones angulares. De este modo, se puede volver a aplicar el proceso a las fallas no explicadas por el primer tensor, obteniéndose sucesivos tensores que pueden representar distintas etapas de fracturación, o distintos tipos de fracturación para la misma etapa.

El modelo de deslizamiento («slip model»), definido por RECHES (1983), RECHES y DIETERICH (1983) para generalizar el modelo de ANDERSON (1951), se base en una geometría ortorrómbica de la distribución de las familias de fallas, comprobada empírica y experimentalmente, y causada por un campo de esfuerzos tridimensional. A partir de este modelo, y de las ecuaciones que lo definen (RECHES, 1983), DE VICENTE

(1988a y 1988b), elabora una serie de métodos de análisis poblacional, en función del elipsoide de deformación. Estos métodos, cuya solución puede ser tanto gráfica como numérica, proporcionan, a partir de los parámetros de la falla medida (dirección, buzamiento y cabeceo de la estría), el tipo de falla (en función del parámetro K' del elipsoide de deformación) y la dirección de máximo acortamiento horizontal (e_y), para cada una de las fallas.

3. RESULTADOS DEL ANALISIS MICROESTRUCTURAL

Los datos microestructurales se han recogido en cinco estaciones repartidas por los materiales mesozoicos afectados por las deformaciones estudiadas (fig. 2). Concretamente, se han me-

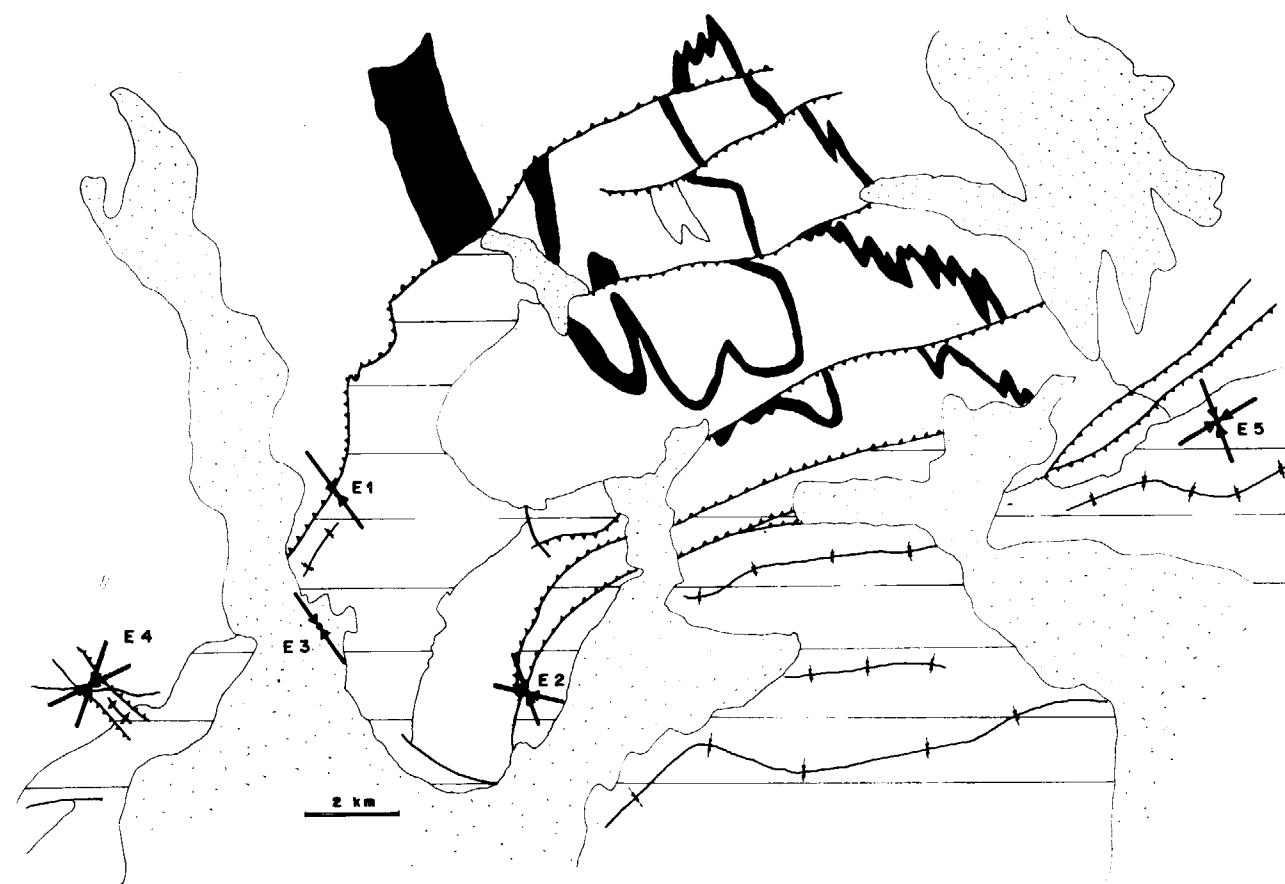


Figura 2.—Distribución de las estaciones de datos de fallas, y direcciones de acortamiento deducidas del análisis microestructural. E1: Tamajón; E2: Beleña; E3: Retiendas; E4: Valdesotos; E5: Alcorlo. En punteado, materiales del Mioceno Superior; con rayas horizontales, materiales mesozoicos (Triásico y Cretácico) y cenozoicos (Paleógeno); en negro, cuarcitas del Ordovícico; en blanco, el resto de la serie paleozoica (modificado de las hojas del mapa geológico del ITGE núm. 460, 485 y 486, y de SANCHEZ-SERRANO, 1991).

dido datos de planos y estrias de falla, estilolitos, venas tensionales y planos de estratificación en areniscas triásicas y calizas cretácicas. Del análisis poblacional de las fallas, según los tres métodos descritos en el apartado anterior (tabla 1 y figs. 3 a 5) se pueden extraer las siguientes conclusiones:

ESTACION Y N° FALLAS	MÉTODOS					
	P-T	ETCHECOPAR			DESPLAZAMIENTO	
	DIRECC. COMPR.	TENSOR	σ_1	σ_3	TIPO	Dey TIPO
E 1 TAMAJON (35)	120-150	1(50%)	322/05	131/84	INVER	140 63% INVER
	DESG + INV	2(40%)	290/05	198/23	DESG	37% DESG
E 2 BELEÑA (20)	100-110 D+I	1(60%)	331/06	219/72	INVER	110 65% INVER
	140-150 D+I	2(30%)	267/05	16/74	INVER	150 35% DESG
E 3 RETIENDAS (19)		1(50%)	127/11	37/01	DESG	140 58% DESG
		2(42%)	139/05	22/77	INVER	21% NORM 21% INVER
E 4 VALDESOTOS (31)		1(50%)	276/47	179/06	DESG	70 52% NORM
		2(19%)	197/13	16/76	INVER	22% DESG 25% INVER
E 5 ALCORLO (24)	160 NORM	1(50%)	230/80	66/09	NORM	160 62% NORM
	45-120 INV	2(25%)	62/04	324/60	INVER	55 38% INVER

Tabla 1.—Resultados del análisis poblacional de fallas con los tres métodos utilizados. En el diagrama P-T, además de la dirección de máxima compresión horizontal, se indica el tipo de fallas predominante (DESG: desgarres, INV: inversas o NORM: normales). En el método de Etchecopar, se indica el porcentaje del total de la población que es explicado por cada tensor, así como la orientación de los ejes de máxima compresión (σ_1) y máxima extensión (σ_3), y el tipo de tensor (fallas inversas, de desgarre o normales). En el modelo de deslizamiento, se indica la dirección del eje de máximo acortamiento horizontal (Dey) y el porcentaje del total de la población que corresponde a cada tipo de fallas, considerando inversas a la suma de las fallas inversas puras e inversas direccionales, normales al conjunto de fallas normales puras y normales direccionales, y desgarres a la suma de fallas direccionales normales, direccionales inversas y desgarres puros.

Los resultados obtenidos, para cada estación, mediante los tres métodos de análisis empleados, son bastante parecidos, tanto en las orientaciones de los ejes de esfuerzo y deformación,

Figura 3.—Resultados del análisis microestructural para la estación de Tamajón. Arriba, diagrama P-T de la población de fallas. Centro, proyección en el diagrama de Scimdt de los ejes de esfuerzos, y proyección de las fallas en el círculo de Mohr, para cada uno de los dos tensores obtenidos mediante el método de Etchecopar. Abajo, proyección de las fallas en el diagrama cabeceo de la estria-buzamiento de la falla, y en el diagrama tipo de falla (K')-dirección de acortamiento (e_v), según el modelo de deslizamiento.

como en los tipos de elipsoides que explican las diferentes poblaciones de fallas.

En cuanto a las direcciones de compresión deducidas, se puede apreciar cómo, en la mayoría de los casos, domina una compresión horizontal máxima según N 140° - 150° E, con algunas variaciones locales (estación de Beleña). En la estación de Alcorlo, además, aparece una segunda dirección de compresión oblicua a la anterior (casi perpendicular), con una dirección en torno a N 60° E. En la estación de Valdesotos aparece esta misma dirección de compresión, si bien, en este caso, como puede apreciarse en la figura 2, está acompañada de macroestructuras (cabalgamientos y desgarres transversales) que se explican con esta misma dirección de esfuerzos.

En cada estación, existen porcentajes similares de fallas inversas (compresión y acortamiento en la horizontal, y extensión y estiramiento en la vertical) y desgarres (los ejes mayor y menor de los elipsoides de esfuerzo y de deformación situados en el plano horizontal). Con el método de Etchecopar, ambos grupos quedan separados en tensores diferentes, mientras que en el método de los diedros rectos y en los derivados del Modelo de Deslizamiento, ambas subpoblaciones forman parte de la misma solución, excepto en el caso de la estación de Alcorlo, en la que la separación corresponde a dos direcciones de compresión diferentes, con formación de fallas normales e inversas, respectivamente.

4. RESULTADOS DE ANALISIS MACROESTRUCTURAL

Para determinar las características de las deformaciones más recientes, se ha estudiado el conjunto de fracturas que controla la sedimentación de los materiales del Mioceno Superior, formados por series de carácter aluvial (ALONSO-ZARZA et al., 1990), subhorizontales, que no presentan las estructuras compresivas localiza-

Estacion: ftanaJ 35 fallas

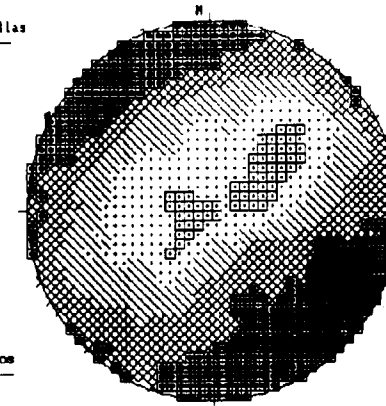
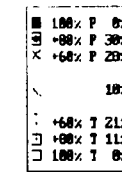
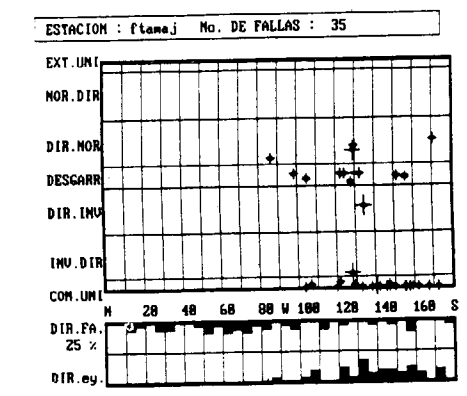
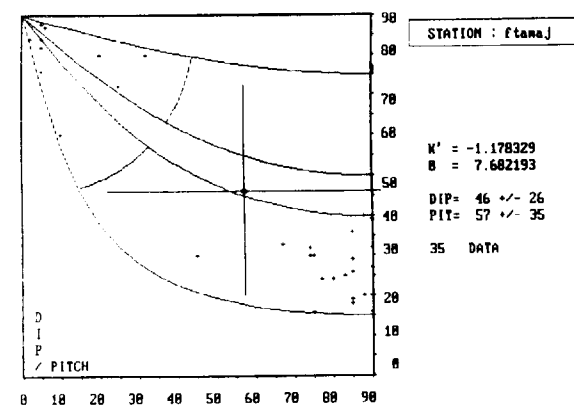
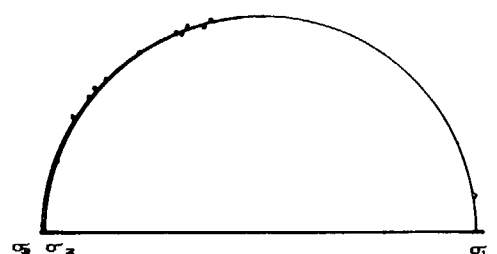
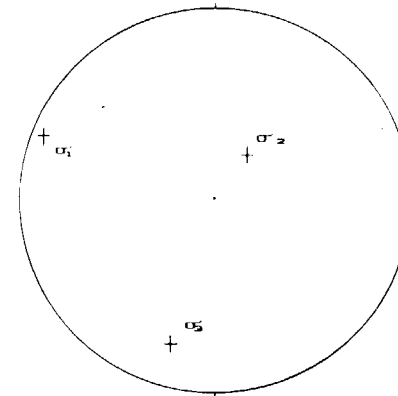
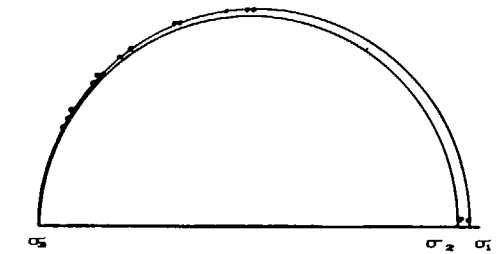
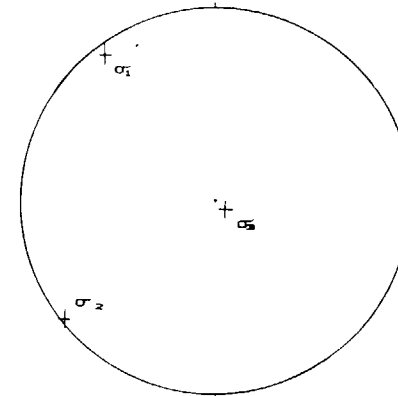


Diagrama de diedros rectos



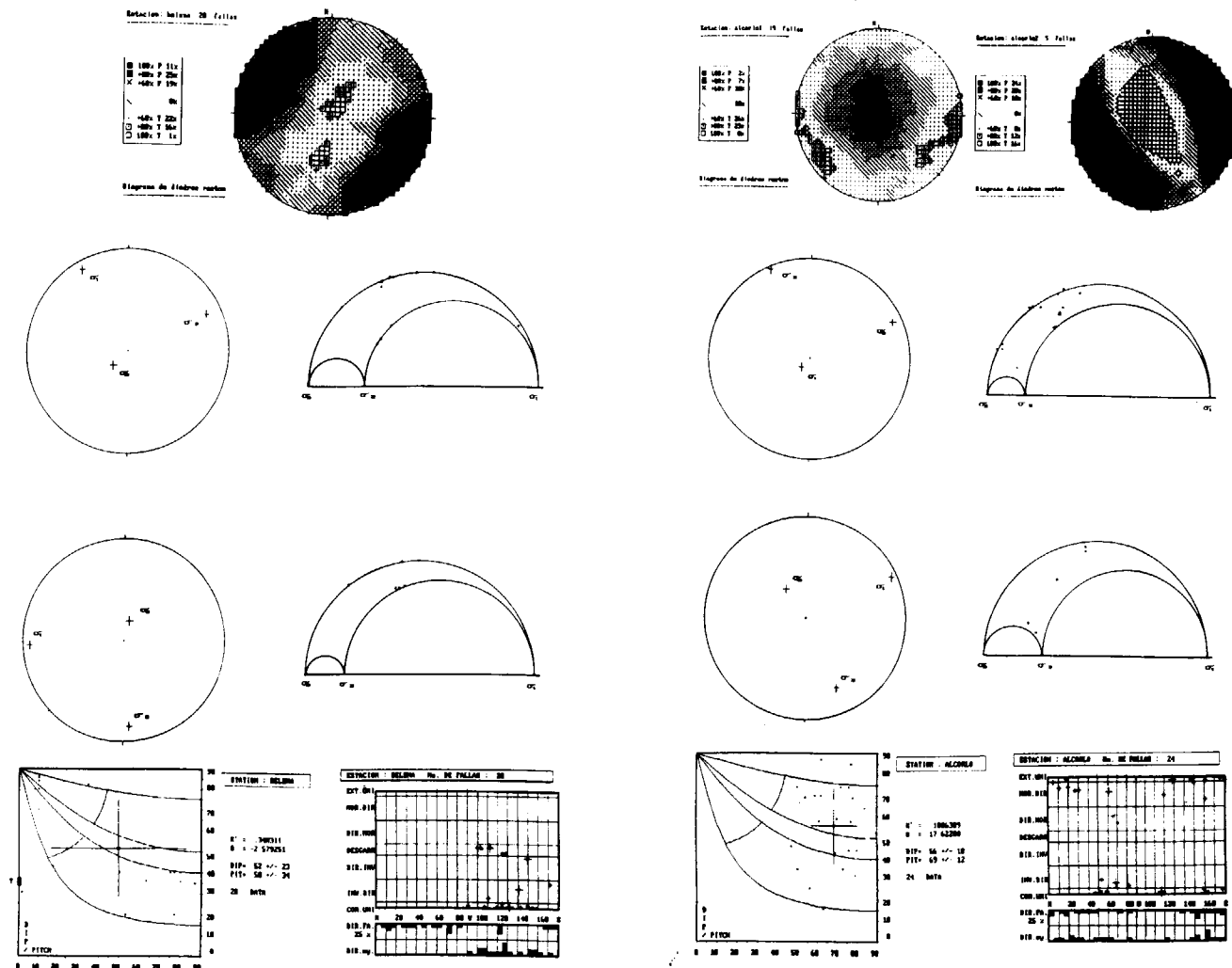


Figura 4.—Resultados del análisis microestructural para la estación de Beleña (izquierda) y para las dos subpoblaciones separadas de la estación de Alcorlo. Arriba, diagrama P-T. Centro, método de Etchecopar. Abajo, modelo de deslizamiento.

das en las series mesozoicas. Para su estudio, se ha elaborado un mapa de contornos estructurales estimados de la base del Mioceno Superior en esta zona. Este mapa (fig. 6) permite determinar cómo la distribución de estos materiales está controlada por una red principal de fracturación con direcciones N 20° E y N 20° O, aunque existen direcciones N 70°-80° E, que también controlan, en menor medida, la fracturación.

Los tres «surcos» principales de sedimentación de abanicos aluviales miocenos en esta región se corresponden con estas direcciones norteadas, y, además, coinciden, a grandes rasgos, con

la distribución de los principales cursos fluviales actuales en esta zona de borde (Jarama, Sorbe y Aliendre-Bornova), así como más hacia el interior de la Cuenca de Madrid (Sorbe y Henares). Esta etapa de fracturación se extiende más allá de la instalación de estos sistemas aluviales, como lo prueba la presencia de fallas normales de estas direcciones afectando a los tramos más altos del Mioceno Superior en la zona de Puebla de Vallés-Retiendas (SANCHEZ-SERRANO, 1991). Estas fallas no han podido ser incluidas en el análisis estadístico de la fracturación, debido a que se desarrollan en materiales de caracterís-

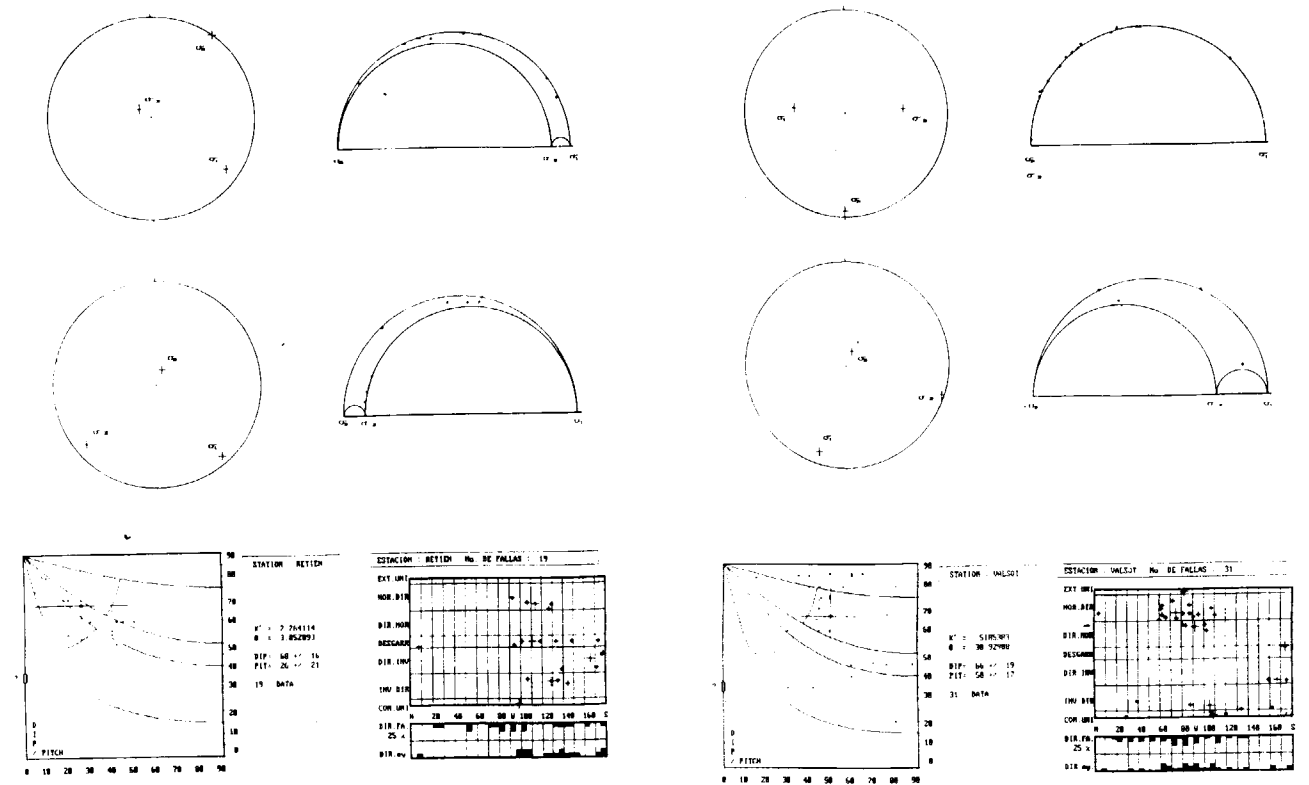


Figura 5.—Resultados del análisis microestructural para las estaciones de Retiendas (izquierda) y Valdesotos (derecha). Arriba, método de Etchecopar. Abajo, modelo de deslizamiento.

ticas muy desfavorables para la conservación de estrías de falla y otras microestructuras relacionadas.

5. EVOLUCION DE LA DEFORMACION

Varios trabajos recientes (DE VICENTE, 1988a; CAPOTE et al., 1990, y CALVO et al., 1991) proponen una evolución de las deformaciones alpinas en el Sistema Central en varias etapas. En concreto, CALVO et al. (1991) proponen la siguiente sucesión de etapas tectono-sedimentarias para el Neógeno: Etapa Altomira (acortamiento E-O), Etapa Neocastellana-Guadarrama (máximo acortamiento N 150° E), Etapa Torrelaguna (extensión uniaxial N 80° E y Etapa Ibero-manchea (extensión uniaxial N 100° E). Con anterioridad a éstas, se estableció la existencia en el Sistema Central de otras deformaciones más

antiguas de carácter compresivo (Etapa Ibérica). A partir de esta información, que se utiliza como encuadre regional, y de los datos obtenidos para la zona concreta de Tamajón, se puede elaborar un esquema de la evolución de las deformaciones alpinas en esta región.

La dirección de compresión máxima deducida a partir del análisis de fallas en la estación de Valdesotos (aprox. N 70° E), y una de las obtenidas en la de Alcorlo (aprox. N 60° E), concuerdan con las direcciones de acortamiento de la Etapa Ibérica, denominada así por los autores anteriormente citados por ser la responsable de la estructuración principal de la Cordillera Ibérica, adyacente a la zona objeto de este estudio. Según estos autores, esta etapa, con una dirección de compresión horizontal en torno a N 45°-55° E y de edad Oligoceno-Mioceno Inferior, origina algunas microestructuras en todo el Sistema Central, pero muy raramente da lugar a macro-

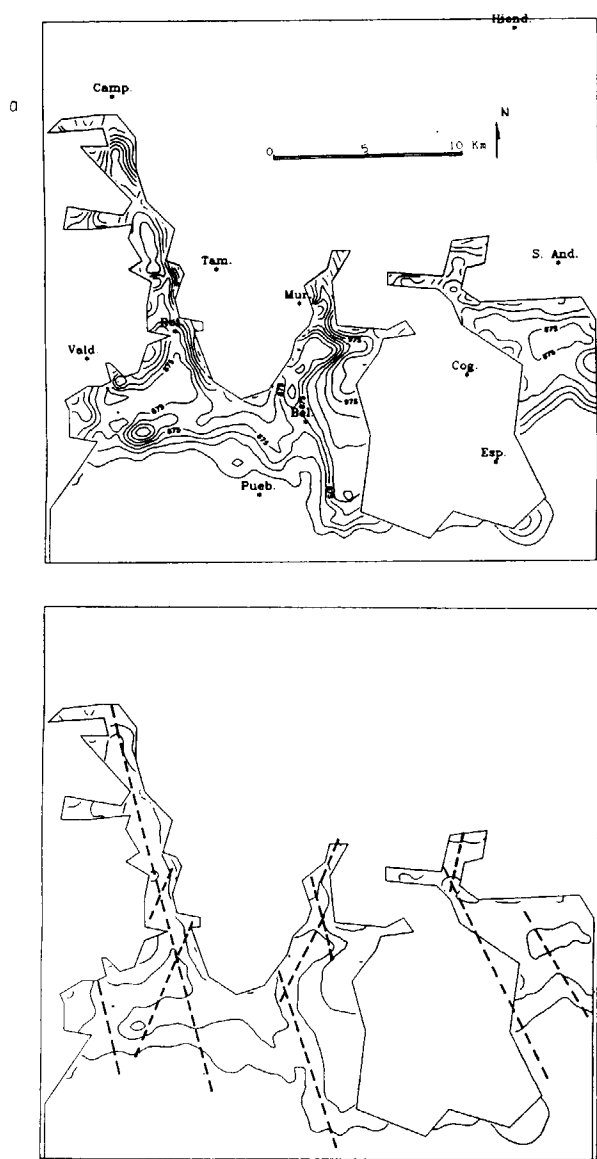


Figura 6.—Mapa de contornos estructurales estimados de la base del Mioceno Superior, e interpretación tectónica. Los valores de nivel corresponden a metros sobre el nivel del mar.

estructuras. La zona que nos ocupa, que se puede considerar como muy próxima a la zona de unión entre el Sistema Central y la Cordillera Ibérica, presenta alguna de estas excepciones, como es la zona de Valdesotos, en la que se han identificado cabalgamientos y desgarres transversales al borde sur del Sistema Central, que afectan a materiales mesozoicos (SANCHEZ-

RRANO, 1991). Las microestructuras medidas en esta estación, asociadas con las macroestructuras citadas, dan como resultado una dirección de compresión horizontal concordante con la de la «Etapa Ibérica». El área más cercana, dentro del Sistema Central, en la que se pueden encontrar macroestructuras de dirección «Ibérica» (NO-SE) es en Pálmaces de Jadraque (aún más cerca del contacto con la Cordillera Ibérica). Allí, como en el caso de Valdesotos, estas estructuras NO-SE se sitúan en las cercanías de cuencas pérmicas más o menos importantes, asociadas con desgarres tardihercínicos.

El resto de las estaciones de análisis de fallas presentan direcciones de compresión (σ_1 subhorizontal y próximo a N 150°-160° E; σ_3 subvertical) concordantes con las establecidas para la «Etapa Guadarrama», que corresponde a una compresión horizontal según la dirección N 150° E, durante el Aragoniense. Es esta la etapa más importante en la estructuración alpina del Sistema Central (CAPOTE et al., 1990), y como tal está representada en la zona de Tamajón, por varias macroestructuras importantes, cabalgamientos de dirección N 70°-80° E y desgarres de direcciones N 10°-20° E y N 130°-140° E. Las orientaciones de los desgarres coinciden con las direcciones de las fallas tardihercínicas y de la esquistosidad principal hercínica (N-S y subvertical) de esta zona. Debido a su orientación, estas discontinuidades preexistentes son probablemente aprovechadas para desarrollar los desgarres de esta etapa. En zonas adyacentes, en las que la disposición de la esquistosidad hercínica es diferente (Domo de Hiendelaencina, FERNANDEZ-RODRIGUEZ, 1990), los desgarres transversales prácticamente desaparecen, predominando los cabalgamientos, que sí encuentran condiciones favorables para su desarrollo (SANCHEZ-SERRANO, 1991).

La influencia de las discontinuidades previas determina que se produzca una tectónica de zócalo-cobertera, que es apreciable en zonas como ésta, con presencia de materiales mesozoicos y cenozoicos, deformados a través de cabalgamientos y pliegues. El acortamiento producido en esta zona ha sido estimado entre un 17 por 100 y un 19 por 100 (SANCHEZ-SERRANO, 1991), por medio de cortes compensados (fig. 7).

Por último, la red de fracturación identificada en relación con los abanicos aluviales del Mioceno

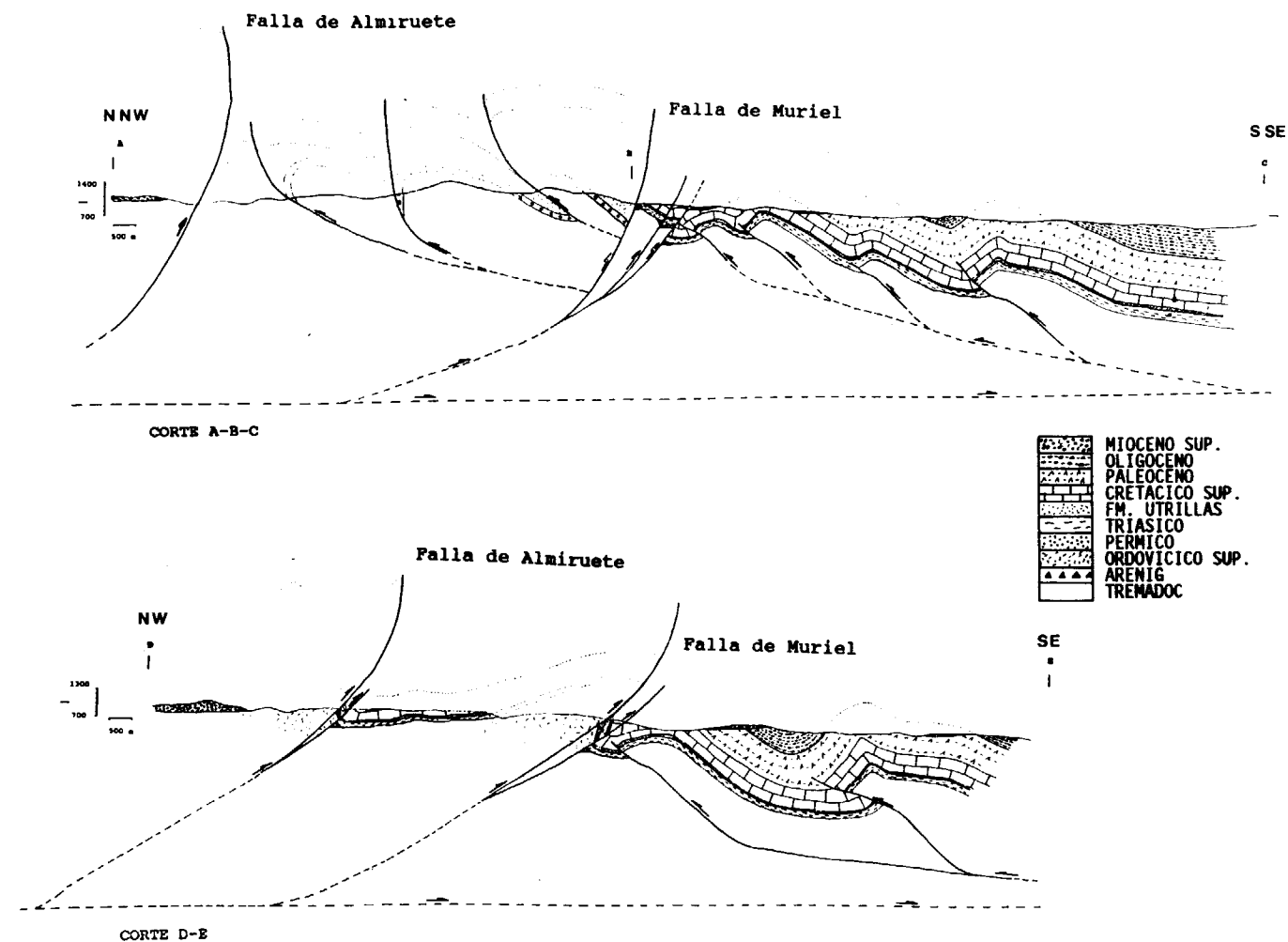


Figura 7.—Cortes compensados de la zona de Tamajón, transversales a las deformaciones alpinas principales (modificado de SANCHEZ-SERRANO, 1991).

Superior⁴ (fallas N 20° E-N 20° O), concuerda con las orientaciones de las fallas de la «Etapa Torrelaguna», que se originan bajo un régimen de extensión uniaxial según una dirección aproximadamente este-oeste, desde el Vallesense hasta la actualidad.

6. CONCLUSIONES

En función de toda la información expuesta, se puede establecer un esquema de la evolución de las relaciones esfuerzo-deformación para

tiempos alpinos en el borde suroriental del Sistema Central Español, que quedaría como sigue:

Las deformaciones alpinas comenzarían, durante el Oligoceno, con una dirección de compresión aproximada N 50°-60° E, que daría lugar a microestructuras, y, en zonas muy concretas, a macroestructuras (cabalgamientos y desgarres), probablemente cuando existan discontinuidades previas de orientación y características mecánicas favorables. En el caso de la zona de Valdesotos, estas discontinuidades corresponden a desgarres tardihercínicos relacionados con pequeñas cuencas pérmicas, similares a los que existen en otras zonas del Sistema Central, también

con este tipo de deformaciones alpinas. Esta primera etapa coincide con la definida como «Etapa Ibérica» por DE VICENTE (1988a), CAPOTE et al. (1990) y CALVO et al. (1991).

Hacia el Aragoniense Medio-Superior, se produciría un giro en la dirección de compresión horizontal del campo de esfuerzos, que pasaría a situarse según una dirección aproximada N 150°-160° E. En relación con esta dirección de compresión se originan numerosos cabalgamientos de dirección N 70°-80° E (paralelos a la dirección del borde sur del Sistema Central) y desgarres de dirección N 130°-140° E y N 10°-20° E. Estas fallas se producen por reactivación de discontinuidades previas. Concretamente, los desgarres aprovechan la disposición favorable de la esquistosidad principal hercínica. Estas fallas provocan la deformación de la cobertera mesozoica y cenozoica en pliegues y cabalgamientos. Estas deformaciones se pueden asociar con la «Etapa Guadarrama», definida por DE VICENTE (1988a), CAPOTE et al. (1990) y CALVO et al. (1991). El acortamiento producido por esta etapa, en este área, según se deduce de los cortes compensados construidos por SANCHEZ-SERRANO (1991) oscila entre el 17 por 100 y el 19 por 100.

Las fracturas más recientes afectan a las series subhorizontales del Mioceno Superior, son de tipo normal, y tienen orientaciones subparalelas a las definidas para la «Etapa Torrelaguna» de DE VICENTE (1988a), CAPOTE et al. (1990) y CALVO et al. (1991), con la que, probablemente, se corresponde.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo constituye un extracto de la Tesis de Licenciatura de uno de los autores (F. S. S.), financiada por el Proyecto de Investigación DGICYT PB-87 0544.

REFERENCIAS

ALONSO-ZARZA, A. M.; CALVO, J. P., y GARCIA DEL CURA, M. A. (1990): *Litoestratigrafía y evolución paleogeográfica del Mioceno del borde NE de la Cuenca de*

Madrid (prov. Guadalajara). Estudios Geológicos, 46 (5-6): 415-432.

ANDERSON, E. (1951): *Dynamics of faulting*. Oliver & Boyd. Edinburgh, 206 pp.

ANGELIER, J. (1984): *Tectonic analysis of fault slip data sets*. Jour. Geoph. Research, 89 B7: 5835-5848.

ANGELIER, J., y MECHLER, P. (1977): *Sur une méthode graphique de recherche des contraintes principales également utilisable en tectonique et en séismologie: la méthode des dièdres droits*. Bull. Soc. Géol. France, 19 (7): 1309-1318.

BOTT, M. (1959): *The mechanics of oblique slip faulting*. Geol. Mag., 96: 109-117.

CALVO, J. P.; DE VICENTE, G., y ALONSO-ZARZA, A. M. (1991): *Correlación entre las deformaciones alpinas y la evolución del relleno sedimentario de la Cuenca de Madrid durante el Mioceno*. I Congreso Grupo Español del Terciario. Vic, 1991. Comunicaciones: 55-58.

CAPOTE, R.; DE VICENTE, G., y GONZALEZ-CASADO, J. M. (1990): *Evolución de las deformaciones alpinas en el Sistema Central Español (S.C.E.)*. Geogaceta, 7: 20-22.

DE VICENTE, G. (1988): *Análisis poblacional de fallas. El sector de enlace Sistema Central-Cordillera Ibérica*. Tesis. Univ. Complutense de Madrid, 317 pp.

DE VICENTE, G. (1988b): *The e/K' diagram. An application of the slip model to the populational fault analysis*. Rev. Soc. Geol. España, 1 (1-2): 97-112.

ETCHECOPAR, A. (1984): *Etudes des états de contraintes en tectonique cassante, et simulation de déformations plastiques (approche mathématique)*. Thèse d'Etat USTL Montpellier, 269 pp.

ETCHECOPAR, A., y MATTAUER, M. (1988): *Méthodes dynamiques d'analyse des populations de failles*. Bull. Soc. Géol. France, 4, n.º 2: 289-302.

FERNANDEZ-RODRIGUEZ, C. (1990): *Estudio de los procesos de deformación en la zona de cizalla de Hiendelaencina (Sistema Central Español)*. Tesis. Univ. Complutense de Madrid, 520 pp.

RECHES, Z. (1983): *Faulting of rocks in three-dimensional strain fields. II: Theoretical analysis*. Tectonophysics, 95: 133-156.

RECHES, Z., y DIETERICH, J. (1983): *Faulting of rocks in three-dimensional strain fields. I: Failure of rocks in polyaxial, servocontrol experiments*. Tectonophysics, 95: 111-132.

SANCHEZ-SERRANO, F. (1991): *Análisis de la deformación alpina en el borde suroriental del Sistema Central Español (zona de Tamajón, Guadalajara)*. Tesis de Licenciatura. Univ. Complutense de Madrid, 198 pp. (inédita).

Original recibido: Noviembre de 1992.

Original aceptado: Diciembre de 1992.

Reflectancia en rocas en función de su litología y fábrica interna.

III. El Complejo Esquisto-grauváquico. Estudio de estructuras menores y microestructuras como base para la comprobación del significado estructural de diferencias espectrales en imágenes.

Por A. RIAZA GARCIA (*)

RESUMEN

El Complejo esquisto-grauváquico consiste en una serie monótona de pizarras y grauvacas intercaladas, que afloran en amplias llanuras en la Zona Centroibérica del Macizo Hespérico Central de la Península Ibérica. La ausencia de niveles-guías y la pobreza de afloramiento obliga a una toma minuciosa de datos puntuales para la cartografía por métodos convencionales.

Se realiza una descripción de las estructuras menores observadas en afloramientos, y la historia de la deformación basada en ellas. Asimismo, y con objeto de delimitar áreas afectadas por distinta intensidad de metamorfismo térmico y dinámico, de grado débil, se ha realizado un estudio de microestructuras en pelitas y grauvacas.

Estos datos se utilizarán posteriormente en la interpretación de imágenes Thematic Mapper, y estudios de reflectancia de laboratorio en muestras de rocas tomando como referencia la fábrica interna de las rocas.

Palabras clave: Complejo Esquisto-grauváquico, Deformación, Microestructuras.

ABSTRACT

The Schist-greywacke Complex consists of monotonous interbedded schists and greywackes, outcropping over wide plains on the Central Iberian Hesperian Massif. Absence of bed-guides and poorness of outcrop require detailed and cumbersome conventional mapping techniques.

Minor structures and the resulting history of deformation is described. In order to define areas affected by different and weak intensities of thermal metamorphism and dynamic metamorphism, microstructural studies on slates and greywackes have been carried out. Dynamic metamorphism is better shown on pelites through more intense preferred orientation of the fabric.

Ground data described in this chapter will be used later to interpret Thematic Mapper images and laboratory reflectance studies on rock samples referring to the inner rock fabric.

Key words: Schist-greywacke Complex, Deformation, Microstructures.

INTRODUCCION

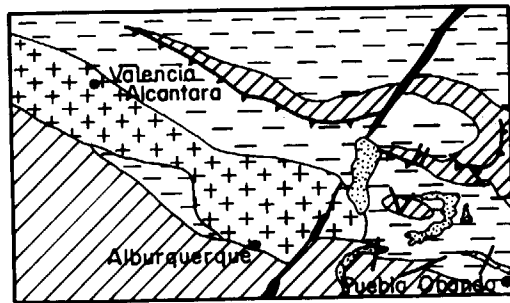
Fue CARRINGTON DA COSTA en 1950 el primero en usar el término «Complejo Xisto-Grauváqui-

co» para designar al conjunto de alternancias de pizarras y grauvacas que afloran extensamente en la Zona Centroibérica de LOTZE (1945), en posición estratigráfica anterior al Ordovícico, entonces considerado Silúrico. Desde entonces se ha acuñado extensamente a un lado y otro de la frontera, y han avanzado los conoci-

(*) Instituto Tecnológico Geominero de España. Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid.

tos en su estratigrafía y distribución paleogeográfica.

El Complejo Esquisto Grauváquico del área de estudio aflora cerca del límite meridional de la Zona Centroibérica con la Zona de Ossa Morena, en el núcleo de un anticlinal con traza axial noroeste-sureste (SAN JOSE LANCHA, 1983) (fig. 26). La unidad inferior del Complejo esquisto-grauváquico que aflora en el área de estudio se compone de una alternancia de grauvacas y lutitas, con predominio de las últimas. Las estructuras de grandes dimensiones en la Zona Centroibérica se atribuyen a la orogénesis hercínica, y tienen una superficie axial subvertical, con tendencia a verger hacia el sur a medida que se aproxima la Zona de Ossa Morena.



- Terciario-cuaternario
- Paleozoico
- Complejo Esquisto-grauváquico
- Granitos calco-alcalinos
- Dique toleítico

Figura 26.—Esquema de situación del área de estudio (en Mapa Geológico de España, escala 1:50.000, 1982).

El CEG describe un amplio antiformal en el borde meridional de la Zona Centroibérica, en cuyo núcleo intruye el granito de Nisa-Alburquerque (fig. 26). El flanco septentrional del sinclinal de Gévora constituye el flanco meridional de este antiformal (CASAS RUIZ y SANTOS DIAZ, 1982),

y es fundamentalmente el flanco septentrional el que ha acaparado la atención en este estudio.

Las primeras observaciones en imágenes sugirieron diferencias espectrales con posible significado estructural. Dada la gran monotonía litológica de la serie estratigráfica, se planteó un estudio detallado de medida de elementos estructurales en el campo, observación de microestructuras en pelitas y grauvacas enfocada a la apreciación de estadios de deformación e influencia del metamorfismo térmico, y reflectancia en laboratorio sobre muestras de rocas y suelos desarrollados sobre las mismas en diferentes regiones del área de estudio.

Todo ello permite establecer relaciones entre la reflectancia observada en imágenes y los rasgos correspondientes a la deformación y secuencia de distintos acontecimientos en la historia geológica de la región. La apreciación del significado estructural de diferencias espectrales en imágenes se ve cualificada de este modo con técnicas convencionales de análisis estructural, así como de estudio de reflectancia sobre rocas y suelos efectuado en laboratorio.

La cronología relativa de las estructuras se basa en relaciones morfológicas y de superposiciones geométricas que las agrupan en varias generaciones. No se han comprobado en ningún caso con dataciones absolutas, y su ordenamiento cronológico se ha ajustado a descripciones convencionales en la Zona Centroibérica (DIEZ BALDA, 1986; JULIVERT, RIBEIRO y CONDE, 1975). Ello no impide que puedan hacerse precisiones acerca de la contemporaneidad o solapamiento en el tiempo de estructuras atribuidas aquí a distintas generaciones (WILLIAMS, 1985).

En lámina delgada aparecen distintas foliaciones, entre las que destaca una superficie de esquistosidad bien desarrollada generalizada que revela los efectos del metamorfismo regional de bajo grado correspondiente a la deformación hercínica. La intrusión de granitos superpone los efectos de un metamorfismo térmico que se manifiesta con intensidad variable con la proximidad a las masas graníticas. También son reseñables efectos de un metamorfismo dinámico.

Pelitas y grauvacas desarrollan microestructuras diferentes en respuesta a estos procesos, en función de su mineralogía y de su tamaño de grano. Ya que la variación en el tamaño de gra-

no es uno de los síntomas de la actuación de los mecanismos de deformación y recrystalización, que varían a su vez con la intensidad de actuación de los mismos, resulta en ocasiones difícil distinguir los efectos de distintos tipos de metamorfismo, especialmente si se manifiestan en grado bajo.

La coexistencia de varias superficies de esquistosidad con distinta morfología observada repetidamente, indica con claridad la secuencia de distintas etapas de deformación.

METODO DE ESTUDIO

Las características que se describen en este capítulo se basan en la observación en afloramientos de estructuras y microestructuras en lámina delgada. Superficies y lineaciones se han medido con brújula, y proyectado estereográficamente en plantilla equiareal de SCHMIDT, hemisferio inferior. Las lineaciones de intersección se han medido tomando el ángulo con la horizontal del plano sobre la superficie de esquistosidad, y calculando posteriormente la dirección y buzamiento reales en plantilla de WULFF. Los cálculos de contornos siguientes se han realizado basados en estas proyecciones (TURNER y WEISS, 1963).

Para las descripciones morfológicas de pliegues se han utilizado fotografías de secciones ortogonales a las trazas axiales de los mismos. El trazado de isógonas no sigue un intervalo angular regular, sino que ha sido sugerido por la forma de las superficies plegadas.

Las medidas de campo de superficies de estratificación, esquistosidad, ejes de pliegues, lineaciones de intersección y puntos de muestreo, se han implementado en una base de datos espacial digital por medio de un sistema de información geográfico basado en coordenadas UTM. La descripción de la variabilidad espacial de estas estructuras, sus relaciones con la historia de la deformación y la variabilidad espectral observada en imágenes de satélite es objeto de otros capítulos.

Para el estudio de microestructuras se han utilizado doscientas cinco muestras orientadas, que incluyen un número aproximadamente igual de lutitas que de grauvacas, repartidas espacialmente de modo homogéneo en el área de estudio.

Sobre cada muestra se han practicado dos secciones para la observación en lámina delgada (TURNER y WEISS, 1963), ambas perpendiculares a las superficies de estratificación y esquistosidad principal atribuida a la orogénesis hercínica, que se disponen subparalelas de modo generalizado en la región estudiada (fig. 34). Una de las secciones es paralela a la lineación de intersección entre las mencionadas superficies, y la segunda es perpendicular a la misma lineación.

Cuando es evidente en muestra de mano una segunda superficie de esquistosidad, suele disponerse subhorizontalmente perpendicular a la superficie de esquistosidad principal hercínica. Las dos secciones a estudiar son, a su vez, mutuamente subparalelas y subperpendiculares a las dos lineaciones de intersección entre la superficie de estratificación y las respectivas superficies de esquistosidad.

Se han realizado observaciones al microscopio de reflexión con luz polarizada, utilizándose la cuña de cuarzo para las estimaciones de orientación preferente (SPRY, 1969).

EL COMPLEJO ESQUISTO-GRAUVAQUICO EN EL AREA DE VALENCIA DE ALCANTARA - PUEBLA DE OBANDO (CACERES - BADAJOZ)

Estratigrafía

De modo general se han distinguido en el Complejo Esquisto Grauváquico dos unidades litológicas separadas por una discordancia angular (LOTZE, 1956; CRESPO LARA, 1972; ARBIN y TAIMAIN, 1973; HERRANZ et al., 1977; MORENO, 1977; BRASIER et al., 1979; SAN JOSE, 1984; PIÉREN et al., 1988; ORTEGA y GONZALEZ LODEIRO, 1986).

La unidad inferior, generalmente llamada Alcuense Inferior, consiste en una alternancia de grauvacas y lutitas, con predominio de las últimas. En la base de esta serie aparecen unas capas de arcosas vulcanogénicas más o menos porfiroides y a veces neisificadas, seguidas de conglomerados con cantos de cuarcitas y liditas, que muestran un tránsito lateral con las arcosas (SAN JOSE LANCHA, 1983).

Las lutitas de la unidad inferior muestran secuencias granodecrescentes, y en ocasiones len-

tículas de areniscas correspondientes a canales de techo plano y base erosiva. Se observa generalmente laminación paralela y acintada u oblicua, y algunas huellas de carga y «ripples» de longitud de onda centimétrica. Las grauvacas son de un grano demasiado fino para identificar la litología de los fragmentos, aunque pueden citarse pizarras, pegmatitas, micaesquistos y rocas volcánicas ácidas y básicas. Destaca la abundancia de feldespatos, en especial plagioclasas, y cuarzo.

La litología observada en el área de estudio se atribuye al Alcudiense Inferior, y sería equivalente a las series atribuidas al Grupo Inferior (SAN JOSE LANCHA, 1983), las Capas de Facies de Alcudia de BOUYX (1970), el Alcudiense Inferior de TAMAIN (1970), retomado por HERRANZ (1977). En las investigaciones más recientes se encuadraría en el Grupo Domo Extremeño (ALVAREZ-NAVA et al., 1988), y la Formación Rosmanihal, facies Perais, definida en Portugal (ROMAO, 1991), así como la Serie Inferior mencionada en el Domo de las Hurdes (ALVAREZ-NAVA et al., 1988). Los tramos pelíticos predominan sobre los arenosos en las cercanías del granito de Nisa-Alburquerque, observándose un aumento progresivo de niveles arenosos hacia el norte, así como un incremento en la potencia de los mismos.

Los datos paleontológicos existentes en el valle de Alcudia le atribuyen una edad Rifeense Superior (MITROFANOV y TIMOTEIEV, 1977, en SAN JOSE LANCHA, 1983), se basan en dataciones realizadas con acritarcos. Las potencias estimadas alcanzan los 9.000 m., medidos en el Anticlinal de Valdelacasa (ALVAREZ-NAVA et al., 1988).

Paleogeografía

La serie turbidítica que constituye el Alcudiense Inferior depositada durante el Precámbrico Superior consiste en una sedimentación pelítica en régimen distensivo, en dos cuencas separadas por un geanticlinal acompañado de vulcanismo ácido, de las cuales el área de estudio aparece en el surco meridional (BARD et al., 1973). La orogenia Panafricana se manifiesta en estos materiales por la formación de pliegues laxos, y finaliza con una transgresión cámbrica con depó-

sito de materiales carbonatados y pelíticos de facies de plataforma, que no afloran en el área de estudio.

Deformación

Deformación prehercínica

Durante los últimos cincuenta años se ha mencionado repetidamente la existencia de una discordancia intraprecámbrica que separaría el Alcudiense Superior del Inferior, tanto en la Zona Centroibérica central como en el Noroeste del Macizo Hespérico (LOTZE, 1956a; HERRANZ et al., 1977; BRASIER et al., 1979; CRESPO LARA, 1972; ARBIN y TAMAIN, 1973; MORENO, 1977; SAN JOSE, 1983; ORTEGA y GONZALEZ LODEIRO, 1986; PIEREN et al., 1987).

La discordancia intraprecámbrica descrita en el valle de Alcudia separa dos conjuntos diferenciables litológicamente, consistiendo el superior en una serie de formaciones detríticas y carbonatadas, y el inferior en una alternancia monótona de pizarras y grauvacas. Los materiales precámbricos en que se encuadra este trabajo pertenecerían al conjunto inferior.

La existencia de una deformación prehercínica se manifiesta, además de por la existencia de una discordancia angular intraprecámbrica, no observable en el área de estudio, por la aparición de superficies de esquistosidad que cruzan flancos de pliegues sin cambiar de dirección, así como por una disposición divergente de las lineaciones de intersección en ambos flancos de los mismos pliegues, que no coincide con su eje. En algunos casos, la esquistosidad es perpendicular al plano axial de los pliegues (GARCIA SANSEGUNDO et al., 1987; RODA QUEROL, 1986). La edad atribuida a los materiales afectados por la deformación prehercínica apunta a una edad Rifeense-Vendiense Superior. No se aprecian signos de la existencia de un metamorfismo contemporáneo a esta etapa.

El Ordovícico se sitúa discordantemente sobre los materiales cámbricos y precámbricos. Esta discordancia (Sárdica) se considera de tipo erosivo (GARCIA SANSEGUNDO et al., 1987), sin que se le asocie una deformación importante. La edad de esta deformación, de acuerdo con la de los materiales afectados, se situaría entre el Cámbrico Inferior y el Ordovícico Inferior.

Deformación hercínica

Las principales estructuras observadas se deben a la orogenia hercínica, a la que se atribuye una edad Devónico Superior - Estefaniense Medio (GARCIA SANSEGUNDO et al., 1987).

La deformación más importante se manifiesta en forma de pliegues acompañados de esquistosidad y de un metamorfismo regional de bajo grado. Los pliegues son apretados y asimétricos con plano axial vertical, y ejes que oscilan desde subverticales a subhorizontales buzando generalmente al noroeste. Los flancos de los pliegues suelen ser rectos en los materiales pelíticos con ángulos próximos a 60°.

En las etapas tardías de la deformación hercínica se produce la intrusión de granitos en diferentes pulsos con posterioridad al plegamiento y al desarrollo de esquistosidad asociada al mismo (JULIVERT, RIBEIRO y CONDE, 1977).

Localmente se observan cizallas verticales de poca entidad posteriores a las estructuras anteriormente descritas.

Deformaciones tardías

Se superpone a estas estructuras relativamente dúctiles una red de fracturas tardías en dos direcciones preferentes de edad Estefaniense - Pérmico (JULIVERT, RIBEIRO y CONDE, 1977). La más frecuentemente representada cartográficamente, y que proporciona los desplazamientos horizontales en sentido levógiro de mayor envergadura, sigue una dirección NE-SO. La Falla de Plasencia es el ejemplo más notable (PARGA, 1969; ARTHAUD y MATTE, 1975). Con frecuencia se les asocian diques básicos.

Con menor importancia se observan fracturas de desplazamiento horizontal en sentido dextrógiro en dirección ONO-ESE paralelas a las direcciones de las estructuras hercínicas mayores. Su aparición generalizada en el granito de Nisa-Alburquerque, considerado una intrusión tardía (LOPEZ-PLAZA y MARTINEZ CATALAN, 1988), permite su inclusión en esta etapa de fracturación tardía.

Las fracturas de la etapa hercínica tardía controlan la sedimentación en cuencas estefanienses y terciarias. En el área de estudio no se ha probado la existencia de fracturas produci-

das en etapas posteriores, reseñadas en otras zonas del Macizo Hespérico de la Península Ibérica.

ESTRUCTURAS MENORES EN EL COMPLEJO ESQUISTO-GRAUVAQUICO

Deformación prehercínica

La deformación hercínica proporciona las estructuras predominantes, en forma de pliegues a los que se asocia una superficie de esquistosidad muy desarrollada.

Sin embargo, esta esquistosidad corta en algunos casos a los dos flancos de los pliegues, en una dirección que forma un ángulo elevado con la superficie axial de los mismos (fig. 27) (RODA QUEROL, 1986).

Pueden observarse en las charnelas de los pliegues lineaciones oblicuas a los ejes de los mismos. Las lineaciones describen una forma sig-

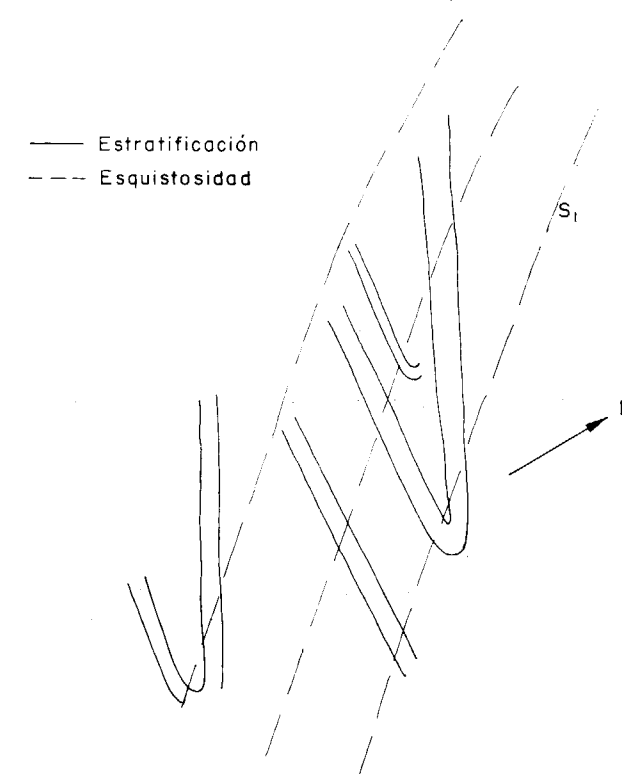


Figura 27.—Pliegues cuyos flancos están afectados por la esquistosidad hercínica principal transecta a ángulo alto. Escala 1:10.

moidal indicando un desplazamiento de las superficies axiales de los pliegues en sentido levógiro, que apunta a una posición inicial de las lineaciones más N-S que la esquistosidad principal hercínica (lám. 2 A). Se trata de lineaciones que forman un ángulo mínimo con la traza axial en la charnela, aumentando hacia los flancos, descritas como del tipo 2 b por GOSH y CHATERJEE (1975).

La observación de lineaciones oblicuas a la traza axial de pliegues ha sido objeto de discusión acerca de las relaciones temporales entre unas y otras estructuras. Se ha interpretado en casos como efecto de una deformación progresiva correspondiente al mismo acontecimiento (BORRADAILE, 1978; GOSH y CHATERJEE, 1975; SANDERSON et al., 1980). Si bien esto es plausible en el caso de ángulos pequeños entre las dos direcciones, no resulta tan fácil de aceptar para ángulos mayores.

También las esquistosidades que transectan pliegues han sido descritas en distintas ocasiones (WILLIAMS, 1985; POWELL et al., 1974; STRINGER, 1975). Aunque es discutible su secuencia temporal relativa, sí se ha llegado al acuerdo de que la esquistosidad transecta es la esquistosidad más temprana reconocible, y que los pliegues son los más tempranos reconocibles.

En el área de estudio la esquistosidad transecta es la esquistosidad hercínica principal asociada a los pliegues de mayor desarrollo. Deducimos que ha existido una deformación anterior a la fase hercínica principal, que se denomina prehercínica por convencionalismo, aunque podría tratarse de movimientos protohercínicos.

Abunda en favor de la existencia de un plegamiento anterior a la formación de la esquistosidad hercínica principal, que acompañaría a la formación de pliegues de una generación posterior, la observación de pliegues de eje horizontal en el Paleozoico, no existiendo excepto en casos excepcionales en rocas de edad posterior al precámbrico, pliegues de eje vertical (OENING SOEN, 1970; RIBEIRO, 1974; LEFORT y RIBEIRO, 1974; DIEZ BALDA, 1980). Esta aseveración descarta la trasposición de esquistosidades respecto a los planos axiales de los pliegues por mecanismos de deformación progresiva.

Las lineaciones de intersección entre las superficies de estratificación y esquistosidad hercínica

principal (fig. 30) muestran una distribución muy uniforme en amplias áreas de la zona de estudio. De ello se deduce (ELLIOT, 1968) que los pliegues anteriores a la fase de deformación hercínica principal eran pliegues cilíndricos con charnelas próximas a la actual lineación de intersección. Una discusión más detallada se hará en otro capítulo.

Entre los numerosos diques de cuarzo de espesores variados que aparecen en distintas disposiciones no escasean aquellos que están plegados afectados por la superficie de esquistosidad principal hercínica. Estos diques muestran en lámina delgada un considerable aplastamiento de los granos de cuarzo en la dirección de elongación, así como cierta orientación preferente.

Deformación hercínica

La deformación hercínica se manifiesta en un plegamiento apretado acompañado de la formación de esquistosidad. Con menor intensidad, aparece una esquistosidad de crenulación posterior subperpendicular a la esquistosidad principal, y se desarrolla una etapa de fracturación y cizallamiento dúctil localmente.

A) Fase de deformación principal

A.1) Morfología de los pliegues

Los pliegues aparecen raramente a escala de afloramiento en el Complejo esquistograuváquico, en parte por la pobreza de los afloramientos, y en parte por la escasez de los pliegues. Sus características morfológicas están condicionadas fundamentalmente por las variaciones relativas de espesor en la alternancia de capas pelíticas y grauváquicas, además de la mayor o menor intensidad de otras estructuras.

Sus trazas axiales siguen la dirección NO-SE (fig. 28), predominando los buzamientos verticales en dirección NO. La dirección se mantiene constante, pero los ángulos de buzamiento presentan una oscilación de horizontales a verticales, aunque predominan los buzamientos verticalizados al NO. En los materiales paleozoicos de la inmediatez al norte Sierra de S. Pedro, los ejes de los pliegues son horizontales (RODA

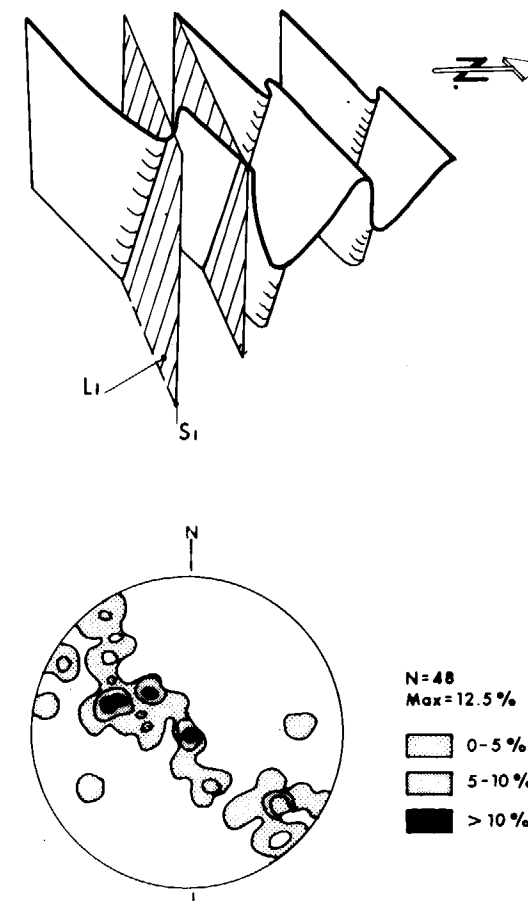


Figura 28.—Esquema tridimensional representando la geometría de los pliegues producto de la superposición de la deformación prehercínica y hercínica, con expresión de la posición de la superficie de esquistosidad S_1 , formada durante la deformación hercínica principal, y de la lineación de intersección de la misma con la superficie de estratificación L_1 . Diagrama de contornos sobre proyección estereográfica de ejes de pliegues correspondientes a la deformación hercínica principal en plantilla equiareal de SCHMIDT, semiesfera inferior.

QUEROL, 1986). La dirección constante con variabilidad de buzamientos, confirma la superposición de una deformación coaxial con eje Z subhorizontal (GOSH y CHATERJEE, 1975), teniendo en cuenta los pliegues de eje horizontal que están generalizados en materiales de edad paleozoica. La variabilidad en el buzamiento de los ejes de los pliegues está condicionada por la diferente posición inicial de las capas previamente plegadas en una etapa de deformación anterior.

Tienen como característica común el presentar una disposición asimétrica en chevron con for-

ma de Z, con charnelas agudas y ángulo bajo entre flancos, y simetría triclinica (TURNER y WEISS, 1963). La superficie de esquistosidad se aproxima al flanco corto, siendo su ángulo comparativamente mayor con el flanco largo (figura 29 A).

Independientemente de la relación relativa de espesores entre distintas litologías, ofrecen una geometría similar, conservando la forma del pliegue cada una de las capas plegadas, y no así el espesor de las mismas.

Cuando predominan las grauvacas, en una relación de espesores próxima a 10 respecto a 1 (fig. 29 A), las charnelas se engrosan comparativamente respecto a los flancos, el ángulo entre los mismos es de 30° , y describen isógonas en abanico convergente (RAMSAY y HUBER, 1987). A veces aparecen pliegues de menor longitud de onda en las charnelas entre dos capas competentes más gruesas.

Si el ángulo entre flancos es más abierto, pueden desarrollarse estructuras de acomodación en las superficies de máxima curvatura (figura 29 B). Las pelitas migran hacia las zonas de extensión, y la charnela toma un aspecto agudo de forma local respecto al conjunto del pliegue. También en este caso las charnelas están engrosadas respecto a los flancos.

Si predominan las pelitas sobre las grauvacas, se forman pliegues muy apretados con un ángulo entre flancos con frecuencia menor a 30° (figura 29 C). El flanco corto es proporcionalmente más corto que si predominan las grauvacas de modo que la amplitud del plegamiento, entendido como la relación entre la distancia entre superficies axiales contiguas, y la longitud de los flancos cortos (FLEUTY, 1964) es de 5 a 1.

Esta disposición puede corregirse si existe un desplazamiento significativo a lo largo de la superficie axial. Entonces los ángulos entre flancos se suavizan tomando un aspecto más redondeado y con ángulo amplio, aunque manteniendo la misma amplitud (lám. 2 B).

En capas adyacentes con distinta litología es frecuente observar también pliegues con distinta morfología (fig. 29 D). Las capas competentes más arenosas desarrollan formas rígidas, con aparición de pliegues de gran amplitud, y ángulo entre flancos más o menos bajo. Las capas con alternancias finas de pelitas y grauvacas adya-

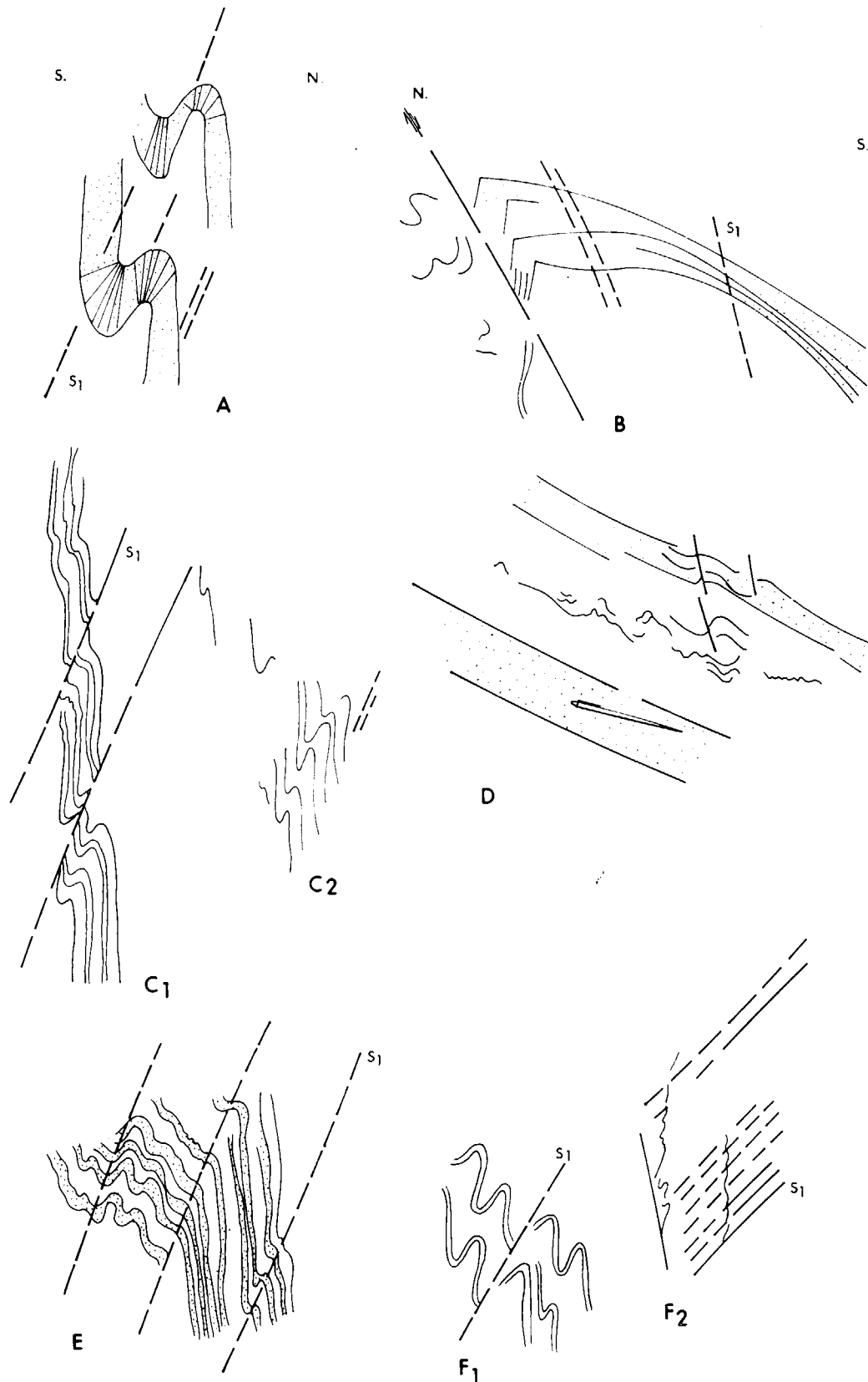


Figura 29.—Geometría de los pliegues (ver escala en D)

- A) Pliegue formado en capas de grauvacas, mostrando isógonas en disposición convergente en charnelas.
- B) Pliegue en grauvacas alternantes con pelitas, con ángulo abierto entre flancos. Estructuras de acomodación por migración de pelitas en charnela.
- C) Pliegues en Z desarrollados en pelitas.
- D) Pliegues con distinto estilo desarrollados en capas con distinta competencia.
- E) Pliegues desarrollados en capas alternantes de pelitas y grauvacas con espesores similares, con geometrías distintas en flancos y zonas de máxima curvatura.
- F) Pliegues en forma de anzuelo formados por evolución de pliegues en acordeón por desplazamiento a lo largo de la superficie de esquistosidad.

centes a las anteriores desarrollan pliegues ptigmáticos, dibujando una forma similar a las capas grauvácicas en una longitud de onda amplia, y variando en longitudes de onda menores, con una amplitud de 1 a 1.

En una alternancia de pelitas y grauvacas con espesores similares puede observarse el distinto estilo de plegamiento en flancos y zonas de máxima curvatura (fig. 29 E y lám. 2 C). En los flancos largos aparecen pliegues asimétricos con gran amplitud cuyos flancos cortos están desplazados por la esquistosidad. En cambio, en las charnelas, y los casi inexistentes flancos cortos, se forman pliegues ptigmáticos de baja amplitud, con ángulos entre flancos comprendidos entre 90° y 120° , con forma similar, e isógonas en abanico convergente.

Los flancos cortos se adelgazan por deslizamiento a lo largo de la superficie axial, dando pliegues en forma de anzuelo (fig. 29 F). El flanco corto puede llegar a desaparecer completamente, dejando formas sigmoidales alternantes formando un ángulo alto con la superficie de esquistosidad.

Cartográficamente, los flancos largos siguen las direcciones de las estructuras mayores ONO-ESE, mientras que los flancos cortos siguen una trayectoria N-S. La gran mayoría de las estructuras sedimentarias y refracciones de la esquistosidad observadas muestran una polaridad estratigráfica con techo al sur. Puesto que los flancos cortos están pobremente representados en extensión, y suelen fracturarse, las polaridades reseñadas encajan con flancos largos directos, cuya aparición superficial cartográfica es mucho más abundante.

Los pliegues asimétricos vergen al norte en sección vertical, con superficies axiales subverticales buzando ligeramente al sur (ROBERTS, 1974; BELL, 1981). En sección horizontal, las superficies axiales señalan un giro levógiro respecto a las superficies de estratificación hacia el oeste. Casos aparentemente similares de pliegues de eje vertical girados hasta posiciones horizontales han sido descritos por procesos de deformación progresiva en zonas de cizalla (GHOSH y SUDIPTA SENGUPTA, 1987). La generalización de las observaciones en áreas alejadas entre sí en el Macizo Hespérico de la Península Ibérica, además de las observaciones en microestructuras,

no hacen probable este mecanismo en el área de estudio.

A.2) Superficie de esquistosidad principal

Tanto las pelitas como las grauvacas del Complejo esquisto-grauvácico presentan una esquistosidad muy desarrollada y penetrativa. En las pelitas toma el aspecto de un verdadero «slaty cleavage» (BASTIDA, 1981), mientras que en las grauvacas es algo más espaciada, y se describe como un «rough cleavage». Las características microscópicas de la esquistosidad se describen más adelante (pág. 12).

Puesto que los pliegues son muy apretados y el ángulo entre flancos generalmente agudo, la esquistosidad se presenta siempre muy próxima a la superficie de estratificación, especialmente en pelitas, en posición ligeramente menos norteada que la estratificación (fig. 30). Las dos superficies se intersectan en una lineación bien identificable en afloramiento, generalmente muy verticalizada y buzando hacia el noroeste. El estudio de microestructuras indica que la lineación de intersección es también una dirección de estiramiento mineral.

Son frecuentes las refracciones en la superficie de esquistosidad al atravesar capas de distinta competencia. Los ángulos de refracción pueden ser significativos cuando el espesor de las capas competentes supera algunos centímetros.

Los efectos de la deformación anterior a la fase principal no son reseñables en esta distribución de la esquistosidad, que presenta una disposición homogénea con un máximo bien definido respecto a la superficie de estratificación. En el área de estudio son predominantes las pelitas, que se comportan plásticamente respecto a la deformación, y muestran un plegamiento apretado. Todos los signos de deformación anterior se han observado en capas litareníticas, más abundantes en la unidad estratigráficamente superior.

El isoclinalismo y apretamiento de los pliegues, así como la proximidad de las superficies anteriores a la superficie de esquistosidad principal hercínica sugerida por otras observaciones, y la posible coaxialidad de ambas deformaciones, hace que los efectos diversificadores que la deformación anterior imprimiría en la distribución de

las estructuras de la fase principal, pasen relativamente inadvertidos en valoraciones estadísticas, y sólo se manifiesten en estructuras individualizadas.

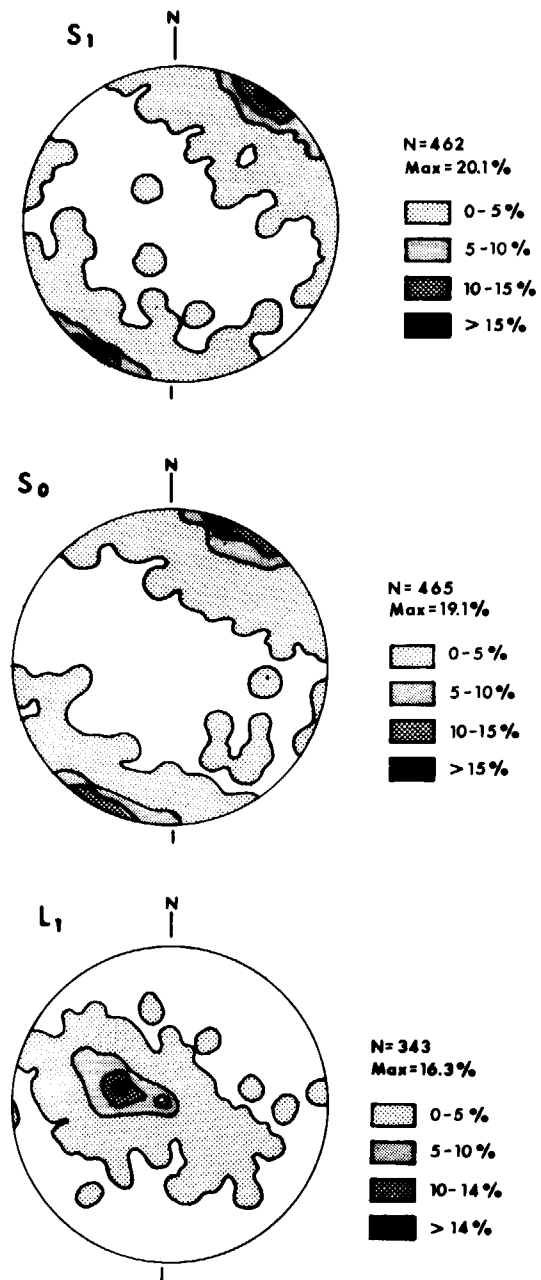


Figura 30.—Diagramas de contornos sobre proyección estereográfica en plantilla equiareal de SCHMIDT, semiesfera inferior, de polos de superficies de estratificación s₀, polos de superficies de esquistosidad hercínica principal s₁, y lineaciones de intersección L₁ entre ambas.

Deformación tardihercínica

Esquistosidad de crenulación

Con una disposición espacial generalizada, aunque no con la misma intensidad, aparece una esquistosidad subhorizontal buzando ligeramente hacia el sur y el este (fig. 31), que crenula a la superficie de esquistosidad principal.

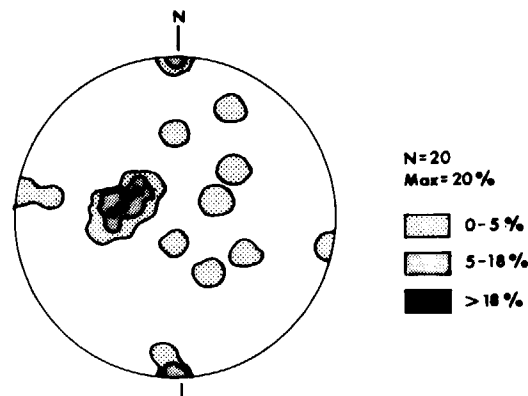


Figura 31.—Diagramas de contornos sobre proyección estereográfica en plantilla equiareal de SCHMIDT, semiesfera inferior, de polos de superficies de esquistosidad hercínica tardía s₂.

Se trata de una esquistosidad espaciada, que toma el aspecto frecuentemente de «kink-bands» con flanco corto de dimensiones milimétricas, especialmente en grauvacas. El espaciado disminuye en pelitas, y a veces es muy penetrativa, formando una verdadera crenulación con crestas de micropliegues a distancias menores a 1 mm. Los ejes de estos pliegues tienden a buzarse subhorizontalmente al ESE (fig. 32).

En ocasiones puede observarse esta esquistosidad espaciada englobando la esquistosidad hercínica principal en microlitones (lám. 3 A).

En grauvacas puede que las superficies de discontinuidad no estén bien definidas, y produzcan en la roca formas anastomosadas por interferencia con la superficie de esquistosidad hercínica principal subvertical. Los dominios amigdaloides así dibujados tienen un espaciado de varios centímetros, y se describen como una esquistosidad de crenulación extensional.

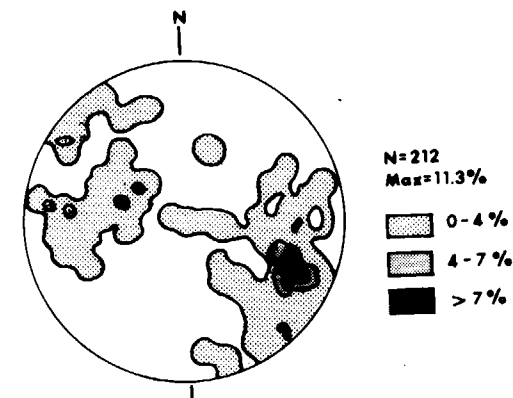


Figura 32.—Diagramas de contornos sobre proyección estereográfica en plantilla equiareal de SCHMIDT, semiesfera inferior, de lineaciones de intersección entre la superficie de esquistosidad hercínica tardía y superficies de esquistosidad hercínica principal.

Las discontinuidades producidas por la segunda superficie de esquistosidad coinciden a veces con los cuellos de «boudins» desarrollados en diques de cuarzo paralelos, bien a las superficies de estratificación, o a las superficies de esquistosidad hercínica principal.

Las rocas inmediatas al contacto con el granito de Nisa-Alburquerque con muestras de estar afectadas por metamorfismo térmico, registran asimismo esta esquistosidad espaciada subhorizontal. Los datos microestructurales aportarán mayor precisión en la relación temporal entre esta esquistosidad y la intrusión de los granitos.

Fracturación

En los últimos estadios de la deformación hercínica se produce una etapa de fracturación (PARGA, 1969; ARTHAUD y MATTE, 1975), a la que pertenece la Falla de Alentejo-Plasencia, que corta el granito de Nisa-Alburquerque en su borde oriental en dirección NNE-SSO, además de otras en dirección E-O, N-S y NO-SE.

Con la excepción de esta falla, cuyo trazado es muy evidente en el granito y la Sierra de S. Pedro, las fracturas no son fácilmente observables en las rocas plásticas del Complejo esquistograuváquico. El bien representado sistema de fracturas paralelo a la Falla de Alentejo-Plasencia

se manifiesta ampliamente en las cuarcitas de la serie paleozoica al norte de la porción estudiada, pero se amortiguan rápidamente al entrar en el Complejo. Es por ello que el estudio de microestructuras ha sido definitivo en la cartografía de alguno de estos accidentes, acompañado de análisis de imágenes, que se detallará más adelante.

Otras estructuras

En afloramientos son muy frecuentes «kink-bands» pertenecientes a varios sistemas con plano axial vertical, cuyos flancos cortos pueden ser milimétricos, hasta varios centímetros. Se trata de «kink-bands» asimétricos que se forman a un ángulo alto de la superficie de esquistosidad hercínica principal (fig. 33). Aunque rara

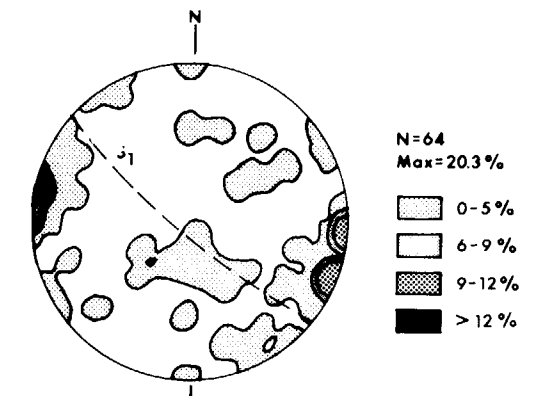


Figura 33.—Diagramas de contornos sobre proyección estereográfica en plantilla equiareal de SCHMIDT, semiesfera inferior, de polos de planos axiales de kink-bands subverticales formados durante las etapas tardías de la deformación hercínica.

vez aparecen reunidos los dos sistemas conjugados, la proyección polar de planos axiales revela dos máximos muy bien individualizados formando un ángulo bajo entre sí, de los cuales está más desarrollado aquel cuyo plano axial se aproxima a una posición vertical respecto a la superficie de esquistosidad.

Se observan «kink-bands» con más facilidad en las proximidades del granito. El endurecimiento de las rocas por metamorfismo térmico conserva estas estructuras, que se transforman fácilmente en diaclasas en zonas más alejadas. Su disposición perpendicular a la superficie de esquistosidad principal facilita la confusión con diaclasas.

A menudo aparece cuarzo a lo largo de las superficies de esquistosidad o de estratificación, que tienden a aboudinarse con ejes subhorizontales paralelos a los planos axiales de los «kink-bands» que a menudo constituyen la esquistosidad de crenulación tardihercínica.

Localmente, se observa una superficie de esquistosidad vertical con un espaciado de varios centímetros, que define microlitones con abundancia de pliegues intrafoliares cuyos ejes son horizontales y se inclinan al SE (lám. 3 B y C). Las superficies de esquistosidad buzan SSO. También definen microlitones de 2-3 cm. de espesor, que engloban y desplazan a las superficies de estratificación y esquistosidad principales. O, en otros casos, pueden observarse superficies oblicuas de deslizamiento que definen geometrías S, siendo las superficies C las superficies de esquistosidad principal hercínica, espaciadas decenas de centímetros entre sí.

MICROESTRUCTURAS EN PELITAS Y GRAUVACAS DEL COMPLEJO ESQUISTO-GRAUVAQUICO. EFECTOS DE SUPERPOSICION DE DEFORMACIONES

Microestructuras producidas por deformación

En este capítulo se describirán solamente las microestructuras generadas a escala regional, sin tener en cuenta deformaciones locales.

Deformación hercínica principal

Como se ha señalado anteriormente, la deformación hercínica se caracteriza por el desarrollo de pliegues, que son apretados en las lutitas del Complejo esquistograuváquico, y menos angula-

res en las intercalaciones gruesas de grauvacas o cuarcitas. Le acompaña la formación de una esquistosidad de plano axial bien definida con una disposición constante subvertical y subparalela a la superficie de estratificación en zonas de flanco.

Las presiones dirigidas presentes durante los procesos de deformación y metamorfismo regional producen recristalización y deformación simultáneas, que se producen de distintas maneras. Las texturas de las rocas metamórficas producidas por metamorfismo regional, dinámico y térmico de bajo grado son muy similares (SPRY, 1969).

Durante la actuación de la deformación, el efecto de las presiones dirigidas que favorece la cristalización y rotación de minerales con orientaciones preferentes respecto a la dirección del esfuerzo mayor. En áreas afectadas por un metamorfismo regional de bajo grado, las orientaciones preferentes son débiles, y tienden a ser más dimensionales que cristalográficas. Se da, a su vez, recristalización mimética a lo largo de la estratificación.

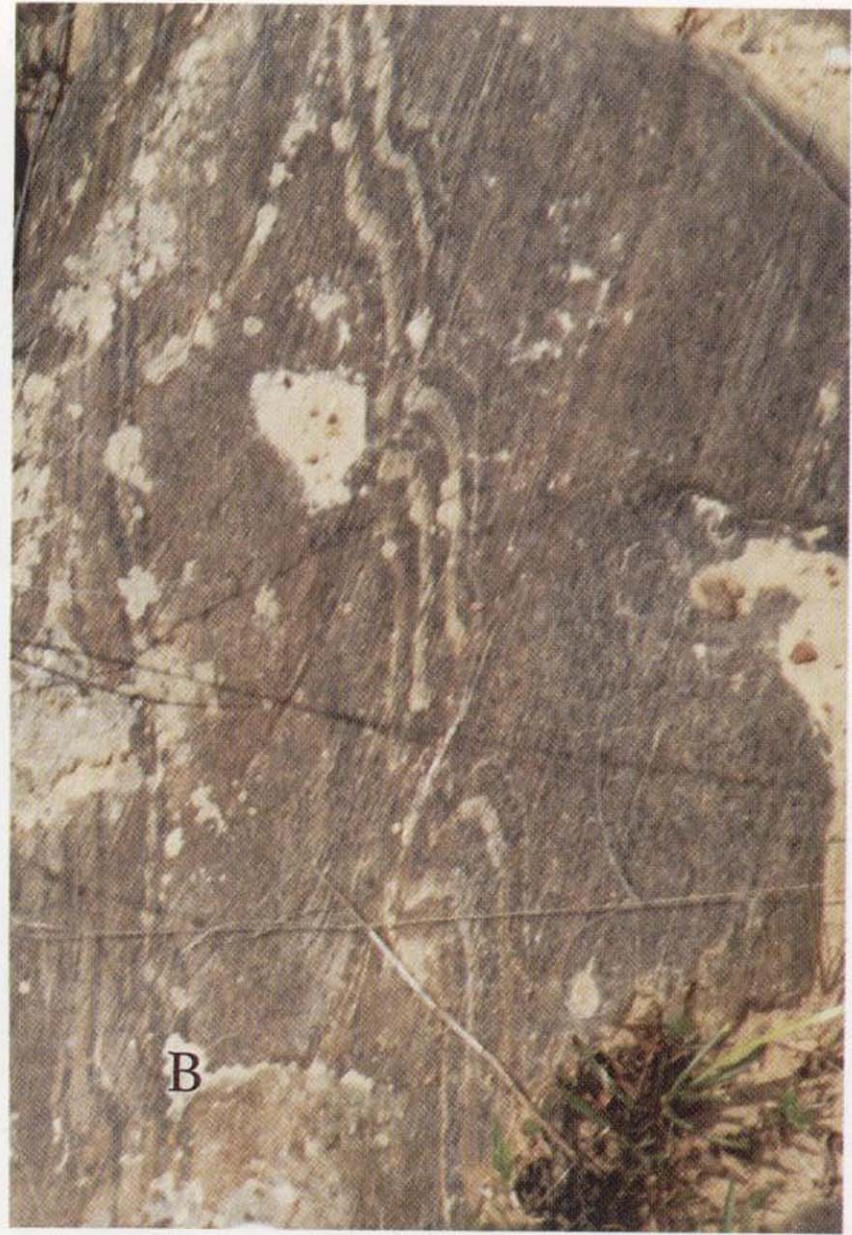
El rasgo más prominente del metamorfismo regional es la aparición de una foliación, definida por la elongación de granos minerales antiguos, el crecimiento de filosilicatos a partir de material arcilloso presente en la roca original en los planos de la misma (HOLEYWELL y TULLIS, 1975; ETHERIDGE y LEE, 1975), y la concentración en los mismos planos de minerales opacos.

La roca se diferencia en dominios enriquecidos selectivamente en distintos minerales separados por superficies de discontinuidad por procesos de disolución por presión. Estas superficies se empobrecen en sílice, y se enriquecen en potasio y aluminio respecto a la roca encajante (GRAY, 1977). Se ha descrito, asimismo, la concentración de cloritas con distinto contenido en hierro en dominios asociados a la formación de esquistosidad, o la aparición discriminatoria de illita en distintas superficies (KNIPE, 1981).

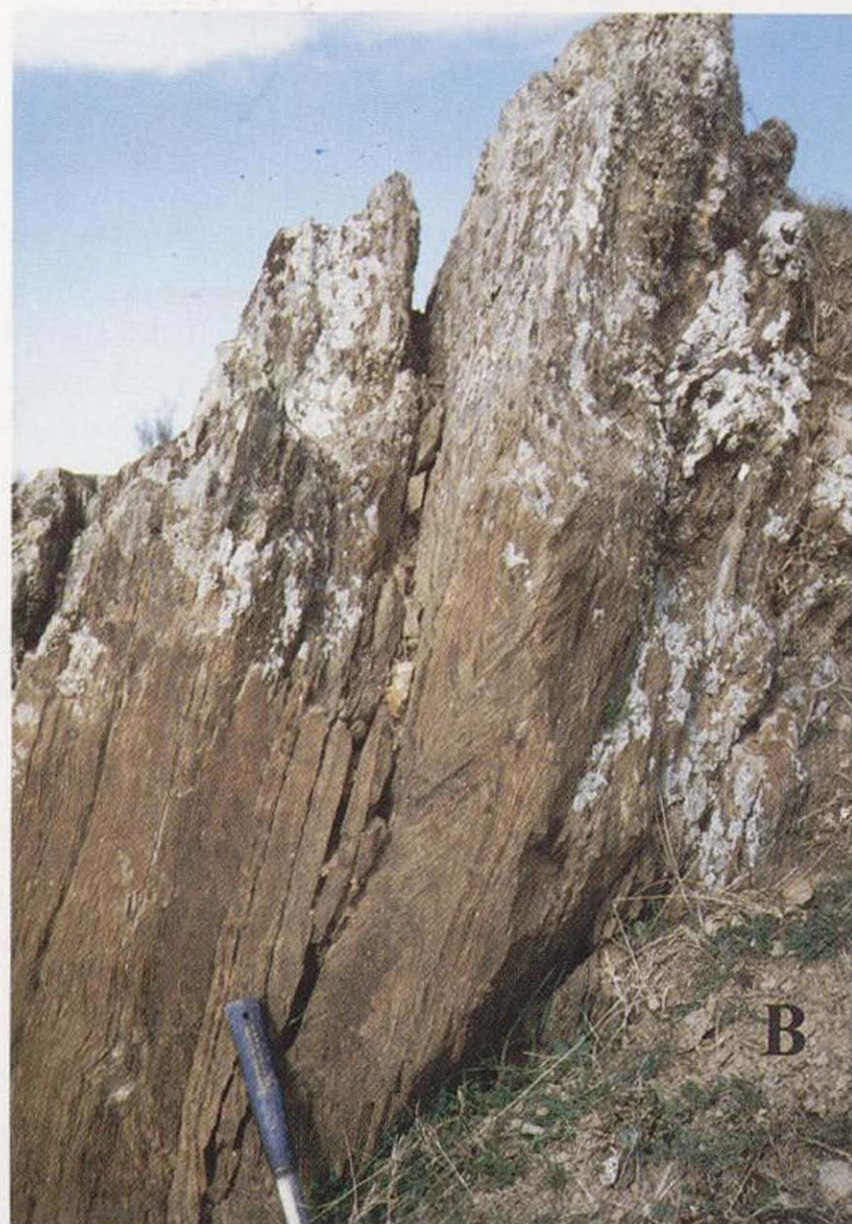
En el área de estudio se ha desarrollado un metamorfismo regional de bajo grado, perteneciente a la facies de los esquistos verdes (CASAS RUIZ y SANTOS DIAZ, 1982). Se describen aso-



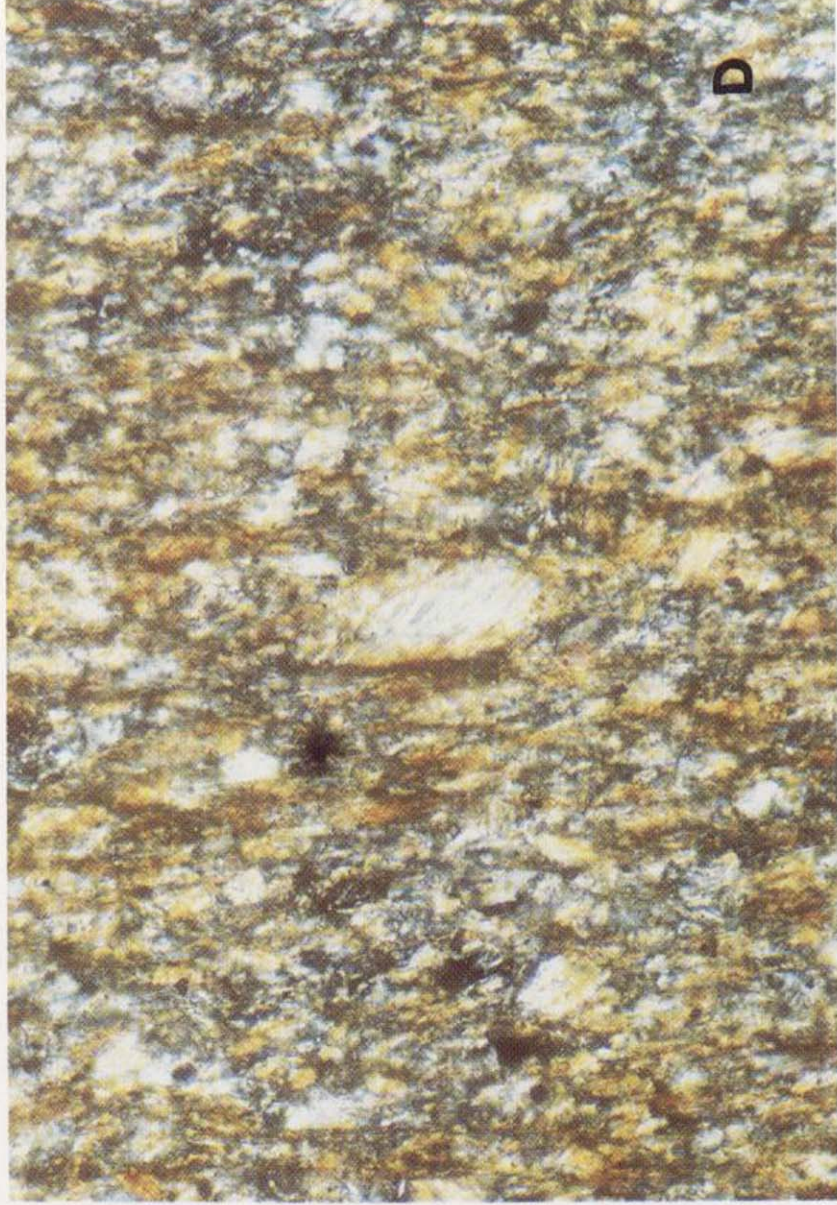
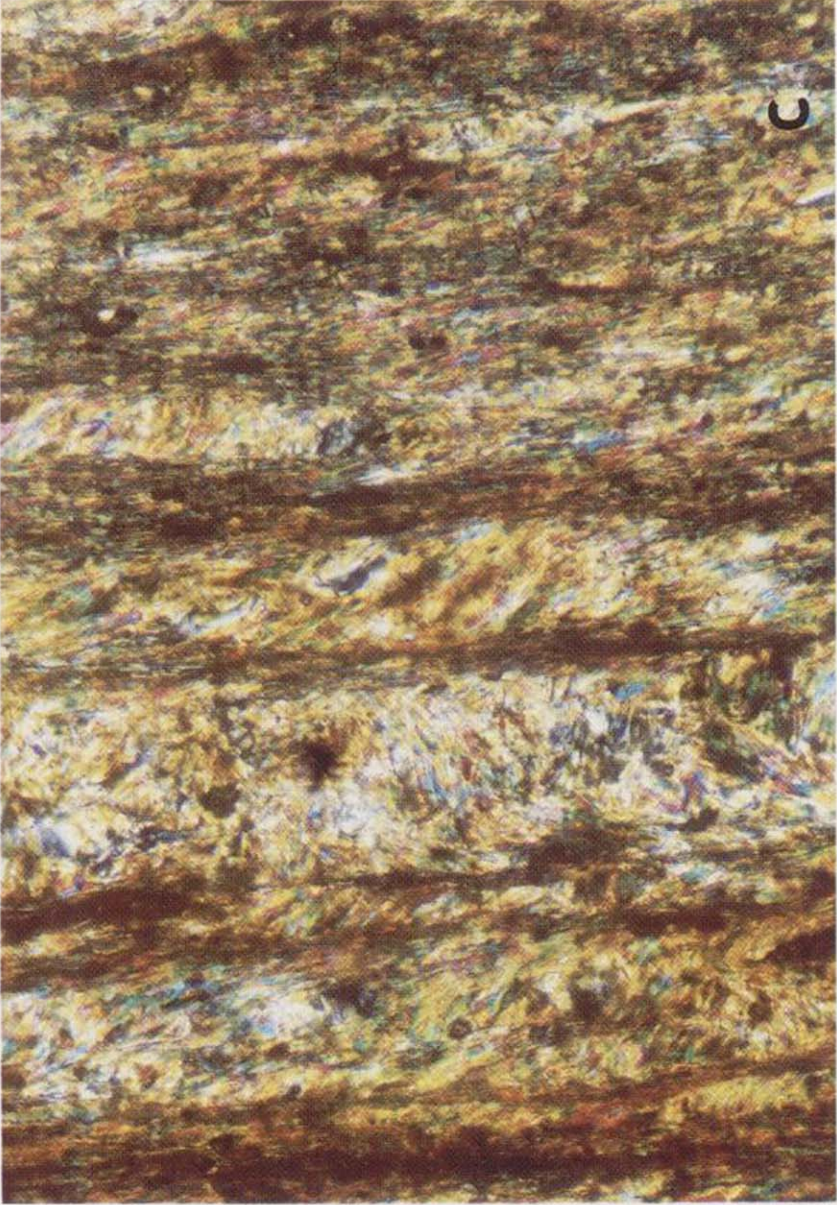
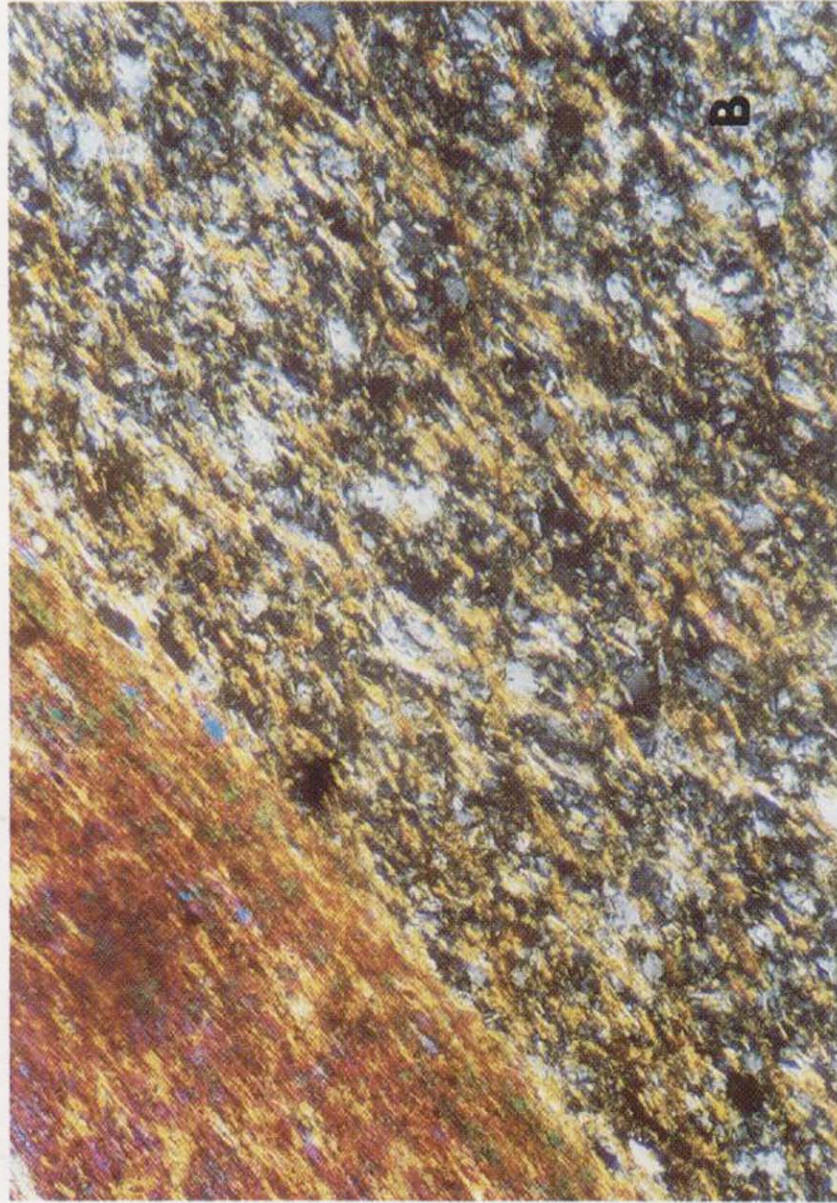
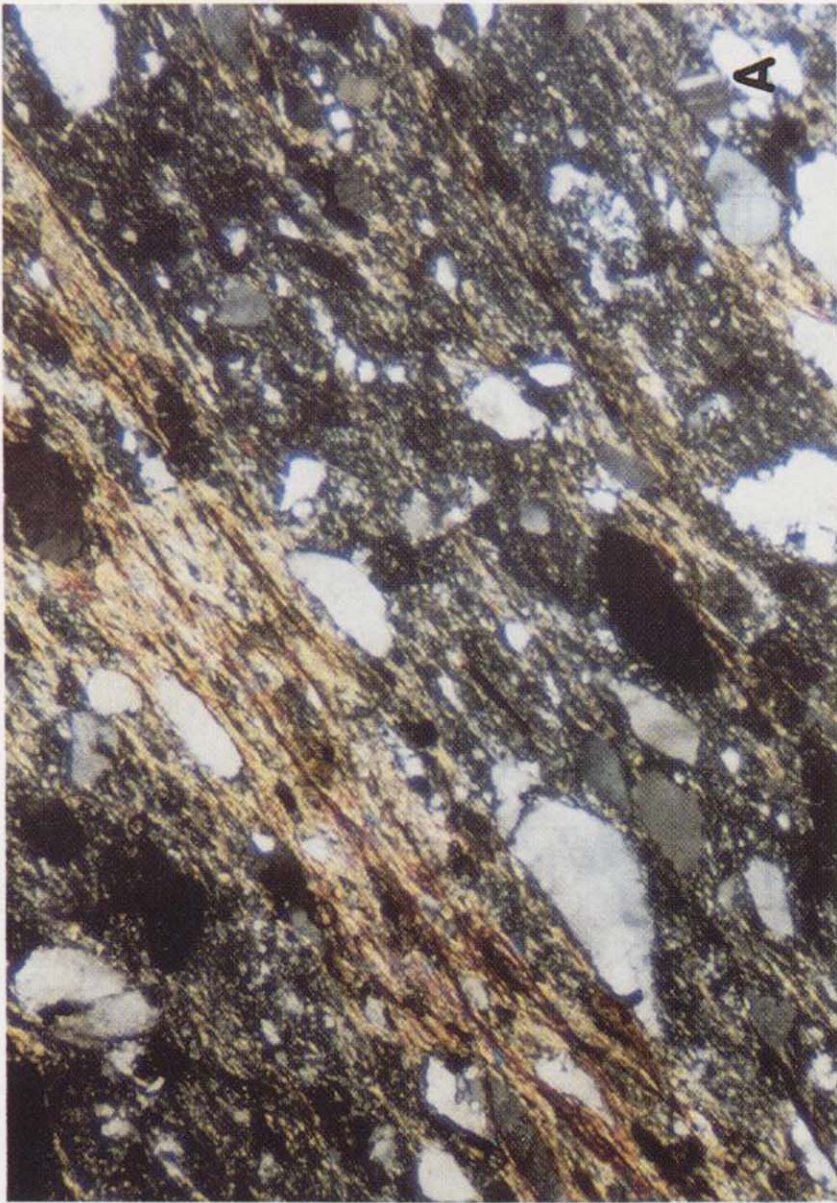
- A) Lineación de intersección en charnela de pliegue de eje horizontal, con trazado oblicuo al eje del mismo.
 B) Pliegues con formas redondeadas en pelitas por desplazamientos a lo largo de la superficie de esquistosidad.
 C) Pliegues desarrollados en capas alternantes de pelitas y grauvacas con espesores similares.



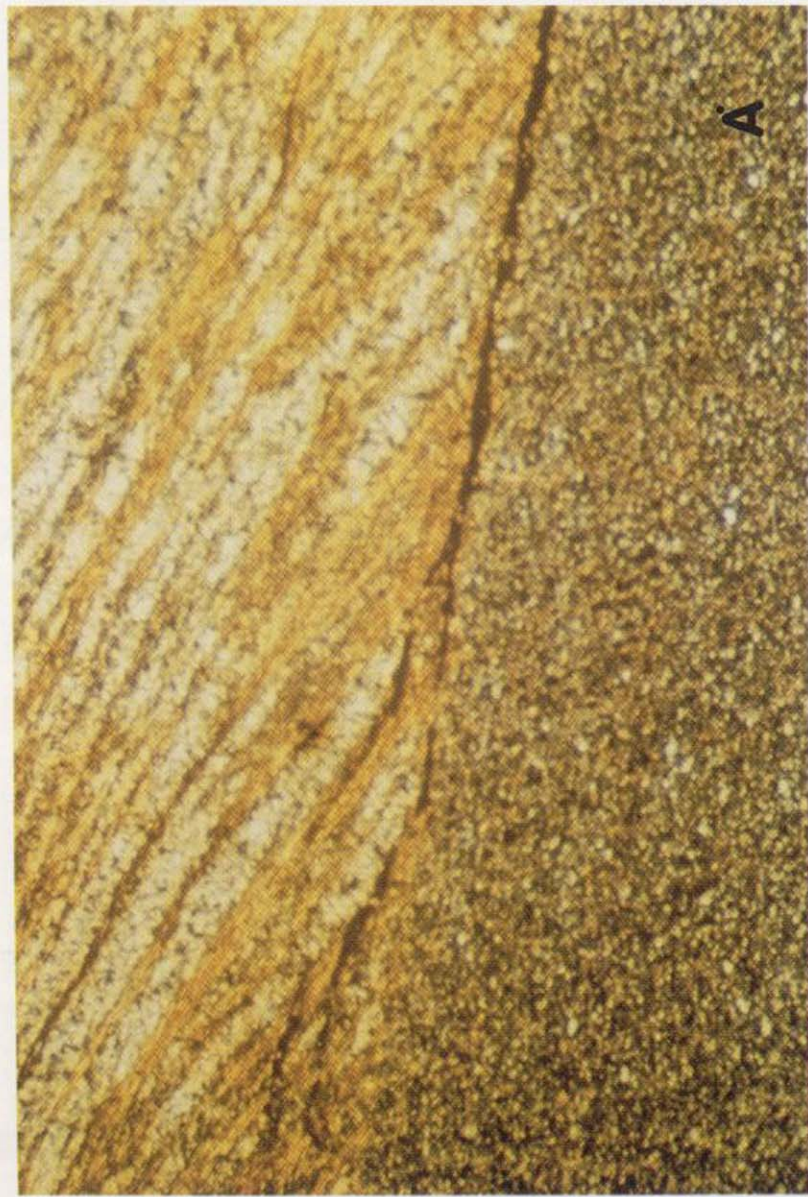
- A) Lineación de intersección en charnela de pliegue de eje horizontal, con trazado oblicuo al eje del mismo.
 B) Pliegues con formas redondeadas en pelitas por desplazamientos a lo largo de la superficie de esquistosidad.
 C) Pliegues desarrollados en capas alternantes de pelitas y grauvacas con espesores similares.



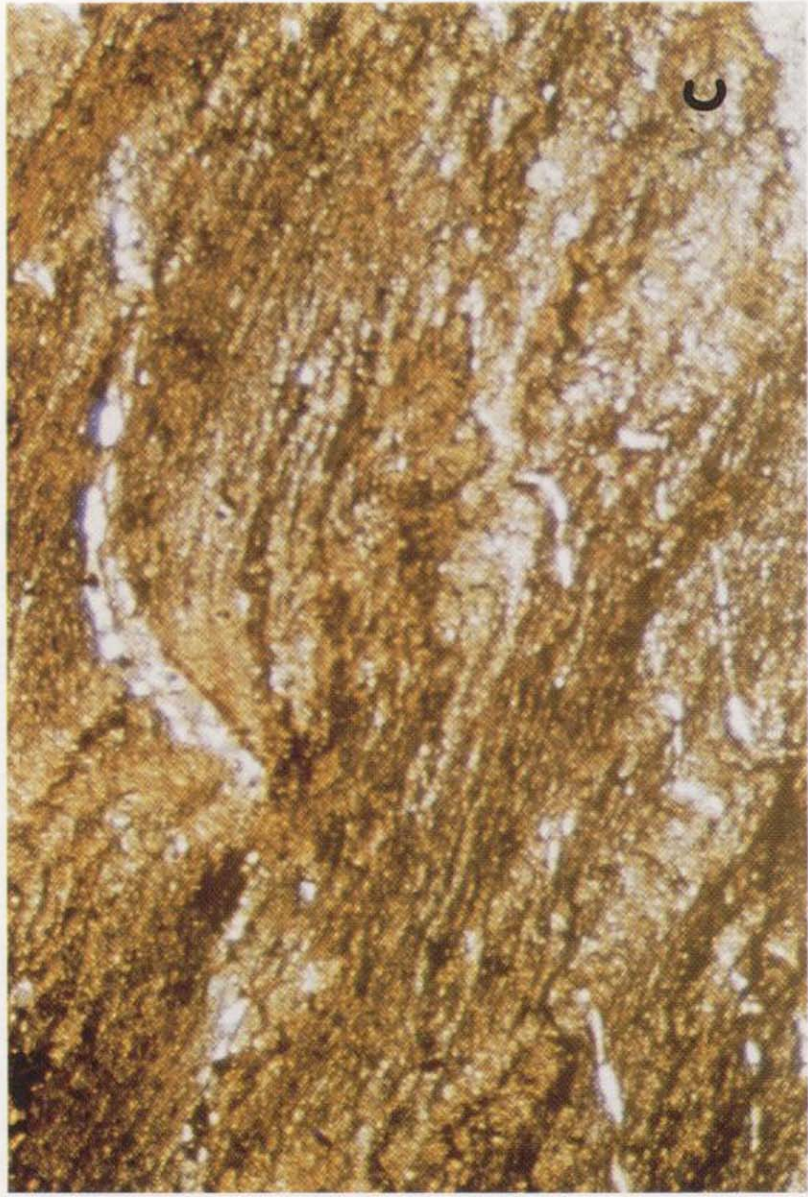
- A) Aspecto de esquistosidad de crenulación subhorizontal desarrollada durante las etapas tardías de la deformación hercínica.
- B) Pliegues intrafoliares formados en zonas de cizalla con superficies C verticales coincidentes con la superficie de esquistosidad hercínica.
- C) Zonas de cizalla con superficie C vertical desarrollando microlitones que engloban y desplazan a las superficies de estratificación y esquistosidad hercínica principal.



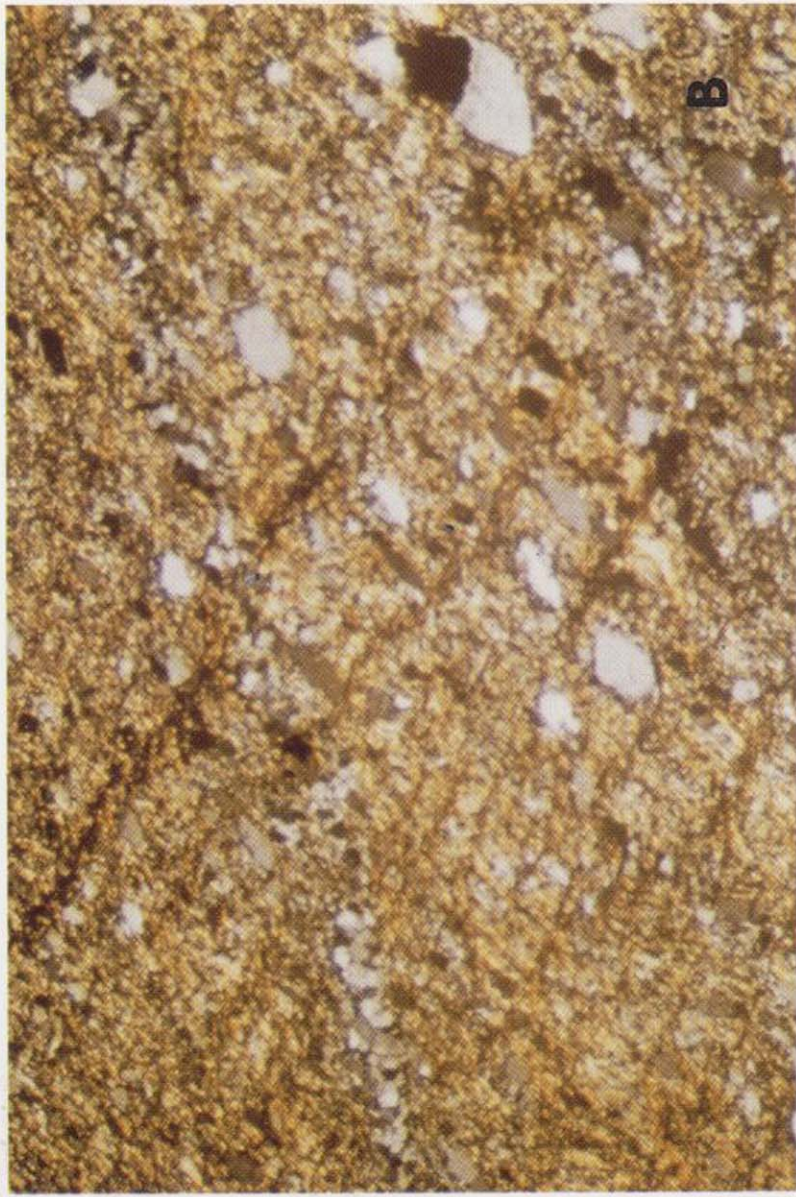
- A) Aspecto de la superficie de esquistosidad principal producida por metamorfismo regional en pelitas (16 aumentos).
- B) Aspecto de la esquistosidad principal producida por metamorfismo regional en grauwacas alternantes con pelitas (2,5 aumentos).
- C) Superficie afectada por la esquistosidad hercínica principal en pelitas (16 aumentos).
- D) Cristales de filosilicatos con planos de exfoliación internos englobados en la esquistosidad hercínica principal (16 aumentos).



A



C



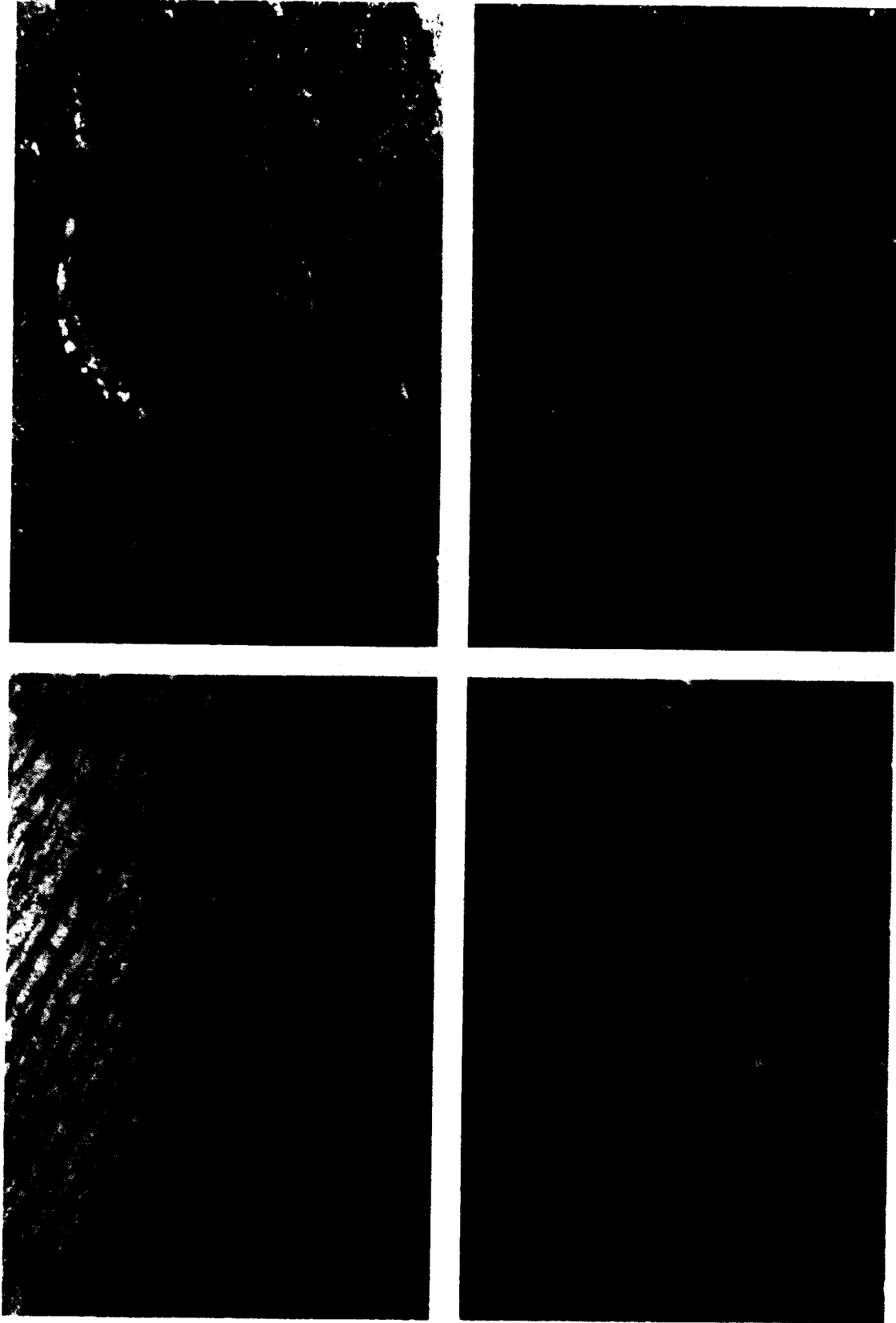
B



D

Microestructuras desarrolladas por la deformación tardihercínica.

- A) Superficie de esquistosidad tardihercínica oblicua a la superficie de esquistosidad principal desarrollada durante la deformación hercínica en alteración de pelitas y grauvacas (2,5 aumentos). Obsérvese la escasa manifestación en grauvacas.
- B) Superficies de heterogeneidad groseras desarrolladas en grauvacas. Los clastos mayores quedan englobados entre dos superficies contiguas (2,5 aumentos).
- C) Pliegues ptigmáticos desarrollados en relación con la deformación tardihercínica en alternancias de dominios filosilicatados y predominantes en cuarzo (2,5 aumentos).
- D) Suave plegamiento tardihercínico afectando a agregados minerales formados por efecto del metamorfismo térmico en pelitas (2,5 aumentos).



- Microestructuras desarrolladas por la deformación tardihercinica.
- A) Superficie de esquistosidad tardihercinica oblicua a la superficie de esquistosidad principal desarrollada durante la deformación hercínica en alteración de pelitas y grauvacas (2.5 aumentos). Obsérvese la escasa manifestación en grauvacas.
- B) Superficies de heterogeneidad groseras desarrolladas en grauvacas. Los clastos mayores quedan englobados entre dos superficies contiguas (2.5 aumentos).
- C) Pliegues ptigmáticos desarrollados en relación con la deformación tardihercinica en alternancias de dominios filosilicatados y predominantes en cuarzo (2.5 aumentos).
- D) Suave plegamiento tardihercinico afectando a agregados minerales formados por efecto del metamorfismo térmico en pelitas (2.5 aumentos).

ciaciones de minerales de cuarzo, albita, moscovita y clorita, y en ocasiones cuarzo, albita, epidota y biotita.

Pelitas

Las pelitas del Complejo esquistograuváquico son rocas de tamaño inferior a arena compuestas fundamentalmente por cuarzo y filosilicatos. Aunque el tamaño de grano no suele permitir la identificación de los filosilicatos, pueden mencionarse sericita, clorita, y en casos, biotita. También hay feldespatos, moscovita y minerales opacos.

Los clastos de cuarzo son subangulosos, con bordes generalmente rectos, en casos suturados por recristalización incipiente. Por efecto de las presiones dirigidas toman un aspecto elongado. La dimensión mayor de los clastos antiguos de cuarzo oscila entre 0,8 y 0,3 mm. Se presentan mayoritariamente aislados, sin bordes comunes, embebidos en la matriz, describiendo formas amigdaloides. Sus extinciones son limpias o débilmente ondulantes.

Se observan sombras de presión alargadas en la dirección de la esquistosidad alrededor de los clastos grandes de cuarzo. Si la geometría de los clastos es subredondeada, los cristales se desarrollan en las sombras alargadas perpendicularmente al borde del grano de cuarzo que es transversal a la esquistosidad. Los granos nuevos de cuarzo adyacentes a cristales mayores que han sufrido mayor cizallamiento y presentan formas sigmoidales, crecen oblicuamente a los bordes cóncavos del grano mayor que ofrece un ángulo también mayor con la superficie de esquistosidad.

Las superficies de estratificación están frecuentemente obliteradas por el desarrollo de esquistosidad en lámina delgada. Sólo son manifiestas en alternancias litológicas muy notables.

Cuando las pelitas son de grano muy fino, se desarrollan entre los clastos de cuarzo láminas de filosilicatos planares, que se prolongan en longitudes equivalentes a varias dimensiones mayores de clastos antiguos de cuarzo, y muestran una orientación preferente acusada.

La roca se diferencia en dominios alternantes y paralelos, microlitones, en los que predomi-

nan, bien el cuarzo, o los filosilicatos (lám. 4 A). El espesor de los microlitones varía con el tamaño de grano de la roca, y el grado de intensidad de la segregación mineral.

En las pelitas de grano muy fino se han observado microlitones con espaciados entre 0,2 y 0,6 mm. Las capas de enriquecimiento secundario son aquí continuas, y es difícil distinguir al microscopio los granos antiguos de cuarzo. Los cristales mayores de filosilicatos crecen paralelos a la superficie de esquistosidad, que es en este caso una verdadera «Schistosity» (BASTIDA, 1981), con una orientación preferente acusada. En los dominios filosilicatados abundan los cristales de clorita.

En ocasiones se observa una superficie englobada en la superficie de esquistosidad principal, que toma entonces el aspecto de una crenulación.

Toma la forma de una superficie penetrativa y apretada englobada en los microlitones definidos por la esquistosidad hercínica principal (lám. 4C.) En los dominios filosilicatados se manifiesta por una orientación preferente distinta. En los dominios cuarcíferos las superficies están señaladas por granos elongados. Están plegadas en ocasiones, siendo las superficies de esquistosidad principal hercínica sus planos axiales. Otras veces sólo describen sigmoides, si no ha habido suficiente deslizamiento a lo largo de la esquistosidad principal (TURNER y WEISS, 1963).

Pueden observarse cristales mayores de filosilicatos relictos englobados en los microlitones definidos por la esquistosidad hercínica (lám. 4 D). Sus planos de exfoliación están plegados y muestran extinción ondulante.

Se han descrito estructuras parecidas (mica fish) en zonas de cizalla desarrolladas en rocas ricas en filosilicatos, por aboudinamiento y microfracturación de granos de mica preexistentes (LISTER y SNOKE, 1984). Las superficies de foliación internas al grano coincidirían con las superficies C de las rocas milonitizadas. Sin embargo, en las rocas estudiadas no aparecen filosilicatos de pequeño tamaño dibujando conexiones entre distintos mica «fish». El conjunto de la roca no presenta la morfología de una roca cizallada, sino el de una roca simplemente aplastada. El alejamien-

to geográfico de las localidades de toma de muestras en las que aparece este fenómeno tampoco sugiere la asociación a zonas de cizalla.

Si hay clastos mayores relictos de cuarzo se disponen englobados típicamente entre las dos superficies, en forma romboidal, con la dimensión mayor paralela a la superficie oblicua a la superficie de esquistosidad principal.

Estas superficies sólo han podido observarse en un número muy limitado de muestras que tienen como característica común un tamaño de grano grueso en pelitas y fino en grauvacas.

Asimismo, se observan con más facilidad en secciones perpendiculares a la lineación de estiramiento mineral hercínica. En esta sección, la textura de la roca toma un aspecto equigranular más cercano a la textura de la roca primitiva en relación a la sección paralela a la lineación de estiramiento, permitiendo de este modo una mejor conservación de texturas anteriores. Aunque no ha sido posible observar la superficie en dos secciones perpendiculares correspondientes a la misma muestra, su disposición en una sola sección sugiere una posición próxima a la de la esquistosidad hercínica principal, en dirección más norte-sur que la misma.

El desarrollo de estas superficies puede relacionarse con la diferente posición inicial de las capas por efecto de la deformación anterior a la hercínica en relación al desarrollo de pliegues con esquistosidad asociada.

Grauvacas

Las grauvacas son rocas detríticas heterogéneas formadas por clastos embebidos en una matriz sericítico-clorítica. Los clastos grandes están compuestos principalmente por cuarzo, plagioclasas y fragmentos de rocas, muchas de las cuales presentan texturas volcánicas. La clasificación es pobre, y el material intersticial sobrepasa el 15 por 100 del volumen total de la roca.

Los clastos grandes, predominantemente cuarcíferos, están aislados en una matriz abundante, en la que no predominan los filosilicatos (lámina 4 B). No ofrecen bordes comunes, y toman formas elongadas, con dimensiones mayores comprendidas entre 3 y 1 mm. La relación habitual entre las dimensiones mayor y menor de los clastos grandes es de 2 a 1.

Aunque la mayor parte de los clastos mayores son elongados, también toman formas equidimensionales. Sus bordes suelen ser rectos, y en algunos casos corroídos, lo que sugiere un origen volcánico.

Presentan predominantemente una extinción limpia. Cuando es ondulante, la extinción tiende a disponerse oblicuamente a la dirección de estiramiento mineral.

Por efecto de la deformación se forman superficies de discontinuidad que definen una esquistosidad grosera («rough cleavage») anastomosada (BASTIDA, 1981). Estas superficies están definidas por acumulación de minerales opacos y filosilicatos, tienen una longitud similar a varias dimensiones mayores de granos antiguos y engloban clastos de cuarzo más elongados que los adyacentes en formas amigdaloides. Un espaciado de 4 mm. entre dos superficies contiguas es habitual.

Son frecuentes las sombras de presión formadas por recristalización de granos nuevos de cuarzo y filosilicatos.

Si aparecen en los extremos de cristales elongados, toman el aspecto de penachos predominantemente filosilicatados. Si, por el contrario, se forman adyacentemente a granos equidimensionales, aparecen como los flecos de una alfombra, mostrando una orientación preferente acusada en la dirección de la lineación de estiramiento mineral.

Deformación tardihercínica

En todo el área estudiada se observa de manera extensa una superficie más o menos espaciada de disposición subhorizontal, ligeramente vergente al este, y subperpendicular a las superficies de estratificación y la esquistosidad principal hercínica.

En capas litareníticas desarrolla una lineación de intersección grosera que pasa a ser penetrativa en pelitas, tomando el aspecto de una verdadera crenulación con desarrollo de microlitones que engloban a la esquistosidad hercínica principal (lám. 5 A).

Al microscopio, en capas de grano fino, se manifiesta en bandas con extinción alternante de

filosilicatos por reorientación de las micas antiguas (lám. 5 B). Aparecen filosilicatos de neoformación en los planos de discontinuidad que limitan los microlitones de la nueva esquistosidad. Si se conservan cristales mayores de filosilicatos antiguos, presentan extinción ondulante.

En los dominios ricos en cuarzo, la formación de una nueva superficie se pone de manifiesto por una desorganización relativa de la orientación de los granos antiguos. La elongación de los mismos paralelos a la superficie de esquistosidad hercínica es menos evidente, y se insinúan pliegues cuyo plano axial es la nueva superficie de esquistosidad. Si la roca presenta clastos de mayor tamaño, se agrupan en los microlitones de la nueva esquistosidad. Sus dimensiones mayores son paralelas a la esquistosidad previa. Los filosilicatos se forman paralelos a las superficies que limitan los microlitones.

En pelitas afectadas por metamorfismo térmico ocasionado por la intrusión tardía de masas graníticas, la esquistosidad subhorizontal dobla claramente las manchas producidas por aumento de temperatura (lám. 5 D). Esto indica que es posterior a la intrusión de los plutones, o que representa las postrimerías de una deformación progresiva en la que la intrusión se produce en un lapso de tiempo relativamente temprano respecto a la formación de esta esquistosidad.

Otros autores (MATTE, 1968; MARCOS, 1973; ORTEGA, 1980; MIRA et al., 1987) coinciden con esta interpretación, atribuyendo al desarrollo de estos micropliegues subhorizontales un carácter sincinemático respecto a la intrusión de granitos en una etapa distensiva tardía de la deformación hercínica.

Microestructuras producidas por metamorfismo térmico

La intrusión tardía de masas graníticas producen transformaciones en la textura de las rocas por efecto de un aumento de calor, en ausencia de presiones dirigidas. Esto produce una desorganización de las texturas preexistentes, y el crecimiento mimético de minerales nuevos.

Las transformaciones mineralógicas producidas se encuadran en los esquistos biotítico-cordieríticos, con desarrollo de cordierita, andalucita,

biotita y moscovita (CASAS RUIZ y SANTOS DIAZ, 1982).

Pelitas

Las rocas ricas en arcillas y de grano fino forman por efectos térmicos agregados endurecidos de tamaño muy fino. La intensidad de la recristalización no llega a obliterar la superficie de esquistosidad preexistente.

En las fases incipientes, se forman manchas ovaladas en las que se concentran filosilicatos con una orientación preferente respecto al resto de la roca, que nuclean en minerales opacos. Las dimensiones mayores de los óvalos son paralelas a la dirección de estiramiento mineral preexistente. Las manchas muestran preferencia a situarse en puntos en los que los dominios filosilicatados desarrollados con anterioridad por efecto de presiones dirigidas están más próximos entre sí. La mayor abundancia relativa de filosilicatos en las inmediaciones favorece su concentración alrededor de los núcleos de minerales opacos.

En manchas bien definidas, suele aparecer un borde externo más oscuro que el interior, en el que la orientación es ligeramente distinta. Algunas de estas manchas se han identificado como cordierita alterada.

Son frecuentes los cristales de andalucita de mayor tamaño que el conjunto de la roca, que crecen a veces enmarcados en las superficies de esquistosidad, y otras superponiéndose a la misma. También se observan cristales prismáticos de micas blancas oblicuos a la lineación de estiramiento mineral, y biotita, bien paralela a la misma, o con distinta orientación.

Grauvacas

El metamorfismo de contacto se manifiesta de manera peculiar en rocas con una textura heterogénea original y abundancia de minerales clásicos arcillosos susceptibles de experimentar reacciones químicas.

Las rocas sufren en estadios iniciales una uniformización relativa del tamaño de grano, y adquieren progresivamente un aspecto de textura granuda por recristalización (lám. 6 B).

Aparecen manchas ovaladas en el interior de las cuales los cristales de cuarzo muestran una elongación mayor que en el exterior, paralela a la esquistosidad preexistente, y en las que crecen micas y otros minerales preferentemente orientados. Las manchas son menos evidentes que en las pelitas, por la menor abundancia de minerales arcillosos.

Los minerales en el interior de las manchas toman frecuentemente un aspecto filamentoso con cristales de bordes poco claros y extinción gris, sugiriendo la presencia de andalucita.

La esquistosidad producida por el metamorfismo de contacto se mantiene en la roca, aunque la segregación de minerales en microlitones se suaviza en el interior de las manchas, donde los dominios filosilicatados difuminan su coloración, y el espaciado entre ellos es menor.

Las manchas ofrecen un borde externo de color amarillo más intenso que el interior de las mismas con luz transparente, y más oscuro con luz polarizada, por la mayor abundancia de minerales opacos.

Cuando la intensidad de la influencia del metamorfismo térmico aumenta, las manchas aumentan de tamaño y se enriquecen en filosilicatos (lám. 6 A). La distancia entre ellas disminuye. El tamaño de grano en el interior de las manchas es menor que en el exterior. Aparecen cristales mayores de micas blancas, en principio en el seno de las manchas.

Las rocas toman el aspecto de una textura equigranular microcristalina en estadios avanzados (lám. 6 D). La geometría preexistente de la esquistosidad no desaparece, y los microlitones se conservan parcialmente por la abundancia relativa de cristales de cuarzo, pero las micas pierden su orientación preferente. Los granos de cuarzo se orientan también al azar, y presentan una extinción limpia.

De modo oblicuo a la esquistosidad, crecen porfiroblastos de mayor tamaño de andalucita, aunque se distribuyen manteniendo groseramente la posición de los microlitones (lám. 6 C). Reproducen así la posición de la esquistosidad primitiva, sin duda por la mayor disponibilidad de los minerales a partir de los cuales se forman en los dominios enriquecidos en filosilicatos previos.

Cuando la roca conserva una textura fuertemente heterogranular, los bordes de los clastos de cuarzo son menos rectos por la activa recristalización en la matriz. Los granos nuevos en la matriz no muestran una orientación preferente global, pero sí dibujan manchas con orientaciones próximas entre sí, testigos de la procedencia de cristales antiguos con una orientación común.

Los dominios enriquecidos en filosilicatos antiguos, cortos, y espaciados, difuminan sus contornos. El conjunto de la roca se cubre de acículas de cristales de filosilicatos oblicuos a la dirección de estiramiento mineral previa.

Microestructuras producidas por metamorfismo dinámico

Los procesos que actúan durante el metamorfismo dinámico ocasionan deformación a bajas temperaturas y alta velocidad de deformación en las rocas. De forma típica, éstas sufren milonitización, reducción del tamaño de grano, cataclasis, disolución por presión y débiles procesos de recristalización (SPRY, 1960).

En el área de estudio, los efectos que se describen a continuación están asociados a zonas de cizalla de desarrollo débil en relación con las etapas tardías de la deformación hercínica (IV parte).

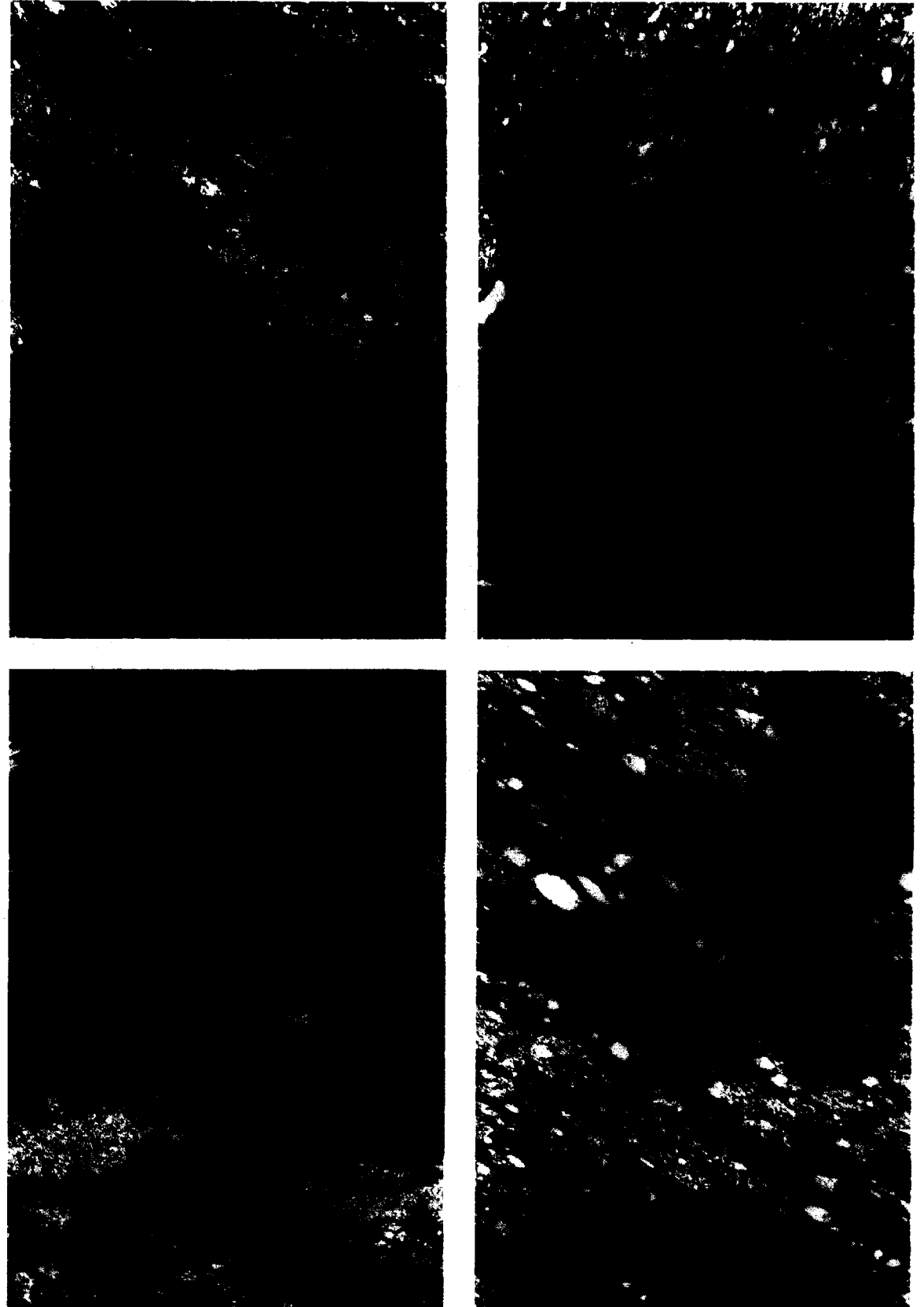
Pelitas

Las pelitas son rocas de comportamiento plástico, por lo que no sufren cataclasis ni brechificación por efecto del metamorfismo dinámico. Desarrollan texturas similares a las formadas durante el metamorfismo regional de bajo grado, en la forma de una recristalización extensa en granos de tamaño muy fino.

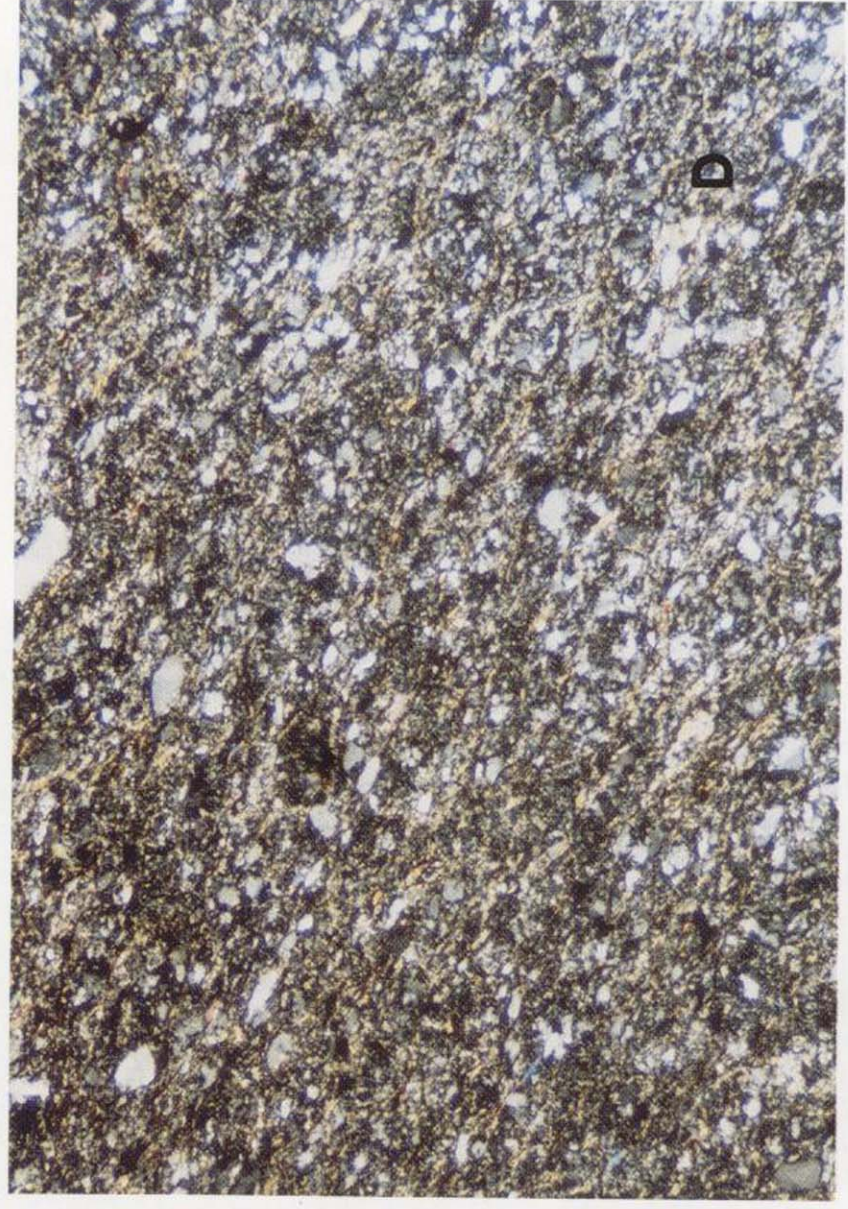
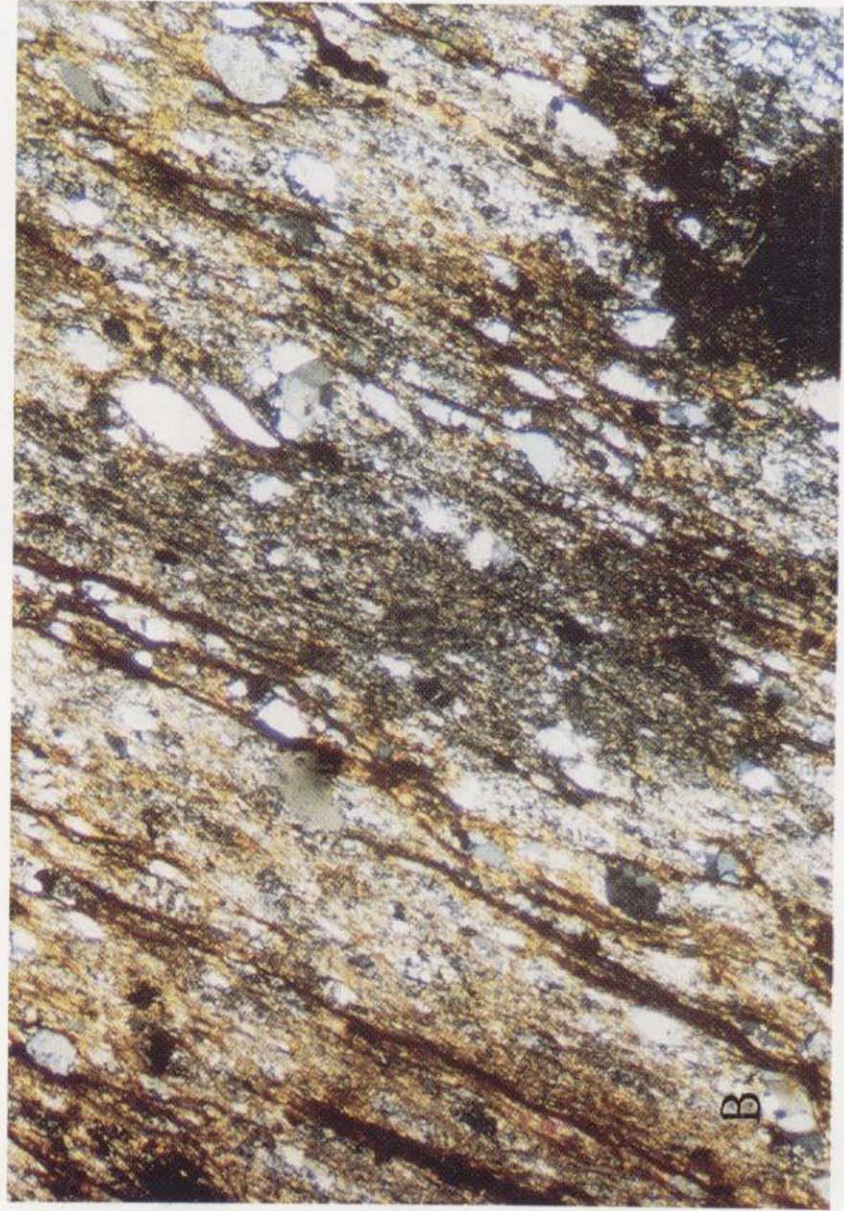
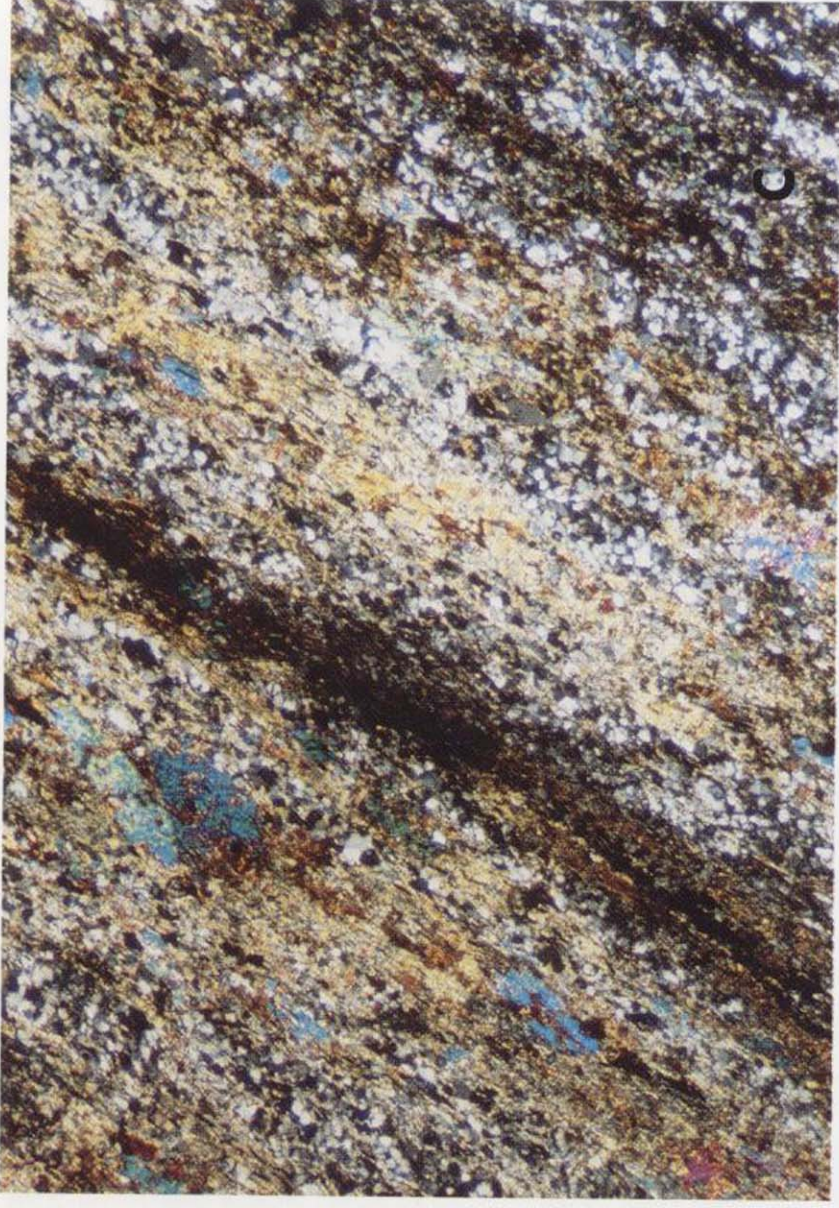
La esquistosidad se intensifica, así como el deslizamiento a lo largo de sus planos de discontinuidad. Les acompaña la recristalización y el crecimiento de illita, clorita y sericita con orientación preferente.

Se mantiene la distribución en microlitones, aunque sus contornos se difuminan. El cuarzo aparece fragmentado en los dominios en los que predomina, y ofrece fuerte extinción ondulante paralela en granos adyacentes, al proceder de gra-

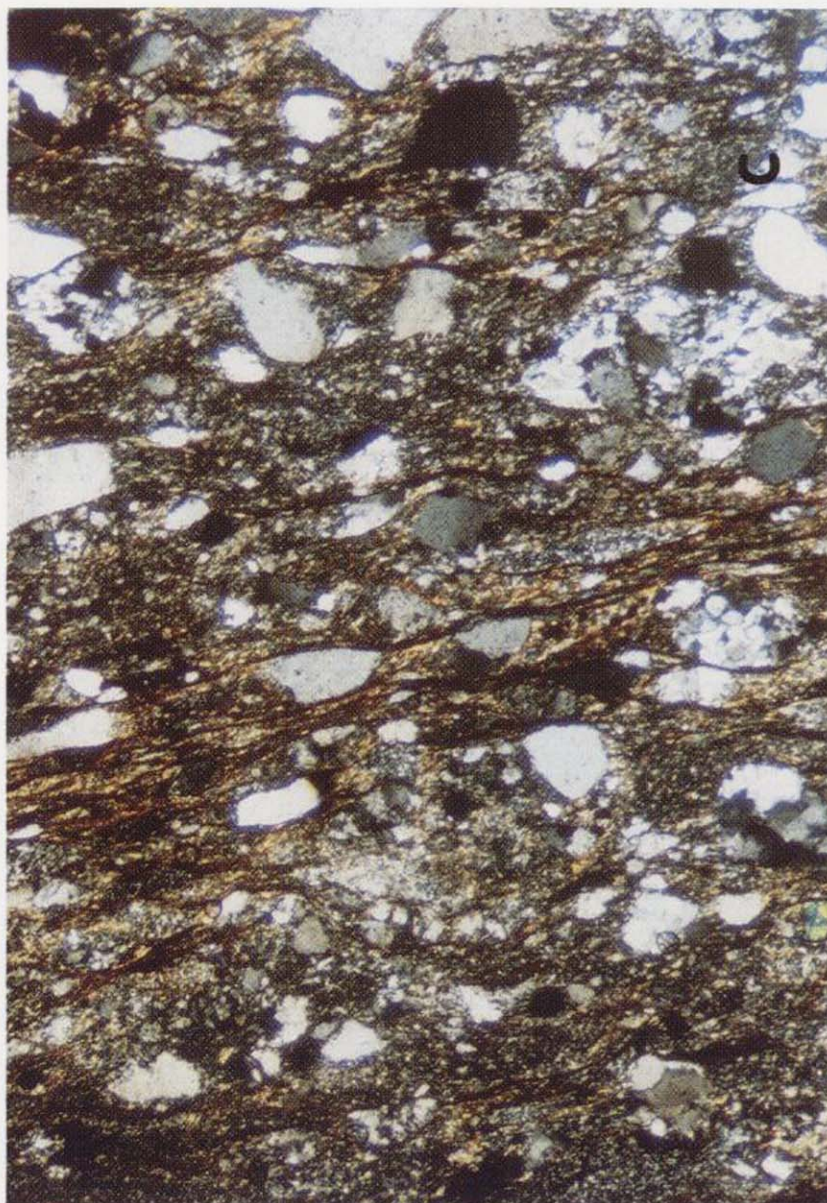
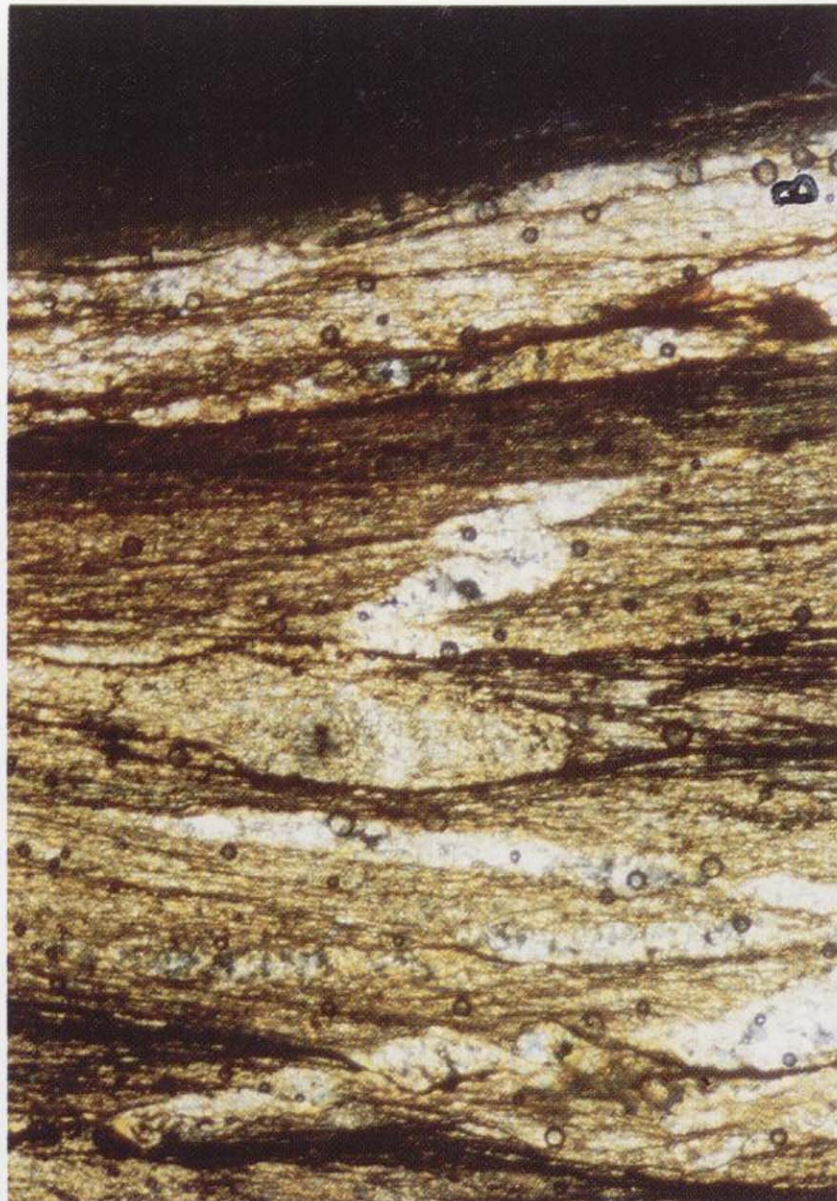
LAMINA 6



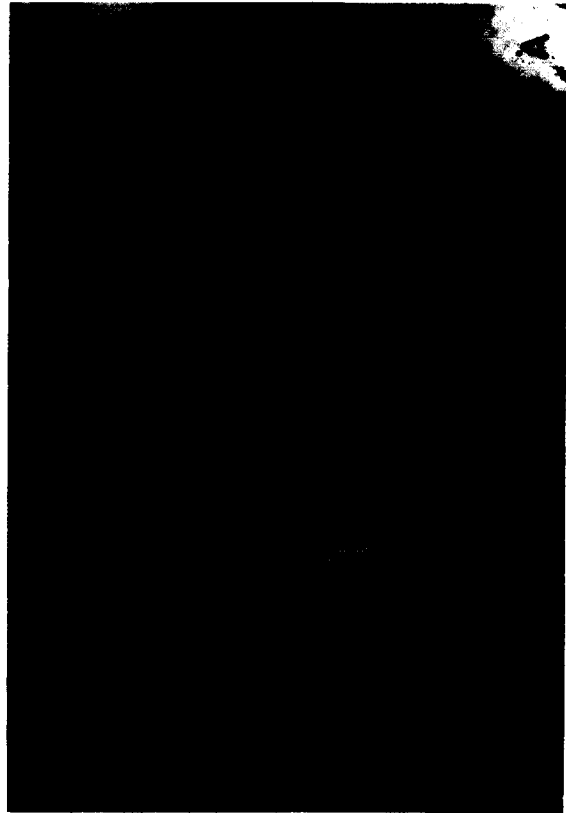
Microestructuras desarrolladas por metamorfismo térmico.
 A) Agregados minerales enriquecidos en fillosilicatos en grauwacas (2,5 aumentos).
 B) Desarrollo incipiente de agregados minerales en grauwacas (2,5 aumentos).
 C) Porfiroblastos de andalucita en corneanas desarrollados preferentemente sobre dominios fillosilicatados (2,5 aumentos).
 D) Textura equigranular microcristalina en corneanas (2,5 aumentos).



- Microestructuras desarrolladas por metamorfismo térmico.
- A) Agregados minerales enriquecidos en filosilicatos en greuvacas (2,5 aumentos).
 - B) Desarrollo incipiente de agregados minerales en greuvacas (2,5 aumentos).
 - C) Porfiroblastos de andalucita en corneanas desarrollados preferentemente sobre dominios filosilicatados (2,5 aumentos).
 - D) Textura equigranular microcristalina en corneanas (2,5 aumentos).



Microestructuras desarrolladas por metamorfismo dinámico.
A) Cristal de cuarzo con extinción ondulante, indicios de mosaización, y bordes saturados (2,5 aumentos).
B) Pliegues intrafoliares en pelitas (2,5 aumentos).
C) Metamorfismo dinámico en grauvacas de grano grueso. Clastos mayores en mosaico o con fuerte extinción ondulante e indicios de fragmentación. Matriz de aspecto triturado (2,5 aumentos).



Microestructuras desarrolladas por metamorfismo dinámico.

- A) Cristal de cuarzo con extinción ondulante, indicios de mosaización, y bordes saturados (2,5 aumentos).
 B) Pliegues intrafoliares en pelitas (2,5 aumentos).
 C) Metamorfismo dinámico en grauvacas de grano grueso. Clastos mayores en mosaico o con fuerte extinción ondulante e indicios de fragmentación. Matriz de aspecto triturado (2,5 aumentos).

nos mayores previos que han sufrido mosaización (lám. 7 A).

Las micas presentan una fuerte orientación preferente en los dominios ricos en filosilicatos. Cuando no existen dominios ricos en cuarzo, y la roca presenta un grano fino homogéneo, toda la fábrica adopta una orientación preferente muy acentuada, al haber sufrido una recristalización intensa.

En los dominios ricos en filosilicatos, tienden a segregarse bandas oblicuas a la esquistosidad con una orientación preferente distinta a la de la esquistosidad preexistente.

Son frecuentes los pliegues intrafoliares, y los restos de flancos arrastrados a lo largo de la esquistosidad (lám. 7 B).

Todas las características descritas encajan en la descripción de protomilonitas formadas en régimen de deformación cuasiplástica producida por fallas asísmicas en zonas de cizalla poco desarrolladas o zonas marginales de zonas de cizalla dúctiles (SIBSON, 1977).

Grauvacas

Los cambios producidos por metamorfismo dinámico se concentran en las grauvacas en la matriz de la roca. También aquí se producen texturas similares a las del metamorfismo regional.

En las rocas débilmente milonitizadas, se conservan restos de clastos elongados con extinción ondulante débil. Los clastos mayores desarrollan texturas en mosaico. La deformación se concentra en la matriz, manifestada en la difuminación de microlitones, y una fuerte orientación preferente de los filosilicatos. La existencia de una esquistosidad previa bien desarrollada impide la formación de esquistosidades espaciadas observada en cizallas de bajo grado (KNIPE y WHITE, 1979). Las sombras de presión en cristales mayores de cuarzo también se difuminan.

Al intensificarse la milonitización, los clastos grandes se fragmentan y adquieren extinción ondulante, al rotar los granos elongados de la fábrica, deformándose por «creep» de dislocaciones (KNIPE y WHITE, 1979). La presencia de matriz impide que se orienten preferentemente.

La distribución en microlitones se difumina. Las superficies enriquecidas en filosilicatos y opacos presentan bordes confusos, y toman contornos sigmoidales. La orientación preferente es moderada en la matriz.

Aparecen cristales mayores preferentemente en los pliegues intrafoliares en el interior de microlitones. Se observan charnelas desplazadas, flancos rotos y arrastrados a lo largo de las superficies de esquistosidad, disponiéndose en casos imbricados y adelgazados paralelamente a la misma.

Los granos mayores presentan texturas en mosaico. Los subgranos interiores se extinguen ondulantemente por zonas en continuidad óptica (lám. 7 C). La dirección de la extinción ondulante es oblicua a la esquistosidad en el centro, y cambia progresivamente de orientación hasta ser paralela a los bordes del grano mayor, y a la esquistosidad, hacia los ápices de los granos elongados.

Abundan los diques de cuarzo de espesor menor a 1 mm. En ellos los granos de cuarzo presentan una textura granuda, están elongados en una dirección oblicua al dique y presentan extinción ondulante. En ocasiones, la foliación en la matriz dibuja formas helicíticas oblicuas a los diques de cuarzo. La dirección de elongación de los granos en el interior de los diques es paralela a la de la foliación de la matriz en el punto en que les atraviesa.

CONCLUSIONES

Las estructuras menores extensamente representadas corresponden a la fase principal de deformación hercínica, y son pliegues asimétricos con un flanco corto y otro largo, en los que la esquistosidad subvertical se dispone próxima al flanco corto, y siempre muy cercana a la superficie de estratificación, con la excepción de las refracciones en capas competentes. Los ejes de estos pliegues son subverticales en dirección NO.

La existencia de una deformación prehercínica, o anterior a la fase de deformación hercínica principal, se pone de manifiesto por la aparición de pliegues transectos por la esquistosidad hercínica principal, que no coincide, por tanto, con la superficie axial de los mismos. Se dan charnelas

con lineaciones de trayectoria oblicua a la traza axial de los pliegues correspondientes, que han sido desplazadas respecto a las superficies axiales. La geometría de esta deformación anterior no parece manifestarse en la evaluación estadística de las estructuras de la fase de deformación hercínica principal.

Las microestructuras de las pelitas y grauvacas del Complejo esquistograuváquico revelan la superposición de varias etapas de deformación, y la influencia predominante alternante de presiones dirigidas, aumentos de temperatura, o altas presiones a alta velocidad de deformación.

La superficie de foliación más importante es una esquistosidad bien desarrollada que acompaña a la formación de pliegues, con desarrollo de dominios ricos en filosilicatos o cuarzo, aplastamiento con reorientación cristalográfica de granos antiguos, y cristalización de minerales nuevos orientados preferentemente.

La intrusión de masas graníticas tardía produce un metamorfismo térmico registrable en la desorganización de la textura anterior, con desarrollo de manchas donde se acumulan filosilicatos con una orientación preferente mimética respecto a la esquistosidad principal. En estadios avanzados, la roca toma un aspecto microgranular con elongaciones de cristales preexistentes corregida, si bien nunca llega a desaparecer la esquistosidad hercínica principal.

Una superficie de crenulación más o menos espaciada subhorizontal se superpone a la deformación hercínica principal en el área de estudio. Esta superficie es evidente también en las proximidades del granito, y las microestructuras muestran texturas formadas a altas temperaturas durante la intrusión de masas ígneas crenuladas por la misma.

Las fracturas tardihercínicas son difícilmente cartografiadas a base de estructuras menores. Sin embargo, son relativamente frecuentes «kink-bands» de plano axial vertical perpendicular a la superficie de esquistosidad hercínica vertical, además de cizallas con superficies S verticales, en que las superficies C son la esquistosidad hercínica.

Las pelitas denotan de modo especial los efectos del metamorfismo dinámico en una recristalización intensa que se traduce en fuerte orien-

tación preferente de la fábrica de la roca. En las rocas más heterogranulares, los clastos grandes sufren mosaización y extinción ondulante, resultando en disminución del tamaño de grano. La matriz recristaliza adquiriendo orientación preferente más o menos acusada. Son frecuentes los pliegues intrafoliares y los diques de cuarzo en distintas posiciones respecto a la fábrica de la roca, casi siempre mostrando acusada extinción ondulante y elongación en los granos de cuarzo.

REFERENCIAS

- ALVAREZ-NAVA, H.; GARCIA CASQUERO, J. L.; GIL TOJA, A.; HERNANDEZ URROZ, A.; LORENZO ALVAREZ, S.; LOPEZ DIAZ, F.; MIRA LOPEZ, M.; MONTERSERIN, V.; NOZAL, F.; PARDO, M. V.; PICART, J.; ROBLES, R.; SANTAMARIA, J., y SOLE, F. J. (1988): *Unidades litoestratigráficas de los materiales Precámbrico-cámbricos en la mitad suroriental de la Zona Centroibérica*. Res. Congreso Geológico de España, 1988, vol. 1, 19-22.
- ARBIN, P., y TAMAIN, G. (1973): *Les chevauchements intralucudienses de la «Ribera del Río Frio», Valdemanco del Esteras, et de «Arroyo de Tamújar», Cabezarrubias, dans le sud de la Meseta Iberique*. C. R. Acad. Sci. Paris, t. 277, 1291-1294.
- ARTHAUD, F., y MATTE, Ph. (1975): *Les Décrochements tardi-hercyniens du Sud-Ouest de l'Europe. Géométrie et essai de reconstitution des conditions de la déformation*. Tectonophysics, 25, 139-171.
- BARD, J. P. (1964): *Observaciones sobre la estratigrafía del Paleozoico en la región de Zafra (prov. de Badajoz, España)*. Not. y Com. IGME, 76, 175-180.
- BARD, J. P.; CAPDEVILA, R.; MATTE, Ph., y RIBEIRO, A. (1973): *Geotectonic model for the Iberian variscan orogen*. Nature Phys. Sci., 241, 50-52.
- BASCONES ALVIRA, L., y MARTIN HERRERO, D. (1982): *Mem. Mapa Geológico de España, escala 1:50.000, Hoja núm. 702 (San Vicente de Alcántara)*. Publ. IGME.
- BASCONES ALVIRA, L.; MARTIN HERRERO, D., y CORRETE CASTAÑON, L. G. (1982): *Mem. Mapa Geológico de España, escala 1:50.000, Hoja núm. 703 (Arroyo de la Luz)*. Publ. IGME.
- BASTIDA, F. (1981): *La esquistosidad primaria: una síntesis sobre sus características y desarrollo*. Trab. de Geol. de la Univ. de Oviedo, 11, 35-54.
- BORRADAILE, G. J. (1978): *Transected folds: A study illustrated with examples from Canada and Scotland*. Geol. Soc. of Am. Bull., 89, Apr. 1978, 481-493.
- BOUYX, E. (1970): *Contribution à l'étude des formations ante-ordoviennes de la Meseta Méridionale (Ciudad Real et Badajoz)*. Mem. Inst. Geol. Min. Esp., 73, 363 pp.
- BRASIER, M. D.; PEREJON, A., y SAN JOSE, M. A. (1979): *Discovery of an important fossiliferous Precambrian-Cambrian sequence in Spain*. Estudios Geol., 35, 379-383.
- CARRINGTON DA COSTA, J. (1950): *Noticia sobre una carta geologica de Buçaco, de Nery Delgado*. Com. Serv. Geol. Port., 28 pp.
- CASAS RUIZ, J., y SANTOS GARCIA, J. A. (1982): *Mem. Mapa Geol. de España, escala 1:50.000, Hoja núm. 726 (Pino de Valencia)*. Publ. IGME.
- CRESPO LARA, V. (1972): *La reserva del Valle de Alcadia y su contexto geológico-minero en Sierra Morena Central*. Bol. Geol. y Min., t. LXXXII-II, 174-180.
- DIEZ BALDA, M. A. (1986): *El Complejo Esquistograuváquico, las series paleozoicas y la estructura hercínica al sur de Salamanca*. Tesis Doctoral. Ed. Univ. de Salamanca, 162 pp.
- ELLIOT, D. (1968): *Interpretation of fold geometry from lineation isogonic maps*. Jr. of Geol., 76, 171-190.
- ETHERIDGE, M. A., y LEE, M. F. (1975): *Microstructure of Slate from Lady Loretta, Queensland, Australia*. Geol. Soc. of Am. Bull., 86, 13-22.
- FLEUTY, M. J. (1964): *The description of folds*. Proc. Geol. Assoc. London, 75, 461-492.
- GARCIA SANSEGUNDO, J.; LORENZO ALVAREZ, S., y ORTEGA GIRONES, E. (1987): *Mem. Mapa Geol. de España, escala 1:50.000, Hoja núm. 781 (Siruela)*. Publ. IGME.
- GHOSH, S. K., y CHATERJEE, A. (1985): *Patterns of deformed early lineations over later folds formed by buckling and flattening*. Jr. of Structural Geol., 7, núm. 6, 651-666.
- GHOSH, S. K., y SUDIPTA SENGUPTA (1987): *Progressive development of structures in a ductile shear zone*. Jr. of Structural Geol., 9, núm. 3, 277-287.
- GRAY, D. R. (1978): *Cleavages in deformed psammitic rocks from southeastern Australia: Their nature and origin*. Geol. Soc. of Amer. Bull., 89, Apr. 1978, 577-590.
- GREGG, W. J. (1985): *Microscopic deformation mechanisms associated with mica film formation in cleaved psammitic rocks*. Jr. of Struct. Geol., 7, núm. 1, 45-56.
- HERRANZ, P.; SAN JOSE, M. A., y DE VILAS, L. (1977): *Ensayo de correlación del Precámbrico de los Montes de Toledo occidentales y el Valle del Matachel*. Estudios Geológicos, 33 (4), 327-342.
- HOLEYWELL, R. C., y TULLIS, T. E. (1975): *Mineral Reorientation and Slaty Cleavage in the Martinsburg Formation, Lehigh Gap, Pennsylvania*. Geol. Soc. of Amer. Bull., 86, 1296-1304.
- JULIVERT, M.; FONTBOTE, J. M.; RIBEIRO, A., y CONDE, L. (1974): *Mapa Tectónico de la Península Ibérica y Baleares*. Publ. IGME, Mem., 113 pp., mapa E. 1:1.000.000.
- KNIFE, R. J., y WHITE, S. H. (1979): *Deformation in low grade shear zones in the Old Red Sandstone, SW Wales*. Jr. of Struct. Geol., 1, núm. 1, 53-66.
- KNIFE, R. J. (1981): *The interaction of deformation and metamorphism in slates*. Tectonophysics, 78, 249-272.
- LEFORT, J. P., y RIBEIRO, A. (1980): *La faille de Porto-Badajoz-Cordue a-t-elle contrôlé l'évolution de l'océan paleozoïque sud-armoricain?* Bull. Soc. Geol. France, 1980 (7), t. XXII, núm. 3, 455-462.
- LISTER, G. S., y SNOKE, A. W. (1984): *S-C Mylonites*. Jr. of Struct. Geol., 6, núm. 6, 617-638.
- LOPEZ PLAZA, M., y MARTINEZ CATALAN, J. (1988): *Síntesis estructural de los granitoides hercínicos del Macizo Hespérico*, en BEA, CARNICERO, GONZALO, LOPEZ PLAZA, RODRIGUEZ ALONSO (Eds.) (1988): *Geología de los granitoides y rocas asociadas del Macizo Hespérico*. Rueda, 542 pp.
- LOTZE, F. (1956): *Das Prekambriums Spaniens*. Neues Ib. Geol. Paleont., Mh., t. 8, 373-380. Traducido por J. Gómez Llarena, 1960: *El Precámbrico en España*. Not. y Com. Inst. Geol. y Min. de España, 60, 227-240.
- MARCOS, A. (1973): *Las series del Paleozoico Inferior y la estructura hercínica del occidente de Asturias (NW de España)*. Trab. Geol., núm. 6, Univ. Oviedo.
- MATTE, Ph. (1968): *La structure de la virgation hercynienne de Galice (NW de l'Espagne)*. Trav. Lab. Geol. Fac. Sc. Grenoble, 44, 1-128. In: *Geología de España. Libro Jubilar J. M. Ríos*. Publ. IGME.
- MIRA LOPEZ, M.; RODRIGUEZ PEVIDA, L. S., y ORTEGA GIRONES, E. (1987): *Mem. Mapa Geológico de España, E. 1:50.000, Hoja núm. 834 (San Benito)*. Publ. IGME.
- MITROFANOV y TIMOTEIEV (1977): En: SAN JOSE, M. A. (1983): *El complejo sedimentario pelítico-grauváquico*. En: *Geología de España, Libro Jubilar de J. M. Ríos*. Publ. IGME, 91-99.
- MORENO, F. (1977): *Tectónica y sedimentación de las Series de Tránsito (Precámbrico terminal) entre el anticlinal de Valdelacasa y el Valle de Alcadia. Ausencia de Cámbrico*. Studia Geologica, XII, 1977, 123-136.
- OEN ING SOEN (1970): *Granite intrusion, folding and metamorphism in central northern Portugal*. Bol. Geol. y Min., t. LXXXI, 2-3, 271-298.
- ORTEGA, E. (1980): *Aportaciones a la estructura geológica en los alrededores de Malpica, extremo septentrional de la Fosa Blastomilonítica, La Coruña*. Cuad. Lab. Xeol. Laxe, 1, 177-186.
- ORTEGA GIRONES, E.; HERNANDEZ URROZ, J., y GONZALEZ LODEIRO, F. (1988): *Distribución paleogeográfica y control estructural de los materiales anteordovícicos en la parte suroriental del autóctono de la Zona Centroibérica*. Res. II Congreso Español de Geología. Simp. Cinturones Orogénicos, SGE, 1988, 85-88.
- PIEREN PIDAL, A. P., y HERRANZ ARAUJO, P. (1988): *Presencia y caracterización del «Alcudiense Superior» (Vendense) en el entronque de la Serena y el Valle de Alcadia (este de la provincia de Badajoz), 1988*. Res. II Congreso Español de Geología. Simposio sobre Cinturones Orogénicos, SGE, 91-100.

- POWELL, C. Mc A.; COLE, J. P., y CUDAHY, T. J. (1985): *Megakinking in the Lachland Fold Belt, Australia*. Jr. of Struct. Geol., 7, núm. 3-4, 281-300.
- RAMSAY, J. G., y HUBER, M. I. (1987): *The Techniques of Modern Structural Geology*. Academic Press, 700 pp.
- RIBEIRO, A. (1974): *Contribution a l'étude tectonique de Tras-os-Montes Oriental*. Serv. Geol. de Port. Mem., 24 (Nova Serie), 1, 168 pp.
- ROBERTS, J. L. (1974): *The structure of the Dalradian rocks in the SW Highlands of Scotland*. J. Geol. Soc. London, 113, 361-392.
- RODA QUEROL, J. (1986): *Nuevos datos sobre la deformación sárdica. Geometría de los pliegues pre-hercínicos del río Salor (Cáceres)*. Geogaceta, núm. 1, Dic. 1986, 13-15.
- ROMAO, J. M. (1991): *Litostratigrafía e tectónica do CXG entre a serra do Moradal e o Rio Erges*. Res. XI Reunión sobre la Geología del Oeste Peninsular, Huelva, 11-12 Marzo 1991.
- SAN JOSE, M. A. (1983): *El Complejo sedimentario pelítico-grauváquico*. En: *Geología de España, Libro Jubilar de J. M. Ríos*. Publ. IGME, 91-99.
- SANDERSON, D. J.; ANDREWS, J. R.; PHILLIPS, W. E. A., y HUTTON, D. H. W. (1980): *Deformation studies in the Irish Caledonides*. Jr. Geol. Soc. London, 137, 289-302.
- SANDERSON, D. J. (1990): *In Development of new multi-disciplinary techniques for mineral exploration in several areas of the western iberian peninsula*. Informe final contr. núm. MA1M-0032-C(A), Comisión de las Com. Eur. Dir. Gen. for Sci., Res. and Develop., Dir. G, Raw Mat. and Adv. Mat.
- SANTOS GARCIA, J. A., y CASAS RUIZ, J. (1982): *Mem. Mapa Geol. de España, escala 1:50.000, Hoja núm. 701 (Valencia de Alcántara)*. Publ. IGME.
- SIBSON, R. H. (1977): *Fault rocks and fault mechanisms*. Jr. Geol. Soc. of London, 133, 191-213.
- SIDDANS, A. W. B. (1972): *Slaty Cleavage - A Review of research since 1815*. Earth Science Reviews, 205-232.
- SPRY, A. (1969): *Metamorphic Textures*. Pergamon Press, 352 pp.
- STRINGER, P. (1975): *Acadian slaty cleavage non coplanar with fold axial surfaces in the Northern Appalachians*. Can. Jr. Earth Sci., 12, 949-961.
- TAMAIN, G. (1975): *El Alcuense y la orogénesis Cado-niense en el sur de la Meseta Ibérica (España)*. I Cent. R. Soc. Esp. Hist. Nat., 1, 437-464.
- TURNER, F. J., y WEISS, L. E. (1963): *Structural Analysis of Metamorphic Tectonites*. McGraw-Hill Book Co., 545 pp.
- VEGAS, R. (1978): *Sedimentation and Tectonism in the Iberian massif prior to the Hercynian deformation (Late Precambrian to Silurian times)*. In: *Geología de la parte norte del Macizo Ibérico*, vol. 1, *Homenaje I. Parga Pondal*. Edic. del Castro, La Coruña, 271-286.
- WILLIAMS, P. F. (1972): *Development of metamorphic layering and cleavage in low grade metamorphic rocks at Bermagui, Australia*. Am. Jr. of Science, 272, Jan. 1972, 1-47.
- WILLIAMS, P. S. (1985): *Multiply deformed terrains - problems of correlation*. Jr. of Struct. Geol., 7, núm. 3-4, 264-280.

Original recibido: Octubre de 1991.
Original aceptado: Noviembre de 1991.

El programa DHH como apoyo a los estudios de subsidencia minera.

Por J. GOMEZ DE LAS HERAS (*), A. OCHOA BRETON (*) y S. FALCON DE ANDRES (**)

R E S U M E N

En los estudios de subsidencia minera es necesario conocer los parámetros que rigen el modelo de simulación empleado, para adaptar en lo posible la cubeta teórica calculada con la cubeta real de hundimiento a producirse. La instalación en el terreno de hitos topográficos y el control de sus movimientos mediante mediciones, permiten obtener los datos requeridos para llegar a determinar o ajustar los citados parámetros.

El programa DHH cumple el objetivo de un tratamiento racional de la información proporcionada en los trabajos de control de los hitos, creando un conjunto de datos con los que puede operarse fácilmente para la obtención, a partir de los distintos itinerarios, tanto de los hundimientos como de las deformaciones horizontales unitarias del terreno.

Palabras clave: Subsidencia, Funciones de influencia, Cubeta de hundimiento, Parámetros, Hitos topográficos, Deformaciones horizontales, Hundimientos, Coordenadas.

R E S U M E

Dans les études sur subsidence minière, il faut connaître les paramètres qui conforment le modèle de simulation employé, pour adapter, tant que possible, le bassin théorique calculé avec le bassin réel d'effondrement qui va se produire. L'installation sur le terrain des bornes topographiques et le contrôle de leurs mouvements, au moyen de mesurages, permettent d'obtenir les données nécessaires pour déterminer ou ajuster les mentionnés paramètres.

Le programme DHH atteint à l'objectif d'un traitement rationnel de l'information fournie par les travaux de contrôle des bornes, en constituant un ensemble de données avec lesquelles, à partir des différents itinéraires, il est possible d'obtenir facilement, tant les effondrements que les déformations horizontales unitaires du terrain.

Mots clé: Subsidence, Fonctions d'influence, Bassin d'effondrement, Paramètres, Bornes topographiques, Déformations horizontales, Effondrements, Coordonnées.

INTRODUCCION

El Instituto Tecnológico Geominero de España (ITGE) lleva realizando, desde hace más de dos años, estudios de subsidencia minera en la Cuenca Carbonífera Central Asturiana, así como informes semestrales sobre la evolución de los hundimientos y deformaciones horizontales del terreno afectado.

El método de cálculo utilizado para estos estu-

(*) Instituto Tecnológico Geominero de España. Area de Seguridad Minera.

(**) Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid.

dios es uno teórico-experimental basado en las Funciones de Influencia, que como ya es conocido modeliza la cubeta de hundimiento como resultado de la superposición de las cubetas asociadas a partes infinitesimales del área de extracción. Ultimamente y como resultado del Convenio de colaboración técnica existente entre el ITGE, Area de Seguridad Minera, y la Universidad de Oviedo, Departamento de Explotación y Prospección de Minas, se ha desarrollado el programa de cálculo denominado ITGESUB, que ya, plenamente operativo, se ha venido usando en los últimos estudios de subsidencia realizados.

El método de la simulación de la subsidencia utilizado exige una determinación o ajuste de los parámetros internos, normalmente tres, que controlan la Función de Influencia elegida, para adaptar o acomodar en lo posible la cubeta teórica que se calcula con la cubeta real de hundimiento a producirse.

Este ajuste paramétrico es posible hacerlo cuando se tienen datos experimentales del punto o zona de trabajo, los que normalmente se adquieren a través de mediciones en superficie, haciendo uso del control de hitos topográficos, estratégicamente situados.

FINALIDAD DEL PROGRAMA DHH

El programa DHH (Deformaciones horizontales unitarias y hundimientos) ha sido desarrollado por el Area de Seguridad Minera del ITGE con la colaboración del Departamento de Matemática Aplicada y Métodos Informáticos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid.

Su objetivo es el tratamiento de la información facilitada en los trabajos de control periódicos de los hitos topográficos, implantados en las zonas sujetas a movimientos de subsidencia minera. En estos trabajos se controlan tanto los movimientos verticales mediante las operaciones de nivelación (determinación de cotas) como los horizontales por medio de los itinerarios de planimetría (cálculo de coordenadas horizontales).

Con los datos de las cotas y coordenadas (generalmente UTM) de los distintos hitos, determinados sistemáticamente en los trabajos de control de los mismos, se calculan en el Programa para cada itinerario sus hundimientos en mm, así como las deformaciones horizontales del terreno en mm/m, asignadas a cada hito, partiendo de las cotas y coordenadas en su posición original y en sus posiciones desplazadas.

El método seguido en el programa DHH para el cálculo, de una forma sencilla y aproximada, de las deformaciones horizontales, asigna a cada hito una deformación del terreno, que viene asumida como la media ponderada de las deformaciones relativas entre un hito y los tres hitos

más cercanos. Como valor de ponderación se toma la inversa de la distancia a cada hito y como condiciones de borde se considera con deformaciones nulas los doce puntos internamente seleccionados de la ventana de trabajo. La bondad de los resultados dependerá del número de hitos implantados y de su distribución en la zona.

Para la representación gráfica de los resultados (isolíneas de hundimiento de la cubeta real e isolíneas de deformación unitaria del terreno) el DHH utiliza como auxiliar el programa SURFER de Golden Software, Inc.

ESTRUCTURA DEL PROGRAMA DHH

Básicamente, el programa DHH está dividido en dos módulos (fig. 1): Módulo de INICIACION y Módulo de CALCULO. El primero se utiliza cada vez que se desee iniciar el tratamiento de un problema de subsidencia concreto o se desee modificar las condiciones iniciales de un problema ya existente. El segundo, que constituye el fondo del programa, se utiliza para el estudio de cada uno de los estadios del problema (evolución de la cubeta real en los distintos itinerarios).

Ambos módulos tienen un entorno de trabajo muy similar y sencillo de manejar, así como opciones de comprobación y modificación de los datos introducidos, tanto por teclado como por archivo.

Cada problema de subsidencia llevará asociado un nombre (MINA en el ejemplo) que identificará todos los archivos relacionados con dicho problema. Las distintas extensiones creadas por DHH son:

- MINA. DO .. Datos iniciales del problema.
- MINA. TOP.. Posición topográfica inicial de los hitos (coordenadas X, Y, Z).
- MINA.T?? ... Posición topográfica de hitos desplazados, en el itinerario ?? (número del itinerario).
- MINA.D??.. Deformaciones horizontales unitarias del terreno, asignadas a los hitos, en el itinerario ??.
- MINA H??.. Hundimientos de hitos en el itinerario ??.

- MINA I?? ... Informe de resultados en el itinerario ??
- MINA N?? .. Numeración de los hitos en el itinerario ??

EL MODULO DE INICIACION

En el Módulo de Iniciación (fig. 2), una vez intro-

ducido el nombre asociado al problema el Programa busca si existe un archivo inicial con ese nombre y extensión .DO (es decir, MINA.DO); si no lo encuentra pasará a la creación de dicho fichero y a la fase de introducción de datos (el caso de existencia de fichero se trata más adelante).

Los siguientes datos a introducir, los límites de

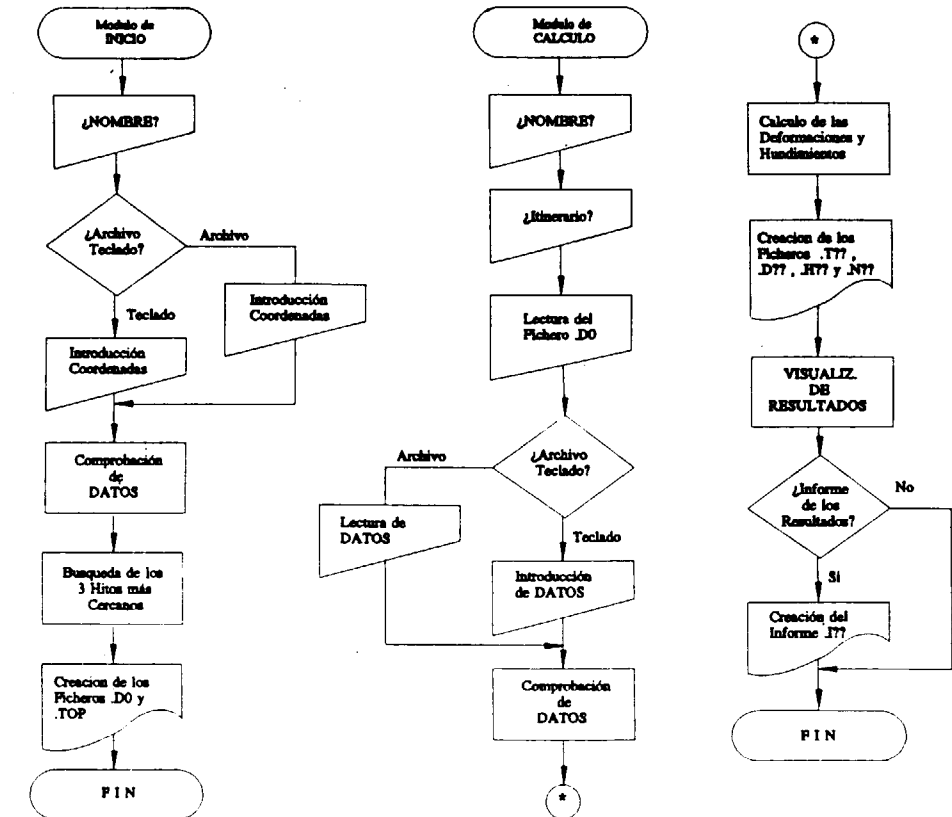


Figura 1.—Algoritmo de los Módulos de Iniciación y Cálculo.

ITGE/DNAMI	DEFORM. HORIZONTALES Y HUNDIMIENTOS	MODULO DE INICIACION
¿ NOMBRE ASOCIADO AL PROBLEMA ? MINA		
COORDENADAS DEL PLANO: (Se considerará como contorno del problema)		
X DE LA ESQUINA INFERIOR IZQUIERDA : 273500		
Y DE LA ESQUINA INFERIOR IZQUIERDA : 4786000		
X DE LA ESQUINA SUPERIOR DERECHA : 275000		
Y DE LA ESQUINA SUPERIOR DERECHA : 4787250		
BASE PARA X : 270000		
BASE PARA Y : 4786000		
BASE PARA Z : 0		

Figura 2.—Datos iniciales.

la ventana de trabajo, tienen una gran importancia ya que en los bordes del plano que define, se considerarán desplazamientos y deformaciones nulas. Una elección de ventana demasiado cerrada afectará a los hitos cercanos al borde, ya que tendrán una deformación muy influida por su proximidad al mismo (deformaciones nulas), mientras que la elección de una ventana más abierta puede originar el problema inverso, que la zona de deformaciones sea más amplia que la real. Será de gran interés, como ayuda a esta elección, considerar la zona de influencia de la cubeta determinada en el estudio de subsidencia.

Los parámetros que se solicitan como «bases para X, Y, Z», tienen un significado más bien de índole práctica que técnica, ya que son parámetros que se desglosan del valor de las coordenadas como partes sumatorias constantes, con la finalidad de facilitar la introducción de los datos. En el caso de que la asignación de una base vaya a complicar la introducción de los datos, se le puede dar el valor 0 e introducir las coordenadas completas.

A continuación se introducen el número de hitos de trabajo y las coordenadas (X, Y, Z) de los mismos, dibujándose automáticamente en la pantalla la posición de cada uno de ellos, para permitir una primera verificación de la entrada de datos (fig. 3).

Una vez introducidas todas las coordenadas se pasa a la comprobación de los datos, en primer lugar de los datos de contorno y posteriormente de todas las coordenadas de los hitos (fig. 4).

Una vez comprobados todos los datos, el Módulo de Iniciación hace una «Organización» de los hitos, que consiste en asignar a cada hito tres números, los cuales corresponden a la nu-

meración de los tres hitos más cercanos y que será base de cálculo en el siguiente módulo.

Si al entrar en el Módulo de Iniciación (fig. 3) e introducir un nombre existe un fichero con dicho nombre y extensión .DO, el programa avisa de la existencia de dicho archivo y pregunta qué hacer con él: Modificar o Sobrecribir. La opción Modificar (M) leerá el archivo antiguo y pasará a la fase de comprobación, ya tratada y que permitirá, si se requiere, la modificación de las coordenadas de uno o varios hitos o los límites de la ventana (fig. 4). La opción Sobrecribir (S) ignorará la existencia del antiguo fichero y lo iniciará como si fuera nuevo.

EL MODULO DE CALCULO

El Módulo de Cálculo, partiendo de los datos iniciales del fichero .DO (MINA.DO), y con los datos de las nuevas coordenadas de los hitos en el correspondiente itinerario, calcula las deformaciones horizontales unitarias y los hundimientos.

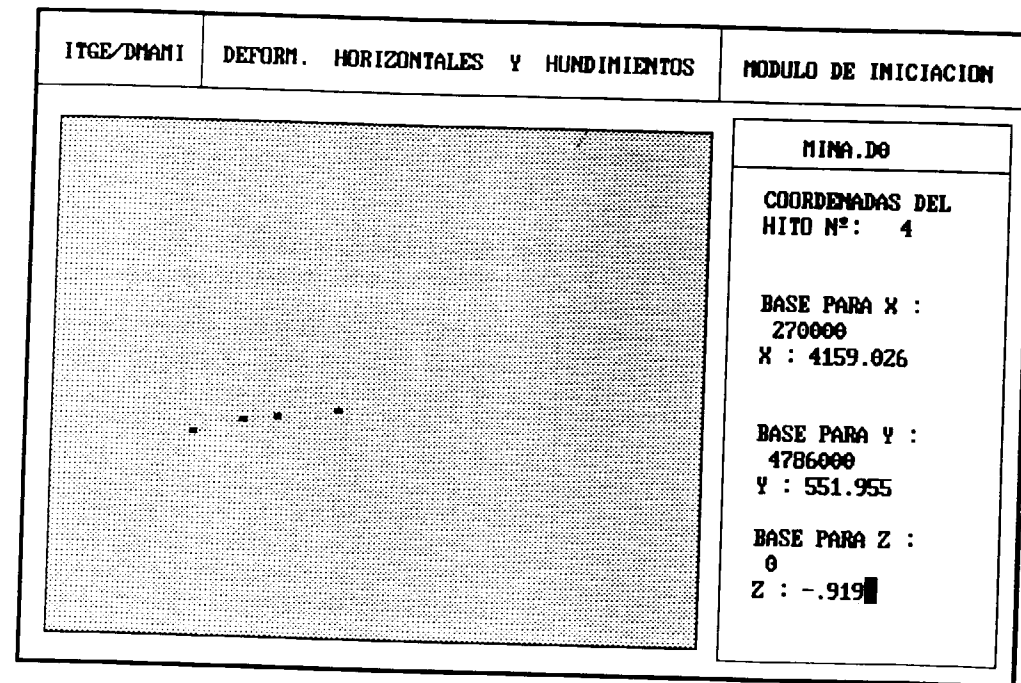


Figura 3.—Introducción de las coordenadas.

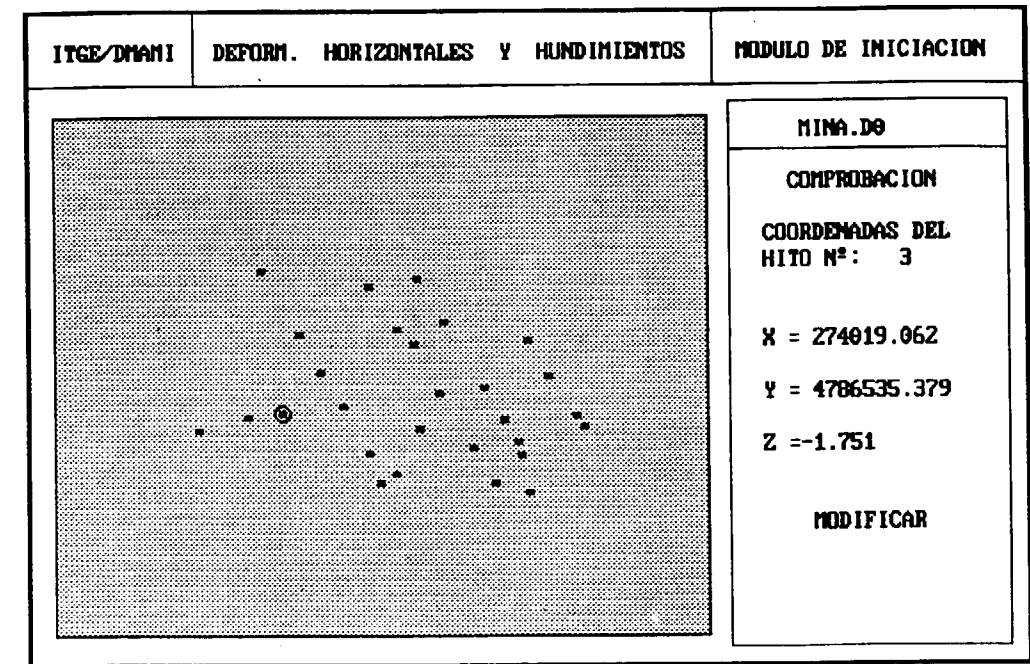


Figura 4.—Modificación de las coordenadas.

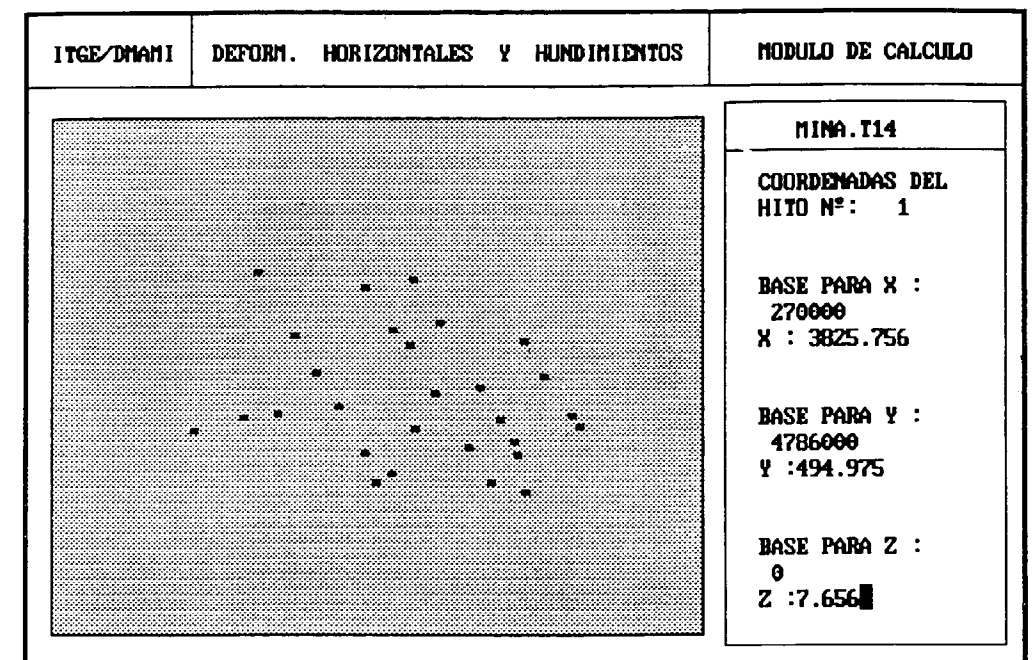


Figura 5.—Introducción de las nuevas coordenadas.

El primer dato requerido es el nombre asociado al problema, y a continuación el número del itinerario en cuestión. Al igual que en el Módulo de Iniciación se creará un fichero de nombre el asignado y extensión .T?? (Topografía), siendo ?? el número del itinerario.

Del mismo modo que en el Módulo de Iniciación, si existe un fichero con dicho nombre y la misma extensión .T??, el programa avisa de la existencia de dicho archivo y pregunta qué hacer con él: Modificar o Sobre escribir. A continua-

ción se introducen las coordenadas de los hitos en dicho itinerario de la misma forma que en el módulo anterior (fig. 5).

Una vez introducidas las coordenadas se pasa a una fase de comprobación de datos similar a las anteriores. En pantalla aparece dibujado cada hito con su vector desplazamiento (fig. 6).

Después de comprobados todos los hitos el programa calcula las deformaciones horizontales y hundimientos en cada hito, mostrándose los resultados en pantalla (fig. 7). Las deforma-

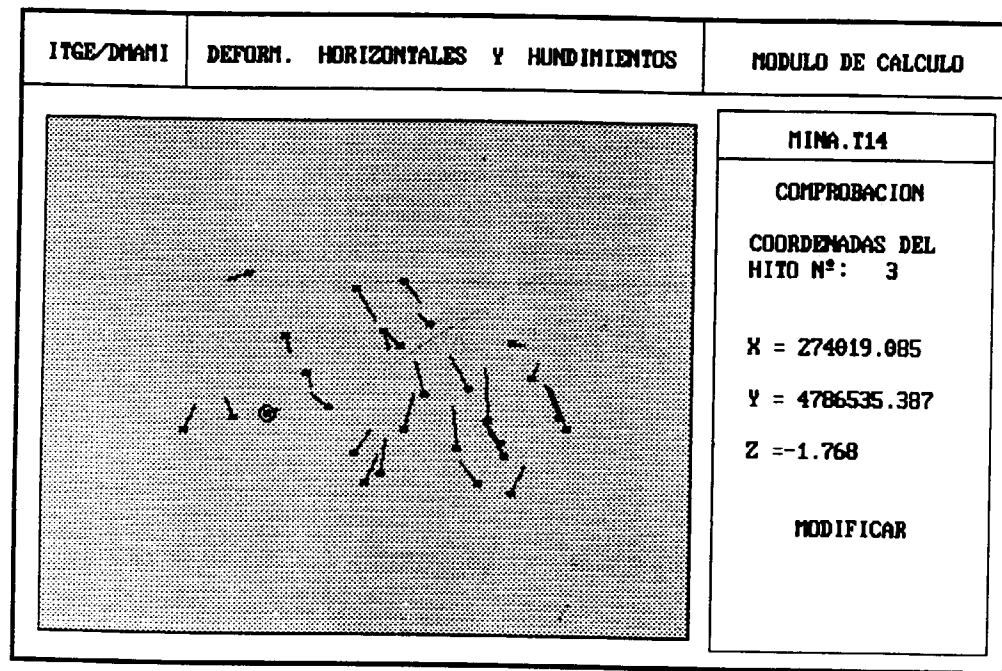


Figura 6.—Comprobación de las nuevas coordenadas.

nes negativas corresponden a esfuerzos de compresión y las positivas a los de tracción.

Para una mayor claridad, el programa determina tres niveles de deformación entre la máxima y la mínima, en valores absolutos, y se le asigna un color a cada hito dependiendo de la magnitud de la deformación.

Verde..... Entre 0 y 1/3 de la deformación máxima.

Amarillo... Entre 1/3 y 2/3 de la deformación máxima.

Rojo..... Entre 2/3 y 1/1 de la deformación máxima.

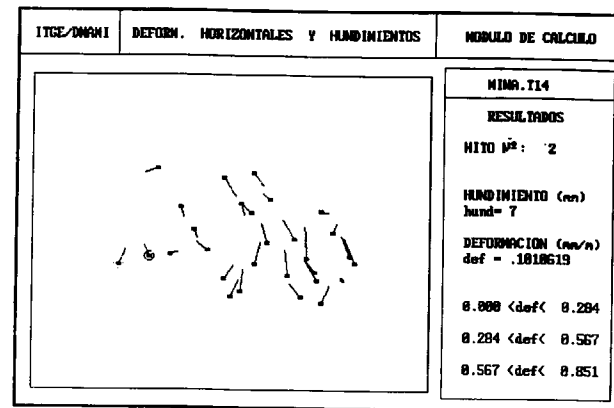


Figura 7.—Resultados.

Todos estos archivos son exportables a múltiples programas de gráficos, en concreto al programa SURFER, como ya se ha indicado antes, para la obtención de curvas de isodeformación y curvas de isohundimiento (figs. 8 y 9).

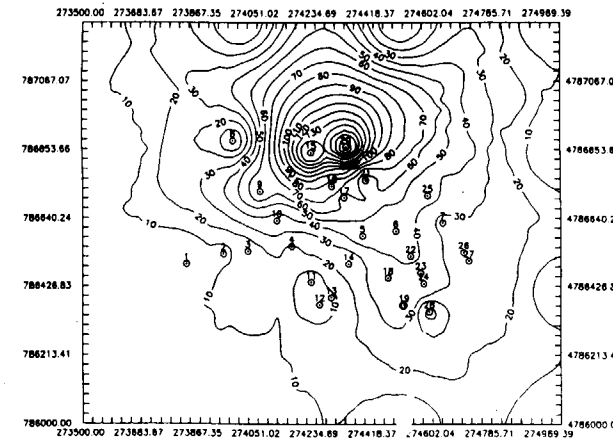


Figura 8.—Curvas de isohundimiento.

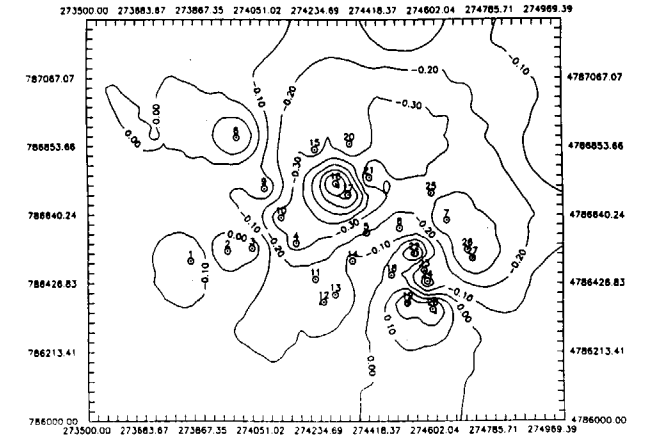


Figura 9.—Curvas de isodeformación.

Además de visualizar todas las deformaciones se puede obtener un informe de los resultados. Dicho informe se introduce en un fichero con el mismo nombre y extensión .I?? (MINA.I14). Este informe se puede obtener por impresora (fig. 10).

INFORME DEL ESTUDIO DE SUBSIDIENCIA : MINA
 ITINERARIO : 14 (nivelac.) y 11 (planimetr.)
 FECHA : 1-7-1992
 NOMBRE : ITGE

COORDENADAS DE LA VENTANA :

ESQUINA INFERIOR IZQUIERDA :
 X = 273500. Y = 4786000

ESQUINA SUPERIOR DERECHA :
 X = 275000 Y = 4787250

COORDENADAS INICIALES DE LOS HITOS

NO. HITO	COORD. X	COORD. Y	COORD. Z
1	273825.734	4786494.929	7.656
2	273941.279	4786526.478	-2.304
3	274019.062	4786535.379	-1.751
4	274159.026	4786551.955	-9.19
5	274382.051	4786584.391	8.96
6	274487.18	4786599.521	27.237
7	274635.453	4786624.671	56.24
8	273973.923	4786880.304	41.379
9	274059.11	4786723.218	-1.908
10	274111.554	4786632.237	-1.004
11	274219.72	4786439.287	40.503
12	274245.724	4786368.705	78.031
13	274282.821	4786391.401	48.164
14	274337.299	4786496.216	9.88
15	274221.458	4786843.686	102.51
16	274286.098	4786739.285	46.967
17	274324.75	4786703.749	33.18
18	274461.17	4786452.08	1.849
19	274512.705	4786366.328	3.817
20	274331.849	4786861.626	137.512
21	274393.038	4786757.954	85.085
22	274533.64	4786519.633	12.392
23	274565.008	4786466.796	12.962
24	274574.597	4786433.546	9.729
25	274588.336	4786709.171	83.595
26	274699.997	4786531.032	59.58
27	274715.711	4786504.558	55.81
28	274591.907	4786345.676	6.51

COORDENADAS DE LOS HITOS EN EL ITINERARIO 14

NO. HITO	COORD. X	COORD. Y	COORD. Z
1	273825.756	4786494.975	7.656
2	273941.264	4786526.515	-2.311
3	274019.085	4786535.387	-1.768
4	274158.995	4786551.981	-9.938
5	274382.035	4786584.451	8.852
6	274487.146	4786599.583	27.187
7	274635.463	4786624.701	56.213
8	273973.886	4786880.289	41.377

9	274059.118	4786723.186	-1.975
10	274111.56	4786632.215	-1.041
11	274219.751	4786439.332	40.499
12	274245.748	4786368.757	78.026
13	274282.829	4786391.469	48.155
14	274337.316	4786496.286	9.858
15	274221.493	4786843.622	102.355
16	274286.106	4786739.247	46.889
17	274324.718	4786703.778	33.126
18	274461.163	4786452.16	1.811
19	274512.67	4786366.373	3.775
20	274331.879	4786861.584	137.327
21	274393.019	4786757.972	85.033
22	274533.633	4786519.737	12.348
23	274564.975	4786466.838	12.93
24	274574.559	4786433.61	9.689
25	274588.359	4786709.168	83.552
26	274699.971	4786531.096	59.558
27	274715.679	4786504.636	55.785
28	274591.929	4786345.73	6.506

HUNDIMIENTOS Y DEFORMACIONES HORIZONTALES
 PRODUCIDOS EN EL ITINERARIO 14

NO. HITO	HUNDIMIENTO (mm)	DEF. HORIZ. (mm/m)
1	0	-1.970248
2	7	-1.010619
3	17	4.264105E-02
4	19	-3.407032
5	44	-1.917311
6	50	-1.716274
7	27	-4.042062
8	2	2.079097
9	67	-4.337775E-02
10	37	-3.484174
11	4	-1.763665
12	5	-0.92817
13	9	-1.703455
14	22	-8.059691E-02
15	155	-2.763193
16	78	-8.509516
17	54	-7.325683
18	38	1.349211E-02
19	42	3.282067
20	185	-2.073594
21	52	-2.167226
22	44	-2.78321
23	32	-2.01489
24	40	-2.883241
25	43	-2.981773
26	22	-3.955285
27	25	-4.048974
28	4	3.364863

Figura 10.—Información de datos iniciales y resultados.

UTILIZACION DE RESULTADOS

A través del tratamiento de la información suministrada en los trabajos de control de los hitos topográficos, el programa DHH permite sistematizar tanto la obtención de las deformaciones horizontales unitarias como los hundimientos reales del terreno en la zona de estudio de la subsidencia minera, creando un conjunto de datos con los que se puede trabajar de una manera sencilla y cómoda.

Ello, no sólo servirá para vigilar la evolución de la cubeta real de hundimiento, sino que permitirá también efectuar sobre la marcha los ajustes paramétricos correctores necesarios de la Función de Influencia, para que la cubeta teórica analizada refleje lo más fielmente posible la cubeta que se produce. También, en última ins-

tancia, a la finalización de los trabajos de explotación y posterior estabilización de movimientos del terreno, se podrá hacer un ajuste final del programa de subsidencia desarrollado, al margen de los posibles movimientos residuales, que en cualquier caso serán de pequeña magnitud.

Este ajuste final irá asociado a una determinación más cierta de los parámetros internos del programa de subsidencia, permitiendo en el futuro una base de partida sólida para su aplicación en nuevos trabajos, en zonas cuyas características geológicas generales del yacimiento sean similares a las ya estudiadas. Es necesario hacer observar, finalmente, que la posible existencia de singularidades geológico-estructurales exigiría una interpretación especial en cada caso.

Original recibido: Noviembre de 1992.

Original aceptado: Diciembre de 1992.

MINIPROGRAMAS (IV)

Acuíferos Costeros

Por A. NAVARRO ALVARGONZALEZ (*)

RESUMEN

Se ofrece un programa breve y simplificado para la modelización de acuíferos costeros con el método de diferencias finitas, mallas cuadradas e interfase abrupta. Se explican las ventajas y limitaciones del método, la base matemática del programa y su desarrollo informático. Se da un ejemplo de aplicación en diferentes condiciones.

Se aclaran puntos que no se suelen detallar en la literatura corriente sobre el tema: Condiciones y flujos de borde, asignación de recargas, extracciones y sobre todo circulación de flujos subterráneos y balances de masas global y pormenorizado en tiempo y unidades espaciales.

Palabras clave: Acuífero costero, Modelo matemático, Diferencias finitas, Interfase abrupta, Piezometría, Balance de masas.

ABSTRACT

A simple and straightforward program for coastal aquifer modeling is presented. Finite difference methodology is described, with regular cell network and sharp interface. Detailed explanations are given about mathematical basis and computer code. Examples are offered, under diverse conditions.

The paper gives details on subjects that are not clearly spelled in available technical literature: transient or steady-state flow, boundary conditions, location of interface, recharge/abstraction, groundwater flow movement and global mass balances.

Key words: Coastal aquifer, Mathematical model, Finite differences, Sharp interface, Piezometry, Local mass balance, Global mass balance.

1. INTRODUCCION

Utilizando una metodología similar a las anteriormente descritas para diferencias finitas, también pueden tratarse, en primera aproximación, acuíferos costeros. Esto se puede hacer considerando el agua dulce y el agua salada como dos fases diferentes, separadas por una interfase.

Un tratamiento matemático estricto es muy complejo, porque la superficie de separación entre ambas fases no es una lámina, sino un cuerpo donde el agua pasa gradualmente de dulce a salada. En puro rigor, existe un movimiento de la masa de agua dulce, y también un movimiento de la masa de agua salada, y hay un aporte de

agua dulce, en el cuerpo entre ambas o interfase, que se va mezclando con agua salada. Son por tanto dos masas fluidas en movimiento y además hay un intercambio de masas entre ellas. La situación real se parece a la que representan las figuras 1a y 1b, tomadas de experiencias antiguas realizadas en Biscayne Bay (Florida).

Habría que resolver cuatro sistemas simultáneos de ecuaciones:

Un conjunto de ecuaciones de continuidad para la fase de agua dulce.

Un conjunto de ecuaciones de continuidad para la fase de agua salada.

Un conjunto con una ley de variación en la interfase.

(*) Instituto Tecnológico Geominero de España.

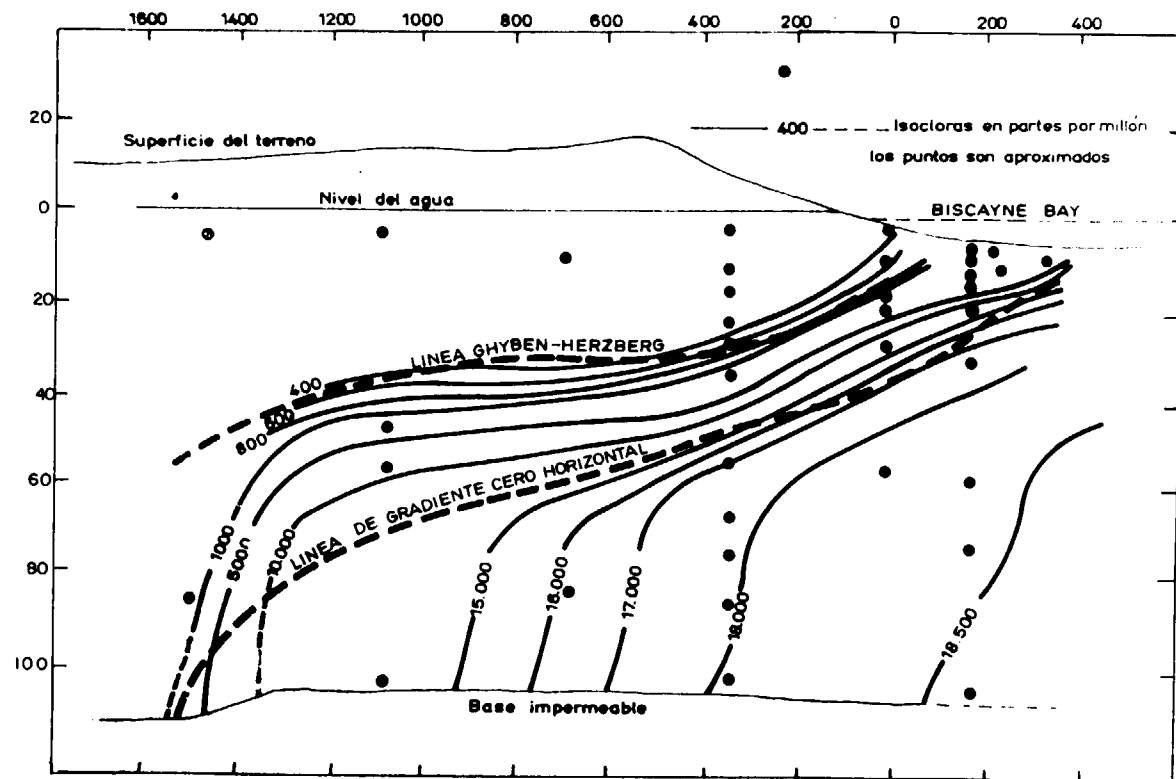


Figura 1 A.

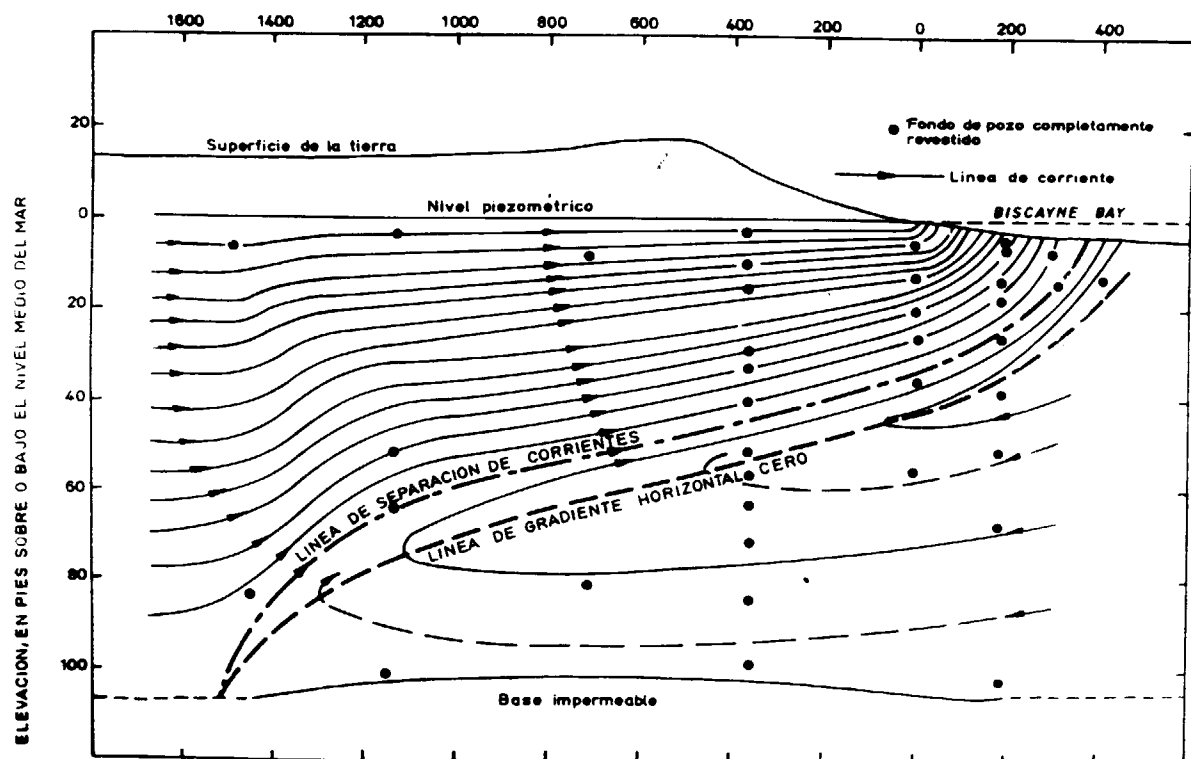


Figura 1 B.

Un conjunto relacionando los espesores de las fases dulce y salada a la geometría del acuífero.

Estos programas existen, pero resultan demasiado sofisticados para el modelado simple, en la mayoría de los casos. Los movimientos del agua salada son muy pequeños, y, en relación con ellos, las diferencias piezométricas en el agua salada son también muy pequeñas y pueden ignorarse con poco error.

2. MATEMATICAS

El esquema más usado, y el que aquí se va a describir se basa en la ley de Ghiben-Hertzberg, y resulta una aproximación más que suficiente para los casos históricos corrientes.

La formulación matemática se basa en el principio de Arquímedes de que todo cuerpo sumergido o flotante experimenta un empuje vertical igual al peso del agua (salada en este caso) que desaloja. Aquí el cuerpo sumergido o flotante es la masa de agua dulce. No se consideran movimientos o flujos de agua dentro de ninguna de las dos fases, por lo que la formulación es puramente «estática». Y tampoco se considera mezcla o intercambio entre las dos fases, de forma que la superficie de separación entre ambas es abrupta, geoméricamente una superficie en dos dimensiones, sin interzona de mezcla.

En ese sentido se establece una relación entre la piezometría del agua dulce en un punto del acuífero, y el espesor de acuífero saturado, en ese mismo punto, sobre el agua salada que se supone subyacente. La relación se basa en las diferentes densidades (pesos/unidad de volumen) entre el agua dulce y el agua salada.

Llamemos GAFRE a la densidad del agua dulce y GASAL a la del agua salada. El agua salada es más pesada que el agua dulce de forma que $GASAL > GAFRE$.

Si la altura piezométrica o altura de agua dulce sobre el nivel del mar en un punto es «h1», por metro cuadrado de superficie hay un prisma de agua de dimensiones $1 \times h1$ y peso $(1 \times h1 \times GAFRE)$, entre los niveles cero (mar) y «h1». Ese peso ha de estar compensado por el empuje vertical de un prisma de metro cuadrado de sección y altura $h2$, « $1 \times h2 \times (GASAL - GAFRE)$ », de manera que se puede escribir:

$$h2 \times (GASAL - GAFRE) = h1 \times GAFRE \quad [1]$$

es decir,

$$H = \text{espesor total del acuífero dulce} = h1 + h2 \quad [2]$$

$$H = h1 + h1 \times GAFRE / (GASAL - GAFRE) = h1 \times (1 + GAFRE / (GASAL - GAFRE)) \quad [3]$$

Generalmente se usa GAFRE igual a 1, como densidad del agua dulce, y como densidad del agua salada se usa con frecuencia el valor de 1.025. Con estos valores se tiene:

$$H = h1 \times (1 + 1/0.025) = h1 \times (1 + 40) = h1 \times 41 \quad [4]$$

Este es el modelo iceberg, utilizado por Ghiben-Hertzberg, que se usa generalmente como simplificación («thumb rule») en las primeras aproximaciones de los modelos de interfase agua dulce-agua salada. En resumen se expresa así: En un punto de un acuífero costero con agua dulce sobre agua salada, la profundidad de la interfase agua dulce-agua salada es cuarenta veces la cota piezométrica del punto en cuestión.

Los científicos estrictos pueden argüir contra tamaña generalización. En primer lugar, la densidad del agua salada no es siempre la dicha, y efectivamente, en ciertos climas o mares interiores puede ser muy superior, y la fórmula [4] no ser aplicable, aunque sí la [3]. Además, estamos hablando de condiciones estáticas, cualquier movimiento importante puede invalidar la hipótesis del «iceberg», en particular los ciclos violentos y discontinuos de extracción de agua subterránea en pozos costeros, o las mareas, si son amplias, etc.

Todo ello no hace menos cierto el hecho de que esta fórmula es MUY SIMPLE de aplicar, y que en los casos reales, los datos conocidos son tan escasos que al introducir nuevos parámetros en la fórmula de la interfase, el remedio suele ser peor que la enfermedad. Por otro lado, la relación

$$1 \text{ en superficie equiv. } 40 \text{ en profundidad} \quad [5]$$

se aproxima mucho a la verdad en muchos casos reales. El autor ha podido comprobar que el or-

den de magnitud de [5] se cumple en condiciones tan diversas como:

- En acuíferos de islas de coral (Bahamas), absolutamente llenos de agujeros y permeabilidades enormes, donde la piezometría apenas alcanzaba en el interior de la isla de 30 a 80 centímetros, y las perforaciones encontraban agua salada entre los 10 y 30 metros.
- En acuíferos porosos de baja permeabilidad en islas de sedimentos terciarios (Zanzíbar) con piezometrías en el interior del orden de los 10 metros e interfases, abajo en las perforaciones en los 400 metros.

Aceptada esta o una parecida relación entre la piezometría y la profundidad de la interfase, el modelo simple que se usa aquí es el de diferencias finitas y malla cuadrada uniforme, modelo que ya ha sido exhaustivamente descrito en otros artículos anteriores de esta serie.

Recordemos que con una u otra denominación se utilizaba el siguiente sistema de ecuaciones de diferencias finitas:

$$(h_i - h_b) \times T_{b,i} + Q_b = A_b \cdot S_b \cdot \frac{(h_b^{t+dt} - h_b^t)}{dt} \quad [6]$$

donde (fig. 2)

A_b = Área de cada celda (área asociada al nudo «b»).

$T_{b,i}$ = Transmisividad entre los nudos «i» y «b».

S_b = Coeficiente de almacenamiento del prisma de acuífero asociado al nudo «b».

Q_b = Recarga/descarga en la celda asociada al nudo «b» en la unidad de tiempo.

h_b^t = Piezometría en el nudo «b» en el tiempo «t» (medido en unidades de tiempo).

dt = Intervalo de tiempo en el que se divide la unidad de tiempo.

La ecuación general [6] viene simplificada por haber tomado una malla cuadrada uniforme. En conjunto se aplica la misma metodología que la desarrollada y explicada más extensamente en el artículo MINIPROGRAMAS II, al que puede referirse el lector interesado.

Sin embargo, ahora el sistema [6] no es en prin-

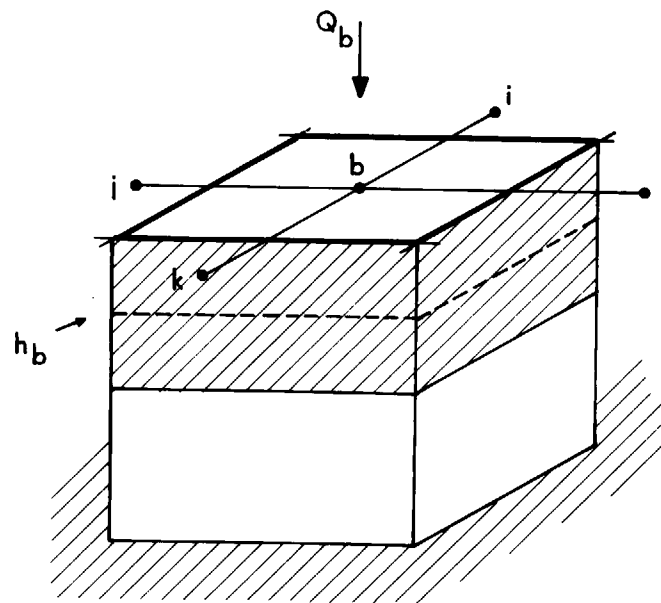


Figura 2.

cipio lineal en «h1» ya que el espesor de agua dulce «H», y por lo tanto la transmisividad en la porción del acuífero con agua dulce son también funciones de «h1», como hemos visto en [4].

Para cada intervalo de tiempo dt hay un sistema de «N» ecuaciones [6], de segundo grado en «h», es decir, en los niveles piezométricos al final del intervalo de tiempo. En teoría, conocidos los valores de todos los otros términos que intervienen en [6] y conocido el valor del intervalo de tiempo elegido, « dt », y la piezometría inicial, « h_b^t », el sistema puede resolverse y obtener las piezometrías « h_b^{t+dt} » al final del intervalo de tiempo elegido.

Sin embargo, la resolución de un sistema de ecuaciones de segundo grado resulta excesivamente engorroso y complicado. Se adopta en cambio, una simplificación similar al tratamiento que se daba en los otros modelos explicados en MINIPROGRAMAS II y III para acuíferos libres o freáticos, en los que también variaba el espesor saturado en función del tiempo. El criterio adoptado es el mismo: En el sistema para calcular la piezometría «h» se estiman los espesores utilizando los valores correspondientes de piezometría del intervalo de tiempo anterior. El error o desviación resulta así, si el intervalo de tiempo

conlleve variaciones piezométricas pequeñas, de un infinitésimo de segundo grado en la ecuación diferencial, y en la de diferencias finitas. Afortunadamente, las variaciones de piezometría en los acuíferos son lo suficientemente lentas para poder elegir intervalos de tiempo de dimensiones pequeñas tales que se mantenga la veracidad de las hipótesis del sistema de ecuaciones.

Recopilando, las simplificaciones introducidas, que generalmente NO invalidan el modelo, son:

- La interfase entre agua dulce y salada es abrupta.
- La interfase se encuentra a una profundidad tal que el peso de agua dulce por arriba del nivel del mar es igual al exceso de peso de la columna de agua salada desplazada sobre la de agua dulce que ocupa el sitio.
- No hay movimiento de agua salada.
- El agua dulce se mueve según la Ley de Darcy, desde los niveles de piezometría más alta hacia el mar, donde descarga y desaparece del acuífero en un borde de espesor prácticamente nulo (gradiente hídrico prácticamente vertical).
- El sistema de ecuaciones [6] se resuelve para cada intervalo de tiempo, y los valores hallados de piezometría se usan como valores iniciales para el intervalo siguiente. Al cabo de una serie de intervalos, cuando se llega a la unidad de tiempo, se producen (escriben) resultados.
- El agua dulce tiene un espesor que cambia con el tiempo. Los valores iniciales de transmisividad se convierten en el modelo en valores de permeabilidad, dividiendo la transmisividad por el espesor de agua dulce. A partir de entonces el programa trabaja con permeabilidades, y toma como espesor saturado para el cálculo del intervalo «n+1» el espesor saturado hallado en el cálculo del intervalo anterior «n».
- En el caso de un acuífero costero, parte de los nudos de borde corresponden a la costa, y son de nivel piezométrico constante, igual a cero. Los otros nudos de borde, que pueden existir tierra adentro, podrían recibir diversos tratamientos. Para simplificar el programa, se toman también de piezometría prede-

terminada, y aunque podría hacerse de otra manera, se entran con piezometría constante en el tiempo. El hacerla variar para cada período es conceptualmente simple, pero requiere modificaciones en la entrada de datos y en el dimensionamiento del programa, así como en el programa mismo, modificaciones prácticas que estos minimodelos pueden tratar adecuadamente, no se ve que compense el trabajo de considerarlas. Así pues, todos los nudos de borde se entran con piezometrías fijas predeterminadas y constantes.

3. EL PROGRAMA

En la figura 3 se da un listado del programa, en su variante para que produzca los resultados en la impresora. Modificando las sentencias LPRINT por PRINT se tendrían los resultados en pantalla.

Como ocurre generalmente, el programa consta de cuatro partes:

- Lectura de datos de archivo, entre ellos la piezometría en el instante « t » = « t_0 », y los valores de recarga/extracción para cada unidad superficial (celda) y período de tiempo.
- Cálculo de los coeficientes de las ecuaciones de continuidad [6] para cada uno de los nudos o elementos «N».
- Resolución del sistema de ecuaciones para obtener la piezometría en el instante « $t+dt$ ». Como siempre, el programador puede elegir diversos procedimientos matemáticos para la resolución de este sistema. Todos los procedimientos tienen sus ventajas y sus inconvenientes. Los que son directos requieren bastante memoria de operación (en la C.P.U.) del ordenador. Los que se hacen por aproximaciones sucesivas (iteraciones) no necesitan apenas memoria, pero consumen tiempo. En esta ocasión, se ha elegido el procedimiento directo de Crout, en el que la matriz de la ecuación se transforma en una matriz triangular superior, a partir de la cual se resuelven directamente las ecuaciones empezando por la última incógnita.
- Al final de cada período, escritura de los resultados.


```

1 COLOR 2,0,0:CLS:"COS.BAS=acuífero costero. A. Navarro Julio-1992
2 INPUT "Archivo de datos=";ARS;ARS=ARS+".dat":OPEN ARS FOR INPUT AS #1
3 INPUT #1,I,NUTRU,IK,MINOR,SI:NUPOL:W=I+1:G=0:SIDLE=SI*G
4 DIM NUSID(I),SUNF(I,IK),ARST(I),HEFRE(I),BOTLE(I),A(W),B(I),MASIT(I,4)
5 DIM FLOWF(I,4),TH(I),TRANS(I),HEFRA(I),PERM(I,4),HEFRE(I)
6 DIM SFLOW(I),THA(I),CO(I):GAFRE=1:GASAL=1.025:BS=""###.##"
7 AS=""###.## ###.## ###.## ###.## ###.## ###.## ###.##"
8 FOR I=1 TO NUPOL:INPUT #1,X,NUSID(I):FOR J=1 TO 4:INPUT #1,MASIT(I,J):NEXT J
9 INPUT #1,HEFRE(I),BOTLE(I),TRANS(I),ARST(I)
10 FOR L=1 TO IK:INPUT #1,SUNF(I,L):NEXT L:NEXT I:FWS=0
11 INPUT "Escribit datos (s/n)":CS:IF CS<>"s" THEN 16
12 PRINT NUPOL:NUTRU:IK:MINOR:SI
13 FOR I=1 TO NUPOL:PRINT I:PRINT NUSID(I):FOR J=1 TO 4:PRINT MASIT(I,J):
14 NEXT J:PRINT HEFRE(I),BOTLE(I),TRANS(I),ARST(I):
15 FOR L=1 TO IK:PRINT SUNF(I,L):NEXT L:PRINT NEXT I
16 FOR I=1 TO NUPOL:HEFRE(I):HEFRE(I)+G
17 BOTLE(I)=BOTLE(I)+G: NEXT I:NA=NUTRU+1
18 GC=GAFRE/(GASAL-GAFRE):GA=GAFRE+GC:GB=GA/2
19 V=SIDLE*SIDLE:GOSUB 95
20 IF CS="s" THEN PRINT:PRINT "POL INICIAL"
21 FOR I=1 TO NUPOL:IF CS="s" THEN PRINT USING AS:I,HEFRE(I):G
22 ARST(I)=ARST(I)+V:IF TH(I)=0 THEN TRANS(I)=0:GOTO 24
23 TRANS(I)=.0365*TRANS(I)/TH(I)
24 FWS=FWS+ARST(I)+TH(I):NEXT I:PRINT:PRINT "AG.DULCE ALMAC.":FWS:PRINT
25 FOR I=1 TO NUPOL:GC=TRANS(I)
26 FOR J=1 TO NUSID(I):L=MASIT(I,J):IF L=NUTRU THEN TRANS(I)+TRANS(L)
27 PERM(I,J)=.5*(GG+TRANS(L))/MINOR:NEXT J:NEXT I
28 FOR NPER=1 TO IK:FWS=0:FNG=0:FMI=0:FMP=0:FWM=0:PRINT:PRINT "PER.":NPER
29 FOR I=1 TO NUPOL:HEFRA(I)+HEFRE(I):FOR J=1 TO NUSID(I)
30 FLOWF(I,J)=0:NEXT J:THA(I)+TH(I):NEXT I
31 FOR NSUB=1 TO NUPOL:FOR I=1 TO NUPOL:HEFRE(I)+HEFRE(I):CO(I)=1:NEXT I
32 GOSUB 95:PRINT NSUB:
33 FOR K=1 TO NUPOL:B(K)=0
34 FOR J=1 TO NUPOL:I=J+(K-1)*NUPOL
35 A(I)=0:NEXT J:NEXT K
36 FOR I=1 TO NUTRU:K=I+(I-1)*NUTRU:A(K)=0
37 B(I)=-SUNF(I,NPER)/MINOR-HEFRE(I)+ARST(I)+CO(I)
38 FOR J=1 TO NUSID(I):L=MASIT(I,J):JJ=I+(L-1)*NUTRU
39 AJJ=PERM(I,J)*(TH(L)+TH(I))*5:IF L<NUTRU THEN 41
40 B(I)=B(I)-AJJ:HEFRE(L):GOTO 42
41 AJJ=AJJ
42 A(K)+A(K)-AJJ:NEXT J
43 A(K)=A(K)-ARST(I)+CO(I)
44 NEXT I
45 NM=NUTRU:JJ=NM
46 FOR J=1 TO NM:LK=J+1:JJ=JJ+NM+1:EA=0:M=JJ-J
47 FOR KR=J TO NM:N=M+KR:TE=ABS(EA)-ABS(A(N)):IF TE>0 THEN 49
48 EA=A(N):L=KR
49 NEXT KR
50 I=J+NM*(J-2):M=L-J
51 FOR K=J TO NM:I=NM:K4=I+M:CH=A(I):A(I)=A(K4):A(K4)=CH
52 A(I)=A(I)/EA:NEXT K
53 CH=B(L):B(L)=B(J):B(J)=CH/EA:IF J=NM THEN 60
54 K5=NM*(J-1)
55 FOR KO=LK TO NM:IA=K5+KO:M=J-KO
56 FOR IO=LK TO NM:KR=M+KR:TE=ABS(EA)-ABS(A(N)):N=KR+M
57 A(KR)=A(KR)-A(IA)+A(N):NEXT IO
58 B(KO)=B(KO)-B(J)+A(IA)
59 NEXT KO:NEXT J
60 K5=NM-1:M=NM-NM
61 FOR J=1 TO K5:L=M-J:I=NM-J:K4=NM
62 FOR K=1 TO J:B(I)=B(I)-A(L)+B(K4):L=L-NM
63 K4=K4-1:NEXT K:NEXT J
64 FOR I=1 TO NUTRU:HEFRE(I)+HEFRE(I)+B(I):NEXT I
65 FOR I=1 TO NUTRU:IF HEFRE(I)>0 THEN 70
66 IF HEFRE(I)+BOTLE(I) THEN 68
67 CLS:PRINT "POL.":I:"SECO EN PERIODO":NPER:"SUBP.":NSUB:END
68 IF HEFRE(I)>GC:HEFRE(I) THEN 70
69 CLS:PRINT "POL.":I:"SALADO EN PERIODO":NPER:"SUBP.":NSUB:END
70 NEXT I:FOR I=1 TO NUPOL:FOR J=1 TO NUSID(I):L=MASIT(I,J):W=PERM(I,J)
71 FLOWF(I,J)+FLOWF(I,J)+HEFRE(L)-HEFRE(I):TH(L)+TH(I))*5+M:NEXT J
72 NEXT I:GOSUB 95:NEXT NSUB:PRINT:PRINT
73 PRINT "POL ALTPIEZ VARIAN PROPINT INFUSP CAMBALM FLUJSUB FWS"
74 FOR I=1 TO NUPOL:S=TH(I)-THA(I)+ARST(I):R=TH(I)+ARST(I)
75 FWS=FWS+R:SUNF(I,SUNF(I),S)
76 FOR J=1 TO NUSID(I):IF I<NUTRU THEN 80
77 IF HEFRE(I)=0 THEN 79
78 FNG=FNG-FLOWF(I,J):GOTO 80
79 FMI=FMI-FLOWF(I,J)
80 SFLOW(I)=SFLOW(I)+FLOWF(I,J):NEXT J
81 DDC=(HEFRE(I)-HEFRA(I))/G
82 DDI=(HEFRE(I)-TH(I))/G
83 HE=HEFRE(I)/G
84 PRINT USING AS:I,HE,DDC,DDI,SUNPE,S.SFLOW(I),TH(I)+ARST(I)
85 IF SUNPE<0 THEN 87
86 FMI=FMI+SUNPE:GOTO 88
87 FMP=FMP-SUNPE
88 NEXT I
89 PRINT:PRINT "FLUJO A TRAVES LADOS":PRINT:FOR I=1 TO NUPOL:PRINT I:
90 FOR J=1 TO NUSID(I):PRINT USING BS:FLOWF(I,J):NEXT J:PRINT:NEXT I
91 PRINT:PRINT "AG.DULCE ALMAC.":FWS
92 PRINT "APORTES AG.DULCE DE LOS BORDES":FNG:PRINT "INFILTRACION":FMI
93 PRINT "BOMBEO":FMP:PRINT "PERDIDAS AL MAR":FWM
94 NEXT NPER:PRINT "Programa=COS.BAS Archivo=ARS:END
95 FOR I=1 TO NUPOL:XX=BOTLE(I)+GC+HEFRE(I)
96 TH(I)=HEFRE(I)-BOTLE(I):IF XX<0 THEN TH(I)=GA+HEFRE(I):CO(I)=GA
97 NEXT I:RETURN

```

Figura 3.

- Acuífero verticalmente isótropo y monocapa.
- Régimen permanente o transitorio.
- Acuífero horizontalmente anisótropo (T, S, variables según elementos).
- Para cada intervalo de tiempo «dt» han de darse, para cada elemento «N» los datos de recarga/descarga vertical neta.
- Condiciones de borde de flujo predeterminado fijo.
- Condiciones de borde de piezometría predeterminada fija.
- No incluye condiciones de río o manantial, que complicarían el programa más de lo necesario, fuera del problema principal de la posición de la interfase.

Como el procedimiento de diferencias finitas se basa en balances de volúmenes de agua en intervalos de tiempo, balances realizados en cada elemento diferencial en que se divide el modelo, además de obtenerse la piezometría buscada, el mismo resultado ya implica un balance de masas. La interpretación física de los resultados del cálculo aparece por ello más satisfactoria y completa para el técnico, pues suma a las «h» los movimientos del agua.

Como siempre, hay que tener cuidado en usar un sistema consistente de unidades para los datos de partida. Las alturas piezométricas, tanto en los datos como en los resultados, se expresan en metros. La transmisividad se lee en [m²/día]. El área en hectáreas, y la recarga/descarga vertical neta en [hm³/período mayor] (que suele ser el año). Esto puede parecer complicado y se debe a un compromiso entre las unidades prácticas usuales y las que utiliza internamente el programa para hacer los cálculos cada subperíodo. Unidades habituales son:

$$L = [\text{metro}] \text{ Area} = [\text{ha}]$$

$$\text{Caudal} = [\text{hm}^3/\text{año}] \quad T = [\text{m}^2/\text{día}]$$

Ahora bien, la resolución del sistema de ecuaciones se hace para cada diferencial de tiempo [subperíodo], (mes, día, etc.), y con volúmenes de agua en [hm³]. Se utilizan una serie de parámetros para convertir las unidades de los datos de entrada en [hm] y [subperíodo] para la resolución de las ecuaciones y cálculo de las piezo-

El modelo que se ofrece requiere/admite las siguientes condiciones físicas:

- Acuífero libre o confinado, o combinación de ambos (pero una celda no puede cambiar de estado durante el tiempo de operación del modelo).

metrías intermedias y finales, y a la hora de escribir los resultados, se expresan en [metro] para la piezometría y en [hm³/per=año] para los volúmenes de agua.

A continuación se ofrece una descripción somera de las líneas del programa.

- 1 — Color. Nombre.
- 2 — Identificación del archivo de datos. Así, el mismo programa se puede utilizar para archivos (datos) diferentes, siempre que se ajusten a la secuencia de datos requerida.
- 3 — Se comienza la lectura de datos con los datos generales:

I = Número total de nudos.

NUTRU = Número de nudos verdaderos (no de borde).

IK = Número de períodos mayores de tiempo (generalmente, años). Al final de cada uno de ellos se escriben resultados.

MINOR = Dentro de cada intervalo mayor de tiempo hay MINOR períodos menores (subperíodo) de tiempo. Los nuevos valores de la piezometría se calculan para cada uno de estos períodos menores. Es decir, el sistema de ecuaciones se resuelve una vez para cada uno de estos subperíodos.

SI = Longitud del lado de la celda cuadrada (elemento) en [metros].

Se asigna al parámetro NUPOL el número total de nudos. Se define el cuadrado, W, de este valor. Se define un parámetro G, para el cambio de unidades de [metro] a [hm]. Se define la longitud del lado en [hm].

4-5-6 — Se dimensionan las variables del programa de acuerdo con los valores iniciales leídos. Las variables son las siguientes:

NUSID(I) = Número de lados permeables de la celda I.

SUNF(I, IK) = Recarga/descarga vertical neta en el elemento I, durante el período IK [hm³/per].

ARST(I) = Primero, coeficiente de almacenamiento asignado al elemento I, luego producto de ese coeficiente por el área del elemento.

HEFRE(I) = Nivel de agua dulce asignado al nu-

do I [m], calculado por el sistema de ecuaciones.

HEFRO(I) = Nivel de agua dulce asignado al nudo I, al comienzo del subperíodo correspondiente [m].

HEFRA(I) = Nivel de agua dulce asignado al nudo I, al comienzo del período correspondiente [m].

BOTLE(I) = Cota [m] del muro del acuífero en el elemento I.

A(W), B(I) = Matriz de coeficientes y vector del término independiente en la resolución del sistema de ecuaciones.

MASIT(I,4) = Matriz de situación. Número del nudo vecino al I a través de cada lado.

FLOWF(I,4) = Flujo subterráneo de agua dulce [hm³/per] a través de cada lado del elemento I.

TH(I) = Espesor del agua dulce en el nudo (elemento I).

TRANS(I) = Transmisividad asignada al elemento I [m²/día].

PERM(I,4) = Permeabilidad calculada para cada uno de los lados del elemento I [hm/subperíodo].

SFLOW(I) = Flujo subterráneo neto entrante (+) o saliente (-) del elemento I [hm³/per] (Suma de FLOWF).

THA(I) = Espesor saturado de agua dulce en el elemento I, al comienzo del período en cuestión.

CO(I) = Parámetro utilizado en el cálculo del espesor saturado de agua dulce.

Se asignan valores de densidad de agua dulce (GAFRE=1) y de agua salada (GASAL=1.025). Luego hay un formato de escritura.

7 — Otro formato de escritura.

8-9-10 — Lectura de datos. Para identificar variables, véase 4-5-6. Se inicializa a cero la variable sumatoria FWS, de agua dulce total almacenada.

11 — Se pregunta si se quiere (s/n) una escritura-eco de los datos. En caso negativo, se salta a la línea 16.

12-13-14-15 — Se escriben los datos.

16-17 — Se modifican las unidades de piezometría y muro de [m] a [hm]. Se define el índice

NA, igual al número de polígonos verdaderos más uno. Ese índice se usa más adelante.

18-19 — Se definen coeficientes que se usan más adelante. Con los valores de densidad de agua dulce y salada arriba indicados, resultan los parámetros, $GC=1/0.025=40$, $GA=41$. Se pasa por la subrutina 95 (líneas 95-96-97) en la que se calcula en cada elemento el espesor de agua dulce.

20-21-22-23-24 — Si hay escritura-eco de datos, se escribe la piezometría inicial. Se calcula el producto del área por el coeficiente de almacenamiento. Se calcula la permeabilidad del elemento en unidades [hm/año], dividiendo transmisividad por espesor. Se van sumando los parciales del agua dulce almacenada en el ámbito del modelo al comienzo del modelo.

25-26-27 — Se calcula la permeabilidad en cada lado de cada elemento, en unidades [hm/subperíodo]. Este valor será utilizado en los coeficientes de las ecuaciones del sistema.

28 — Comienzo de un ciclo mayor, que termina en la línea 94 para los cálculos para cada período (año) «IK». Se inicializan a cero una serie de términos sumatorios:

FWS = Agua dulce almacenada en el acuífero al final del período (año).

FWG = Aportes de agua dulce desde los bordes.

FWI = Infiltración de agua dulce.

FWP = Bombeo (o extracción) de agua dulce.

FWL = Pérdidas de agua dulce al mar.

Se imprime el número NPER del período (año).

29-30 — Se recoge el valor de la piezometría, HEFRA, y el espesor de agua dulce, THA, al comienzo del período. Se inicializa a cero la variable sumatoria del flujo subterráneo a través de los lados, FLOWF.

31 — Se inicia otro ciclo, ahora para cada subperíodo, MINOR, hasta la línea 72. Se recoge el valor de la piezometría, HEFRO, al comienzo del subperíodo, NSUB.

32 — Se calcula para cada elemento el espesor de agua dulce. Se escribe (en pantalla) el subperíodo, NSUB, correspondiente.

33-34-35 — Se inicializan a cero los términos de la matriz, A, del sistema y los del término independiente, B. Se identifica el número I del término de la matriz correspondiente a la fila K y columna J.

36-37-38-39-40-41-42-43-44 — Se calculan cada uno de los términos de la matriz y el independiente, del sistema de ecuaciones correspondiente al subperíodo en cuestión.

45-46-47-48-49-50-51-52-53-54-55-56-57-58-59-60-61-62-63-64 — Se resuelve el sistema, por el método mencionado más arriba, y se obtiene el nuevo valor de piezometría, HEFRE.

65-66-67-68-69-70-71-72 — Se comprueba que el nuevo nivel piezométrico no es menor que el muro del acuífero (acuífero seco), o queda por debajo de la anterior interfase (acuífero salinizado). En caso contrario se aborta el programa. Se calculan los nuevos espesores de agua dulce y se va al subperíodo siguiente, o si éste era el último, a la escritura de los resultados del período.

73-74-75-76-77-78-79-80-81-82-83-84-85-86-87-88 — Se calculan los términos de la ecuación de balance, y las sumatorias de agua dulce almacenada, ingresos de agua dulce por los bordes, infiltración, bombeo y pérdidas al mar. Se escriben los resultados. Se especifica, para cada elemento o nudo:

ALTPIEZ = Altura piezométrica [m].

VARIAH = Variación de la misma durante el período (año) [m].

PROFINT = Profundidad de la interfase [m]. Si es mayor que el muro, se escribe la cota del muro.

INFSUP = Recarga/extracción vertical neta [hm³/período].

CAMBALM = Cambio de agua dulce almacenada [hm³/período].

FLUJSUB = Flujo subterráneo neto en el elemento [hm³/período].

FW.ALM = Agua dulce almacenada en el elemento [hm³/].

Como resultante de la ecuación de balance, para cada elemento es:

$$FLUJSUB + INFSUP = CAMBALM$$

89-90 — La componente FLUJSUB se desglose a continuación para cada uno de los lados y elemento (FLUJO A TRAVES DE LOS LADOS).

91-93 — Se escriben los totales, para el período en cuestión, del agua dulce almacenada, aportes de agua dulce de los bordes, infiltración, bombeo y pérdidas de agua dulce al mar.

94 — Se imprime el nombre del programa y del archivo utilizados. Fin del programa.

95-96-97 — Subrutina para calcular el espesor de agua dulce en cada elemento. En principio, se toma como 41 veces su altura piezométrica. Si la interfase queda por debajo del muro, se toma como espesor la diferencia entre la cota piezométrica y el muro (todo el acuífero es de agua dulce).

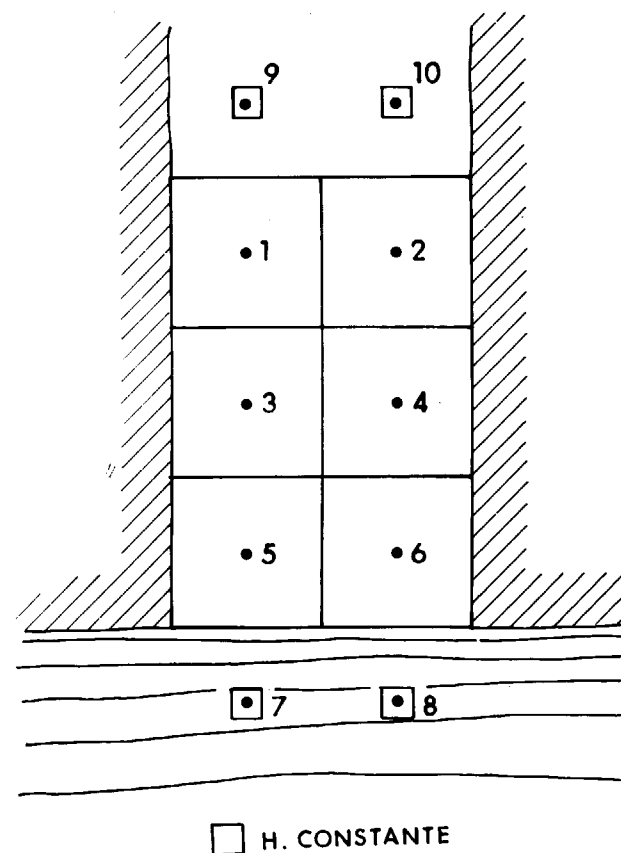


Figura 4.

4. EJEMPLOS DE APLICACION

Para aclarar las explicaciones dadas se ofrece un ejemplo muy simple de aplicación del programa, con el acuífero costero de la figura 4. Se compone de 10 nudos, seis elementos verdaderos y cuatro de borde, los 7 y 8 en el mar, los 9 y 10 en el interior.

Se eligen dos períodos anuales, cada uno con seis subperíodos bimensuales. Los elementos, cuadrados, con lado de 1.000 metros.

El archivo de datos podría ser el visto en la figura 5. Una primera fila general con el número de nudos, el de elementos verdaderos, períodos, subperíodos cada período, longitud de lado.

10	6	2	6	1000															
1																			
3	2	3	9	0	12.16	-400	6000	.05	8.5	8.3									
2																			
3	1	4	10	0	11.76	-400	6000	.05	5.5	5.4									
3																			
3	1	4	5	0	8.43	-400	6000	.05	1.5	1.4									
4																			
3	2	3	6	0	8.55	-400	5700	.05	2.7	2.6									
5																			
3	3	6	7	0	1.33	-400	6200	.05	1.4	1.3									
6																			
3	4	5	8	0	1.42	-400	5680	.05	-10	1.3									
7																			
1	5	0	0	0	0	-400	5870	0	0	0									
8																			
1	6	0	0	0	0	-400	4900	0	0	0									
9																			
1	1	0	0	0	12.3	-400	4200	0	0	0									
10																			
1	2	0	0	0	12	-400	4100	0	0	0									

Figura 5.

A continuación, una fila para cada elemento o nudo, con su número, número de lados permeables, elementos vecinos (se añaden ceros hasta completar los cuatro máximos posibles), piezometría inicial [m], muro del acuífero [m], transmisividad [m²/día], coeficiente de almacenamiento, y recarga/descarga vertical neta [hm³/período].

El resultado aparece en la figura 6, que en parte ya se ha detallado. Además de las nuevas piezometrías de los nudos de elementos reales (no de borde), de su variación, y del balance de masas, el resultado más importante para el pro-

POL	HINICIAL
1	12.16
2	11.76
3	8.43
4	8.55
5	1.33
6	1.42
7	0.00
8	0.00
9	12.30
10	12.00

AG.DULCE ALMAC.= 81.64254

PER.= 1

POL	ALTPIEZ	VARIAH	PROFINT	INFSUP	CAMBALM	FLUJSUB	FW.ALM
1	11.31	-0.85	-400.0	8.500	-0.042	-8.542	20.566
2	10.90	-0.86	-400.0	5.500	-0.043	-5.543	20.545
3	6.55	-1.88	-261.9	1.500	-3.859	-5.359	13.423
4	6.50	-2.05	-259.9	2.700	-4.207	-6.907	13.320
5	4.44	3.11	-177.6	1.400	6.372	4.972	9.098
6	3.81	2.39	-152.3	-10.000	4.891	14.891	7.802
7	0.00	0.00	0.0	0.000	0.000	6.228	0.000
8	0.00	0.00	0.0	0.000	0.000	3.739	0.000
9	12.30	0.00	-400.0	0.000	0.000	-1.657	0.000
10	12.00	0.00	-400.0	0.000	0.000	-1.821	0.000

FLUJO A TRAVES LADOS

1	-0.87	-9.33	1.66
2	0.87	-8.23	1.82
3	9.33	-0.00	-14.69
4	8.23	0.00	-15.14
5	14.69	-3.49	-6.23
6	15.14	3.49	-3.74
7	6.23		
8	3.74		
9	-1.66		
10	-1.82		

Figura 6 A

AG.DULCE ALMAC.= 84.7535
 APORTES AG.DULCE DE LOS BORDES= 3.477755
 INFILTRACION= 19.6
 BOMBEO= 10
 PERDIDAS AL MAR= 9.96681

PER.= 2

POL	ALTPIEZ	VARIAH	PROFINT	INFSUP	CAMBALM	FLUJSUB	FW.ALM
1	11.41	0.10	-400.0	8.300	0.005	-8.295	20.571
2	11.05	0.15	-400.0	5.400	0.008	-5.392	20.553
3	6.85	0.31	-274.2	1.400	0.628	-0.772	14.051
4	7.00	0.51	-280.2	2.600	1.038	-1.562	14.358
5	5.11	0.67	-204.4	1.300	1.375	0.075	10.473
6	5.15	1.35	-206.1	1.300	2.758	1.458	10.560
7	0.00	0.00	0.0	0.000	0.000	9.913	0.000
8	0.00	0.00	0.0	0.000	0.000	8.211	0.000
9	12.30	0.00	-400.0	0.000	0.000	-1.765	0.000
10	12.00	0.00	-400.0	0.000	0.000	-1.871	0.000

FLUJO A TRAVES LADOS

1	-0.80	-9.26	1.77
2	0.80	-8.07	1.87
3	9.26	0.18	-10.20
4	8.07	-0.18	-9.45
5	10.20	-0.22	-9.91
6	9.45	0.22	-8.21
7	9.91		
8	8.21		
9	-1.77		
10	-1.87		

AG.DULCE ALMAC.= 90.56544
 APORTES AG.DULCE DE LOS BORDES= 3.636204
 INFILTRACION= 20.3
 BOMBEO= 0
 PERDIDAS AL MAR= 18.12428
 Programa=COS.BAS Archivo=cos.dat

Figura 6 B.

grama es la definición de la posición de la interfase «agua dulce-agua salada». En los nudos de borde, 7 y 8, la interfase aparece a nivel cero, al

nivel de la superficie del mar, es decir, no hay agua dulce. En los elementos 5 y 6 la interfase se coloca a —177 y —152 metros de profundidad por debajo del nivel del mar. En los elementos 3 y 4 la interfase está más profunda, respectivamente, a —262 y —260 metros bajo el nivel del mar. En los elementos 1 y 2 la interfase queda por debajo del muro impermeable del acuífero, por lo que el límite inferior del agua dulce, que es lo que marcan las cifras de esa columna se pone a —400, y lo mismo ocurre con los nudos de borde 9 y 10.

A continuación se va a operar el mismo acuífero, variando algunas de las condiciones para ver cómo actúan los controles de «polígono seco» y «polígono salinizado».

Por ejemplo, en el elemento 6 se introduce (fig. 7) en el primer año (período) una extracción excesiva, de 100 hm³. En estas condiciones, el agua

10	6	1	6	1000					
1	3	2	3	9 0	12.16	-400	6000	.05	8.5
2	3	1	4	10 0	11.76	-400	6000	.05	5.5
3	3	1	4	5 0	8.43	-400	6000	.05	1.5
4	3	2	3	6 0	8.55	-400	5700	.05	2.7
5	3	3	6	7 0	1.33	-400	6200	.05	1.4
6	3	4	5	8 0	1.42	-400	5680	.05	-100
7	1	5	0	0 0	0	-400	5870	0	0
8	1	6	0	0 0	0	-400	4900	0	0
9	1	1	0	0 0	12.3	-400	4200	0	0
10	1	2	0	0 0	12	-400	4100	0	0

Figura 7.

dulce del elemento se va agotando. Todavía queda agua dulce al final del primer subperíodo, pero el agotamiento es total durante el segundo subperíodo y el agua salada lo invade por completo. El programa genera en pantalla el mensaje:

POL. 6 SALADO EN PERIODO 1 SUBP. 2

y el proceso se aborta. El acuífero no aguanta la extracción propuesta y hay que modificarla para que se pueda operar.

Vamos a presentar otro caso límite. Modificamos en el polígono 1 la extracción hasta 70 hm³/a, y en todo el acuífero la profundidad del muro

(fig. 8), haciéndolo muy poco profundo. Si se establece esta profundidad a, por ejemplo, —10 metros, en vez de los —400 con que operábamos el ejemplo inicial, al operar el programa se genera en pantalla el mensaje:

POL. 3 SECO EN PERIODO 1 SUBP. 2

10	6	1	6	1000					
1	3	2	3	9 0	12.16	-10	6000	.05	-70
2	3	1	4	10 0	11.76	-10	6000	.05	5.5
3	3	1	4	5 0	8.43	-10	6000	.05	1.5
4	3	2	3	6 0	8.55	-10	5700	.05	2.7
5	3	3	6	7 0	1.33	-10	6200	.05	1.4
6	3	4	5	8 0	1.42	-10	5680	.05	1.1
7	1	5	0	0 0	0	-10	5870	0	0
8	1	6	0	0 0	0	-10	4900	0	0
9	1	1	0	0 0	12.3	-10	4200	0	0
10	1	2	0	0 0	12	-10	4100	0	0

Figura 8.

y el proceso se aborta. Con la extracción propuesta, el nivel piezométrico del acuífero desciende en el elemento 3 y durante el subperíodo 2 por debajo del muro, lo que es físicamente imposible. El proceso se aborta y requiere modificación de las condiciones iniciales para que sea viable, ya sea modificándose la cuota del muro, ya sea modificándose la recarga/descarga.

5. CONCLUSIONES

El programa se presta especialmente para un tratamiento inicial de las grandes llanuras aluviales o detríticas costeras, donde el acuífero pueda ser interpretado como un monocapa extenso superficialmente. La ley simple de 40 en profundidad por cada uno de cota sobre cero es, en la realidad, suficientemente aproximada para los casos en que se aprecia que la interfase tiene una disposición de cuña. Incluso, también puede utilizarse cuando la cuña se extiende hacia el interior de la llanura, por debajo de la capa dulce.

Se insiste, tal como se ha hecho en otros escritos de esta serie de programas simples, que para pasar a programas y modelos más complicados se requiere un salto cuántico en la información, una cantidad de datos adicionales considerable, que en la inmensa mayoría de las ocasiones que se presentan al técnico en la práctica no se tienen.

REFERENCIAS

NAVARRO ALVARGONZALEZ, A. (1992): *Miniprogramas (II)*. Boletín Geológico y Minero, vol. 102, núm. 5. Madrid. pp. 901-913.

Original recibido: Julio de 1992.

Original aceptado: Julio de 1992.

GEOQUIMICA

Efecto del reactivo de ataque sobre la determinación de boro en materiales geológicos por ICP-AES.

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

RESUMEN

Trazas de boro han sido determinadas en materiales geológicos silicatados por ICP-AES. La puesta en solución de las muestras se ha llevado a cabo por cuatro procedimientos: a) fusión con Na_2CO_3 ; b) disgregación en estado sólido con $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{ZnO}$; c) sinterización con Na_2O_2 y d) digestión con $\text{HClO}_4 + \text{HF} + \text{HCl}$. La línea analítica utilizada ha sido la situada a 249,678 nm. Se ha establecido, para los cuatro procedimientos de ataque, su concentración mínima determinable (CMD). La bondad del método propuesto se ha constatado: i) Analizando siete patrones internacionales con contenido de boro recomendado o certificado; ii) determinando la precisión a corto plazo de tiempo, la precisión a largo plazo de tiempo y la precisión del método.

Palabras clave: Análisis, Boro, Materiales geológicos, ICP-AES.

ABSTRACT

Trace amounts of boron are determined in geological samples by ICP-AES. The dissolution of the samples is achieved by four methods: a) fusion with Na_2CO_3 ; b) disgregation in solid state with $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{ZnO}$; c) sintering with Na_2O_2 and d) digestion with $\text{HClO}_4 + \text{HF} + \text{HCl}$. As analytical line has been used the situated to 249.678 nm. The concentration minimum determinable (CMD) has been established. The method of analysis proposed has been tested: i) analyzing seven international reference samples; ii) determining the short-term precision, long-term precision and method precision.

Key words: Analysis, Boron, Geological materials, ICP-AES.

INTRODUCCION

El boro es un elemento de gran importancia en geoquímica por varios motivos:

- Aporta datos sobre el entorno geoquímico-geológico y permite definir ciertas litologías (rocas graníticas, series sedimentarias arcillosas, esquistosas, etc.) (ILARRI et al., 1984).
- Actúa como marcador de alteraciones hidrotermales ligadas a determinados tipos de yacimientos (Cu-Mo, Au, Sn-W, U) (PLANT et al., 1986).
- Es un indicador de ambiente de deposición de sedimentos: paleosalinidad (WALKER, 1968).

El fondo geoquímico de este elemento (contenido medio en la corteza terrestre) es de 10 ppm (FLETCHER, 1983), fluctuando su concentración en suelos entre 3 y 5 ppm.

Desde una óptica analítica, los procedimientos empleados en su determinación deberán ser sensibles y precisos para poder detectar las mencionadas concentraciones y resaltar las posibles anomalías geoquímicas que se deducen de su presencia. En este sentido, espectrofotometría y espectrografía de emisión con arco han sido las técnicas que habitualmente se han venido empleando para cuantificar el boro en rocas y suelos.

Los resultados precisos, exactos y rápidos obtenidos en la determinación del citado elemento por espectrometría de emisión plasma de aco-

plamiento inductivo (ICP-AES), en otro tipo de matrices (VALLE y BARBA, 1986; RODRIGUEZ et al., 1987; LARREA et al., 1991), han animado a aplicar la mencionada técnica al análisis de boro en materiales geológicos silicatados.

Aunque actualmente se trabaja extensamente en encontrar sistemas de aporte de muestra sólida al plasma (THOMPSON et al., 1981; SPIERS et al., 1983; FARIÑAS et al., 1991), todavía los procedimientos no están suficientemente desarrollados y es preciso proceder a una disolución previa de las muestras. Los ataques no deben originar la volatilización de boro del material ni la introducción de este elemento por parte de los reactivos. Ambos motivos obligan a:

- recurrir a digestiones fluorhídricas en reactores cerrados;
- emplear fundentes exentos de boro en su composición.

En el presente trabajo se pretende aplicar cuatro procedimientos de puesta en solución de las muestras para determinar posteriormente el boro por ICP-AES. La evaluación de los ataques se realizará en base a las interferencias espectrales y a los efectos de matriz producidos.

Los procedimientos propuestos son los siguientes:

- Fusión con Na_2CO_3 .
- Disgregación en estado sólido con $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{ZnO}$.
- Sinterización con Na_2O_2 .
- Digestión con $\text{HClO}_4 + \text{HF} + \text{HCl}$.

PARTE EXPERIMENTAL

Muestras

Siete muestras con contenido de boro recomendado o certificado (tres sienitas, dos suelos, un granito y una dunita) han sido los materiales analizados. La granulometría en todos ellos, por debajo de los 63 μm , ha hecho innecesario proceder a su molienda.

Equipo

Espectrómetro multicanal Jarrell-Ash Modelo ICAP-61 cuyas características y condiciones de trabajo se exponen en las tablas I y II, respectivamente.

TABLA I
Características del espectrómetro

Fuente de radiofrecuencia			
Frecuencia	27,12 MHz		
Potencia nominal	2.500 W		
Potencia reflejada	< 5 W		
Policromador			
Montaje	Paschen Runge		
Distancia focal	0,75 m.		
Red de difracción	Holográfica, 1.500 líneas mm^{-1}		
Dispersión lineal recíproca ...	0,84 nm mm^{-1} (1.º orden)		
	0,42 nm mm^{-1} (2.º orden)		
Resolución	0,048 nm (1.º orden)		
	0,024 nm (2.º orden)		
Rendija de entrada (anchura).	25 μm		
Rendija de salida (anchura)...	50 μm		
Detectores (fotomultiplicadores)			
Fabricante	Hamamatsu		
Denominación	R-300 R-427 R-869		
Rango de trabajo (nm)	230-600 160-320 600-780		
Sistema de introducción de la muestra			
Bomba peristáltica... ..	Minipul II (12 rodillos)		
Nebulizador... ..	Neumát., tipo «cross flow»		
Cámara de nebulización	Scott, tipo coaxial		
Antorcha			
	Cuarzo desmontable con inyector de Al_2O_3		
Ordenador			
	IBM PC/AT con 640 Kb de RAM con disco duro de 30 Mb		

TABLA II
Condiciones operatorias

Potencia inducida	1.000 W
Altura de observación	16 mm
Flujo de Ar generador del plasma	17 l min^{-1}
Flujo de Ar de nebulización	0,75 l min^{-1}
Caudal de agua de refrigeración	1,5 l min^{-1}
Caudal de aspiración de la muestra	2 ml min^{-1}
Longitud de onda del B (I)	249,678 nm
Número de lecturas	10
Tiempo de integración	5 seg

(*) Instituto Tecnológico Geominero de España (ITGE).
(**) Instituto de Cerámica y Vidrio (CSIC).

Procedimientos de ataque

Fusión con Na₂CO₃

Una mezcla de 0,5000 g. de muestra y 3 g. de Na₂CO₃, colocada en un crisol de platino, se funde a 900° C en una mufla durante 30 min. Concluido el ataque, el crisol, todavía caliente (150-200° C), se introduce en un vaso de teflón de 250 ml. de capacidad que contiene 50 ml. de agua destilada. La digestión del fundido se acelera calentando al baño maría. La solución resultante se separa del precipitado por filtración (papel Scheleicher 589² banda blanca) y se afora a 100 ml. previa acidificación con 5 ml. de HNO₃ conc.

Disgregación en estado sólido con Na₂CO₃ + ZnO

El material (0,5000 g.) se homogeneiza con 1,5 g. de Na₂CO₃ y 0,5 g. de ZnO en un crisol de platino y se coloca en un mufla regulada a 900° C por espacio de 30 min. El resultado del ataque se consigue desleír en 10 ml. de agua destilada con ayuda de un baño de ultrasonidos. A continuación, el contenido del crisol se filtra (papel Scheleicher 589³ banda azul) a un matraz de 100 ml. y se lava con agua destilada caliente. Concluido el lavado, la solución se acidifica con 5 ml. de HNO₃ conc., se agita y se afora.

Sinterización con Na₂O₂

En un crisol de zirconio se mezclan 1,0000 g. de muestra y 3 g. de Na₂O₂. El conjunto se introduce en una mufla a 450° C durante 45 min. Al sacar el crisol, el choque térmico que se origina produce el desprendimiento y el resquebrajamiento del sinter. Este último se coloca en un vaso de precipitados conteniendo 50 ml. de agua destilada hasta su completo desleimiento. La separación de hidróxidos y sales básicas se lleva a cabo por filtración (papel Scheleicher 589³ banda azul). La solución resultante se acidifica con 10 ml. de HCl 6N y se afora a 100 ml.

Digestión con HClO₄ + HF + HCl

En un reactor de PTFE de 150 ml. de capacidad se pesan 1,0000 g. de muestra y se añaden 5 ml. de HClO₄ conc. El reactor se cierra y se introdu-

ce en una estufa a 140° C durante 10 horas. Una vez frío se abre y se adicionan 2 ml. de HF conc. y 10 ml. de HCl conc. De nuevo se vuelve a cerrar y se coloca en la estufa, pero esta vez a 85° C, por un período de 24 horas. Finalizado el ataque la solución se lleva a un matraz de polietileno de 100 ml. y se afora.

RESULTADOS Y DISCUSION

Interferencias espectrales

La rendija de salida del policromador permite analizar indistintamente las líneas de B(I) situadas a 249,773 nm y 249,678 nm. Por otra parte, del conjunto de emisiones de este elemento se trata de las dos que tienen una mayor relación pico-fondo y las únicas con un límite de detección (LD) suficientemente bajo para poder determinar el boro a un nivel de concentración semejante al del fondo geoquímico.

Experimentalmente se ha comprobado que ambas líneas están interferidas por emisiones del hierro. En la figura 1 se contemplan dichas interferencias. La 249,773 nm está fuertemente solapada por la 249,782 nm del Fe(II). Menor grado de interferencia producen las emisiones del Fe(I) situadas a 249,653 nm y 249,691 nm sobre la 249,678 nm. Por estar menos solapada, la última emisión ha sido la elegida con fines analíticos.

Cuando la muestra es puesta en solución mediante disgregantes la interferencia del hierro no se produce, ya que el elemento es precipi-

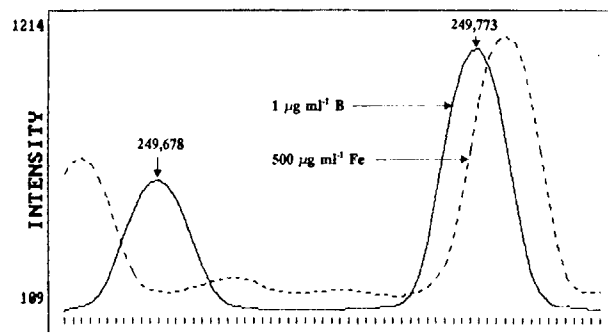


Figura 1.—Barridos espectrales correspondientes a 1 µg ml⁻¹ de boro y 500 µg ml⁻¹ de hierro en el entorno de las emisiones de B(I) a 249,678 nm y 249,773 nm.

tado como hidróxido o sal básica durante el proceso de lixiviación acuosa del fundido. Esta circunstancia se constata en la figura 2, donde se presentan los barridos espectrales en el entorno de la emisión analítica del boro correspondiente a una muestra atacada de dos maneras diferentes:

- a) sinterización con Na₂O₂;
- b) digestión con HClO₄ + HF + HCl.

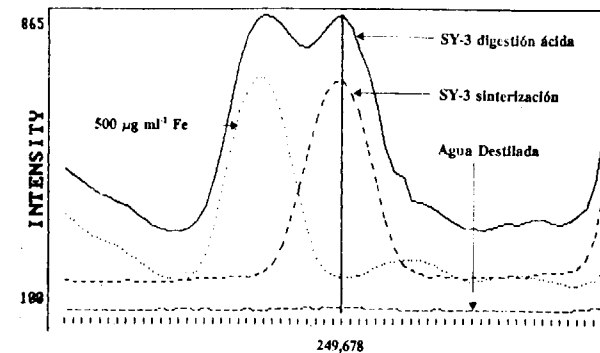


Figura 2.—Barridos espectrales en el entorno de la línea 249,678 nm del boro, correspondientes a: 500 µg ml⁻¹ de hierro, muestra SY3 sinterizada con Na₂O₂, muestra SY3 digerida con HClO₄ + HF + HCl y agua destilada.

Cálculo de la concentración mínima determinable de boro (CMD)

Para cada procedimiento de puesta en solución se ha fijado como CMD la concentración que da lugar a un conjunto de diez lecturas de intensidad cuya media, minorizada en tres veces el valor de su desviación standard (σ), no se solapa con la del blanco conseguida en las mismas condiciones experimentales. Esta forma de operar permite disponer de una CMD con un grado de confianza del 99,7 por 100. A la hora de establecer el valor de este parámetro se han preparado, por blanco, una serie de siete patrones de boro con contenidos de 0; 0,01; 0,025; 0,050; 0,100; 0,200 y 0,300 µg ml⁻¹. En los correspondientes a la serie «digestión ácida» se han incluido también 500 µg ml⁻¹ de hierro. En la tabla III se ofrecen los valores de las lecturas de intensidad obtenidos y sus intervalos de fluctuación aplicando el criterio de ± 3σ. Con los datos aportados por esta tabla y mediante interpolación, se han po-

TABLA III
Datos para establecer la CMD de boro en las soluciones procedentes de los distintos tipos de ataque

	Conc. Patrón µg ml ⁻¹	Lectura media	σ	Intervalo de fluctuación de lecturas
Fusión (Na ₂ CO ₃)	0	481	7	460-502
	0,010	494	8	470-518
	0,025	545	10	515-575
	0,050	606	9	579-633
	0,100	729	9	702-756
Disgregación (Na ₂ CO ₃ + ZnO)	0,200	837	11	804-870
	0,300	1020	13	981-1059
	0	548	3	539-557
	0,010	563	3	554-572
	0,025	594	4	582-606
Sinterización (Na ₂ O ₂)	0,050	640	5	625-655
	0,100	766	6	748-784
	0,200	982	7	961-1003
	0,300	1210	8	1186-1234
	Digestión (HClO ₄ + HF + HCl)	0	587	3
0,010		603	3	594-612
0,025		651	3	642-660
0,050		712	5	697-727
0,100		835	8	811-859
	0,200	1030	9	1003-1057
	0,300	1260	10	1230-1290
	0	926	8	902-950
	0,010	955	8	931-979
	0,025	998	7	977-1019
	0,050	1070	4	1058-1082
	0,100	1220	3	1211-1229
	0,200	1511	5	1496-1526
	0,300	1820	6	1802-1838

dido fijar las CMD correspondientes a cada sistema de ataque (tabla IV); todas ellas son inferiores al fondo geoquímico del boro.

TABLA IV
CMD de boro en los diferentes blancos

Ataque	CMD (µg ml ⁻¹)	Conc. referida a muestra sólida (ppm)
Fusión con Na ₂ CO ₃	0,045	9,0
Disgregación en estado sólido (Na ₂ CO ₃ + ZnO)	0,014	2,8
Sinterización con Na ₂ O ₂	0,012	1,2
Digestión con HClO ₄ + HF + HCl.	0,030	3,0

Por otra parte, existe una dependencia entre la desviación standard de las lecturas de intensidad y el tipo de ataque. Los valores más altos de este parámetro se dan en los patrones preparados con Na_2CO_3 por el elevado contenido salino que el fundente aporta a las soluciones. En el caso de la digestión ácida las peores precisiones tienen lugar en el blanco y en los patrones de baja concentración. Ello es debido a la influencia que sobre la emisión del analito tienen las emisiones de las dos líneas próximas del hierro.

Análisis de las muestras

Cuatro patrones con concentraciones de 2; 0,5; 0,1 y 0,025 $\mu\text{g ml}^{-1}$ de boro respectivamente se han preparado por cada blanco. En todos los casos, un ajuste lineal del calibrado ha sido suficiente, como se deduce de los coeficientes de correlación (r) que siempre han sido superiores a 0,999.

Los resultados obtenidos al analizar los diferentes materiales se contemplan en la tabla V. Los datos ofrecidos en dicha tabla son valores medios correspondientes a tres tomas de muestra.

TABLA V
Resultados obtenidos en la determinación de boro por ICP-AES en materiales geológicos silicatados

Material	Conc. recomendada ppm	Conc. encontrada (ppm)			
		M-1	M-2	M-3	M-4
Sienita					
SY-3	110(*)	106	110	110	108
SY-2	85	83	85	86	89
NIM-S	13	11	11	11	8
Dunita					
NIM-D	4	<9	3	3	4
Granito					
NIM-G	8	<9	4	5	5
Suelo					
SO-3	22	19	24	22	19
SO-1	22	17	19	19	18

M1-: Fusión con Na_2CO_3 .

M-2: Disgregación en estado sólido con $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{ZnO}$.

M-3: Sinterización con Na_2O_2 .

M-4: Digestión con $\text{HClO}_4 + \text{HF} + \text{HCl}$.

(*) Concentración certificada.

Su similitud con los porcentajes recomendados y certificado (excepción hecha del granito NIM-G) avalan a los cuatro procedimientos de ataque y al ICP-AES como adecuados para determinar boro en este tipo de muestras. En el caso del granito los resultados encontrados en este trabajo concuerdan con los conseguidos por TROLL et al. (1985) al analizar este elemento espectrofotométricamente con ácido carmínico.

Precisión de resultados

Sobre la sienita SY-3 se ha realizado un estudio estadístico de la determinación de boro que ha comprendido los siguientes ensayos:

- Precisión a corto plazo (10 lecturas seguidas en la misma solución).
- Precisión a largo plazo (1 lectura diaria durante 10 días consecutivos de la misma solución).
- Precisión del método (10 ataques independientes de la muestra).

Los resultados obtenidos expresados como coeficiente de variación (desviación standard relativa) se ofrecen en la tabla VI.

TABLA VI
Estudio de las diferentes precisiones en la determinación de boro por ICP-AES (sienita SY-3)

	$CV = \frac{100 \sigma}{\bar{x}}$			
	M-1	M-2	M-3	M-4
Precisión a corto plazo.	1,54	0,60	0,54	0,70
Precisión a largo plazo.	2,11	1,02	0,98	1,49
Precisión del método ...	3,89	1,51	1,39	2,06

Para cada procedimiento de puesta en solución la precisión del método, evidentemente, disminuye respecto a las encontradas a corto y largo plazo, al tener en cuenta la primera las fluctuaciones que se producen al analizar 10 tomas de muestra. Los resultados más precisos se consiguen en la disgregación con $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{ZnO}$ y en la sinterización con Na_2O_2 por tratarse de los ata-

ques que proporcionan menores fondos espectrales y por ende mayor estabilidad a las soluciones.

CONCLUSION

La sinterización con Na_2O_2 y la disgregación en estado sólido con $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{ZnO}$ son los procedimientos de ataque que proporcionan mayores precisiones en la determinación de trazas de boro en materiales geológicos silicatados por ICP-AES. Las CMD obtenidas por ambas vías han quedado fijadas en 1,2 y 2,8 ppm respectivamente, valores inferiores al fondo geoquímico de este elemento (10 ppm) y a su concentración en suelos (3-150 ppm). Ambos procedimientos conducen a resultados con suficiente exactitud.

REFERENCIAS

FARIÑAS, J. C.; BARBA, M. F., y MERMET, J. M. (1991): *Análisis químico de muestra sólida por espectrometría de plasma de acoplamiento inductivo. Aplicación a los materiales electrocerámicos*. Bol. Soc. Esp. Cerám. Vidr., 30, 515-520.

FLETCHER, W. K. (1983): *Handbook of Exploration Geochemistry*. Vol. 1, 2.ª ed. Elsevier. 255 pp.

ILARRI, A.; LOCUTURA, J., y URBANO, R. (1984): *Explora-*

ción Sistemática del Territorio Nacional. I Congreso Español de Geología, t. II, 527-540.

LARREA, M.; DEL BARRIO, S., y VALLE, F. J. (1991): *Determination du bore dans les laitiers siderurgiques par spectrométrie d'émission plasma à couplage inductif*. Silicat. Ind. LVI, 9-10, 187-193.

PLANT, J. A.; FORREST, M. D.; HODGSON, J. F.; SMITH, R. T. S., y STEVENSON, A. G. (1986): *Regional geochemistry in the detection and modelling of mineral deposits*. En: *Applied Geochemistry in the 1980s* (Thornton, I. y Howarth, R., eds.). 103-139.

RODRIGUEZ, M. A.; VALLE, F. J., y OTEO, J. L. (1987): *Etude de l'attaquabilité chimique des verres silico-boriques en milieu acide*. Verre, 1, 4, 425-431.

SPIERS, G. A.; DUDAS, M. J., y HODGINS, L. W. (1983): *Simultaneous multielement analysis of clays by inductively coupled plasma-atomic emission spectroscopy using suspension aspiration*. Clays Clay Minerals, 31, 397-410.

THOMPSON, M.; GOULTER, J. E., y SIEPER, F. (1981): *Laser ablation for the introduction of solid samples into an inductively coupled plasma for atomic-emission spectroscopy*. Analyst, 106, 32-39.

TROLL, G., y SAURER, A. (1985): *Determination of trace amounts of boron in geological samples with carminic acid after extraction with 2-ethyl-hexane-1,3-diol*. Analyst, 110, 283-286.

VALLE, F. J., y BARBA, M. F. (1986): *Application de la spectrométrie d'émission avec excitation par plasma induit par haute fréquence (ICP) au dosage du bore dans les magnésites et les réfractaires basiques de magnésite*. Verr. Refract. 40, 173-178.

WALKER, C. T. (1968): *Evaluation of boron as a paleosalinity indicator and its application to offshore prospects*. Am. Ass. Petr. Geol. Bull., 52, 751-760.

Original recibido: Septiembre de 1992.

Original aceptado: Noviembre de 1992.

INGENIERIA GEOAMBIENTAL

Fluctuación climática y actividad antrópica durante el Subboreal. Estudio polínico de Almizaraque, Herrerías (Cuevas de Almanzora) Almería (*).

Por B. MARISCAL (**)

RESUMEN

Se estudia el contenido polínico en el yacimiento de Almizaraque (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 manifiesta la degradación de la flora, la desaparición del bosque, sustituido por cultivos de gramíneas, y el proceso de desertificación debido a la intensa actividad antrópica y a los cambios climáticos que afectaron a la zona.

Palabras clave: Polen, Subboreal, Paleoclimatología.

ABSTRACT

The pollen content from the Subboreal (Halocen) materials in the Almizaraque (Almería) deposits have been studied. The work approaches the paleopalynological 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.

The study of the degradation of the flora, forest disappearance replaced by cultivated graminaceae and the desertification process due to the intense antropic activity and to the climatic changes which affected the area.

Key words: Pollen, Subboreal and Paleoclimatology.

INTRODUCCION

Se ha estudiado el contenido polínico de tres zonas próximas entre sí, obteniéndose dos grupos distintos de vegetación. Un grupo está integrado por especies arbóreas propias de zonas húmedas próximas a arroyos, con un espectro puntual que indica la zona de margen fluvial o desembocadura de río.

El otro espectro polínico corresponde a un tipo distinto de vegetación compuesta por especies arbóreas de zonas húmedas y plantas propias de áreas posiblemente cultivadas y baldíos. Estas plantas están representadas por una veintena de familias botánicas diferentes.

SITUACION Y EMPLAZAMIENTO DE LOS SONDEOS

La toma de 12 muestras se ha efectuado en tres cortes en Almizaraque, Herrerías (Cuevas de Almanzora) en la provincia de Almería.

(*) 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.

La altitud de la zona es inferior a los 100 metros sobre el nivel del mar.

Las coordenadas de los emplazamientos de los sondeos son:

Lat. 37° 15' 57" N

Long. 01° 47' 11" O

En la zona este corte A-1 se han extraído tres muestras (tabla I).

En el corte 2-B norte se han sacado muestras a las siguientes profundidades: 110, 85, 60, 45 y 35 cm. (tabla II).

En el corte 12 oeste, las muestras han sido extraídas a unas profundidades de 80, 60, 40 y 20 cm. (tabla III).

TABLA I
Perfil este. Corte A-1

TAXONES	NIVELES					
	A		B		C	
	Núm.	%	Núm.	%	Núm.	%
Portulacaceae	0	0,00	0	0,00	200	98,52
Salicaceae ≥ 20 micras	200	100,00	0	0,00	0	0,00
Salicaceae < micras	0	0,00	200	100,00	0	0,00
Umbellyphereae	0	0,00	0	0,00	3	1,48
TOTAL pólenes	200	100,00	200	100,00	203	100,00

TABLA II
Perfil norte. Corte 2-B

TAXONES	NIVELES							
	—110 cm.		—85 cm.		—60 cm.		—45 cm.	
	Núm.	%	Núm.	%	Núm.	%	Núm.	%
Compositae	4	3,20	13	21,67	0	0,00	0	0,00
Chenopodiaceae	5	4,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Gramineae	27	21,60	25	41,67	100	100	100	100
Geraniaceae	4	3,20	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Leguminosae	0	0,00	15	25,00	0	0,00	0	0,00
Portulacaceae	15	12,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Salicaceae	30	24,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Scrophulariaceae	20	16,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Sparganiaceae	1	0,80	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Ulmaceae	5	4,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Umbellyphereae	6	4,80	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Varia	8	6,40	7	11,67	0	0,00	0	0,00
TOTAL pólenes	125	100	60	100	100	100	100	100

TABLA III
Perfil oeste. Corte 12

TAXONES	N I V E L E S							
	-80 cm.		-60 cm.		-40 cm.		-20 cm.	
	Núm.	%	Núm.	%	Núm.	%	Núm.	%
Anacardiaceae	0	0,00	5	5,56	0	0,00		estéril
Asclepiadaceae	0	0,00	20	22,22	0	0,00		"
Aspleniaceae	0	0,00	3	3,33	0	0,00		"
Caryophyllaceae	7	13,73	16	17,78	0	0,00		"
Compositae	0	0,00	0	0,00	15	8,93		"
Chenopodiaceae	0	0,00	0	0,00	7	4,17		"
Gereniaceae	5	9,80	11	12,22	0	0,00		"
Gramineae	0	0,00	8	8,89	100	59,52		"
Plantaginaceae	0	0,00	11	12,22	7	4,17		"
Plumbaginaceae	6	11,76	0	0,00	15	8,93		"
Salicaceae... ..	2	3,92	0	0,00	0	0,00		"
Sinopteridaceae	0	0,00	3	3,33	0	0,00		"
Scrophulariaceae... ..	0	0,00	0	0,00	16	9,52		"
Urticaceae	26	49,02	0	0,00	0	0,00		"
Varia	6	11,76	13	14,44	8	4,76		"
TOTAL pólenes ...	51	100	90	100	168	100		estéril

ANALISIS POLINICO

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

Las muestras fueron teñidas con safranina.

Se ha utilizado un microscopio óptico x500 y x1000 aumentos con aceite immersioneel, se ha estudiado las láminas delgadas con pólenes móviles y sellados correspondientes de cada nivel. Se ha realizado la determinación y recuento de los granos de polen de las especies arbóreas y no arbóreas pertenecientes a los diferentes niveles muestreados.

Los pólenes fueron clasificados principalmente por las claves de MOORE y WEBB (1978), REX SAWYER (1981), con asistencia adicional de las fotos de ERDTMAN (1961-1963), FAEGRI e IVERSEN (1975), Atlas Polínico de Andalucía Occidental (1987) y la Palinoteca.

Los porcentajes de las casi 30 familias botáni-

cas, contenidas en los sedimentos de los diferentes niveles, están incluidos en las tablas I, II, III y figuras 1, 2, 3 y 4.

RESULTADOS

En Almizaraque, las muestras correspondientes al corte A-1 son un ejemplo de las limitaciones del medio en cuanto al contenido polínico se refiere, en ellas no se encuentra un espectro polínico completo, los índices de representatividad son muy bajos y por ello se deduce que el medio es geomorfológicamente dinámico. El número y clase de los pólenes encontrados no es el de los árboles y plantas que podía haber en los alrededores del área de estudio, sino que la zona corresponde al lugar de formación de sedimentos próxima a la desembocadura de un río.

La formación de estos sedimentos fue originada por los aportes de tipo fluvial, que tuvieron lugar en momentos en los que el cauce y el caudal del

HERRERIAS: PERFIL NORTE Corte 2-B

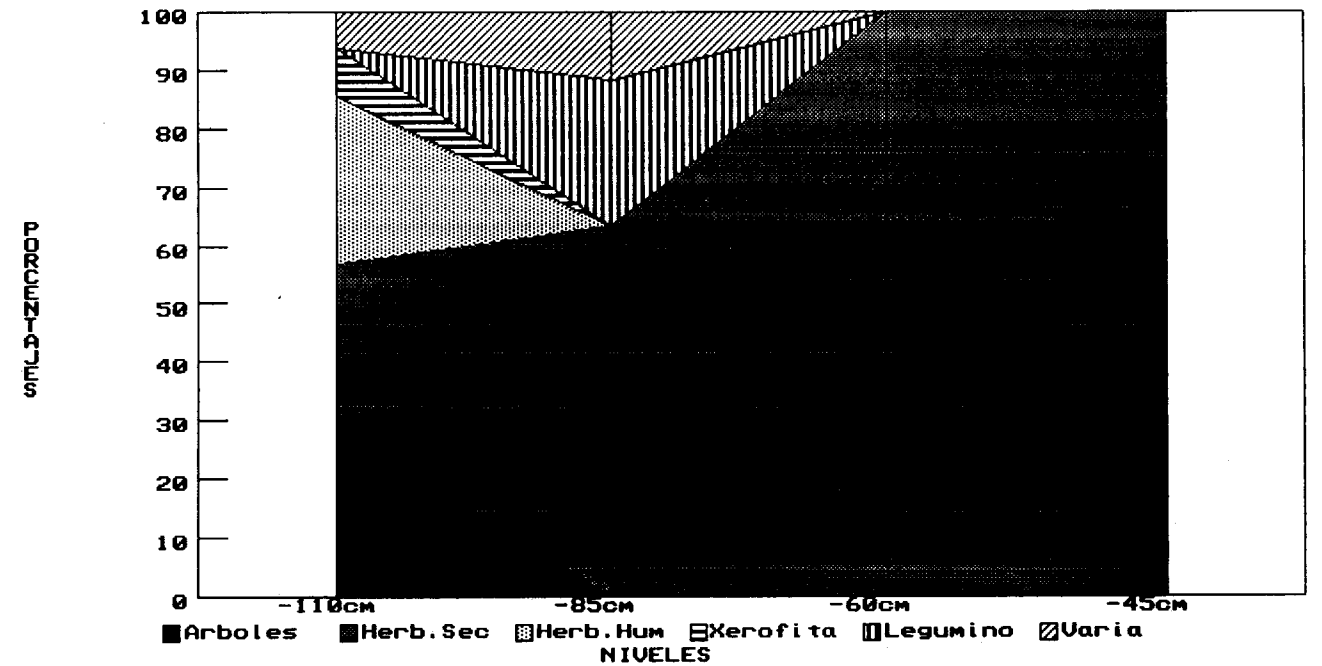


Figura 1.

HERRERIAS: PERFIL NORTE Corte 2-B

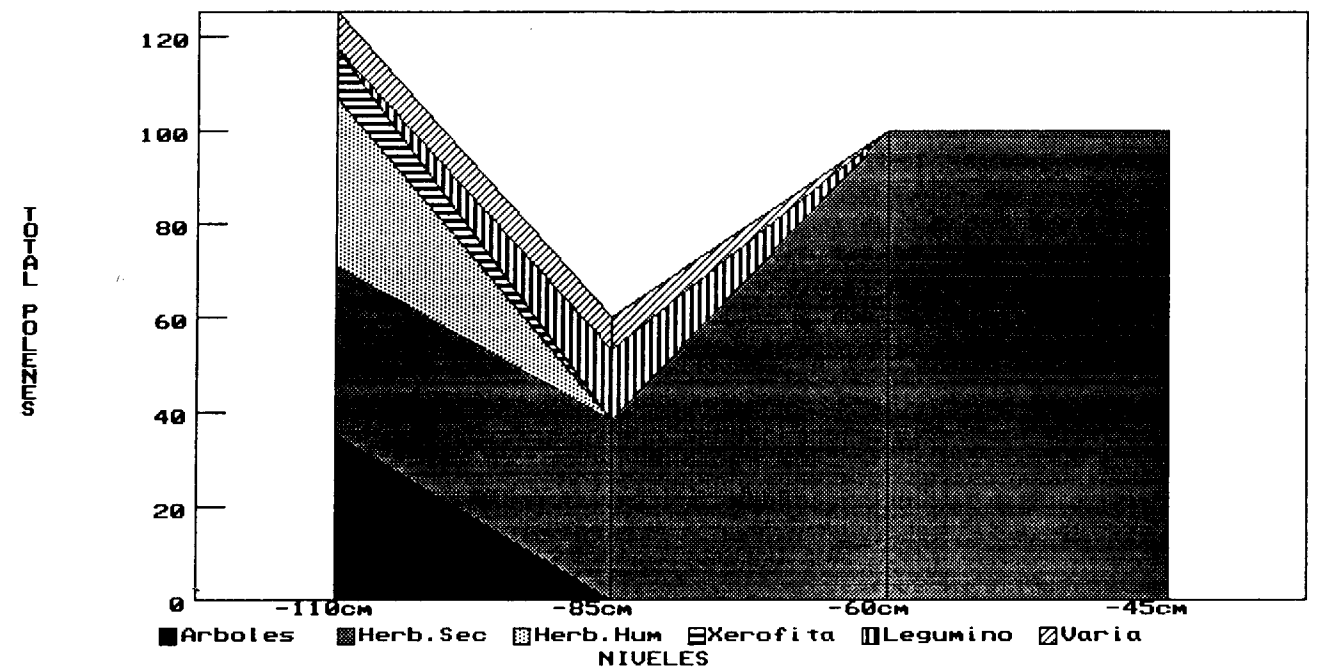


Figura 2.

HERRERIAS: PERFIL NORTE Corte 2-B

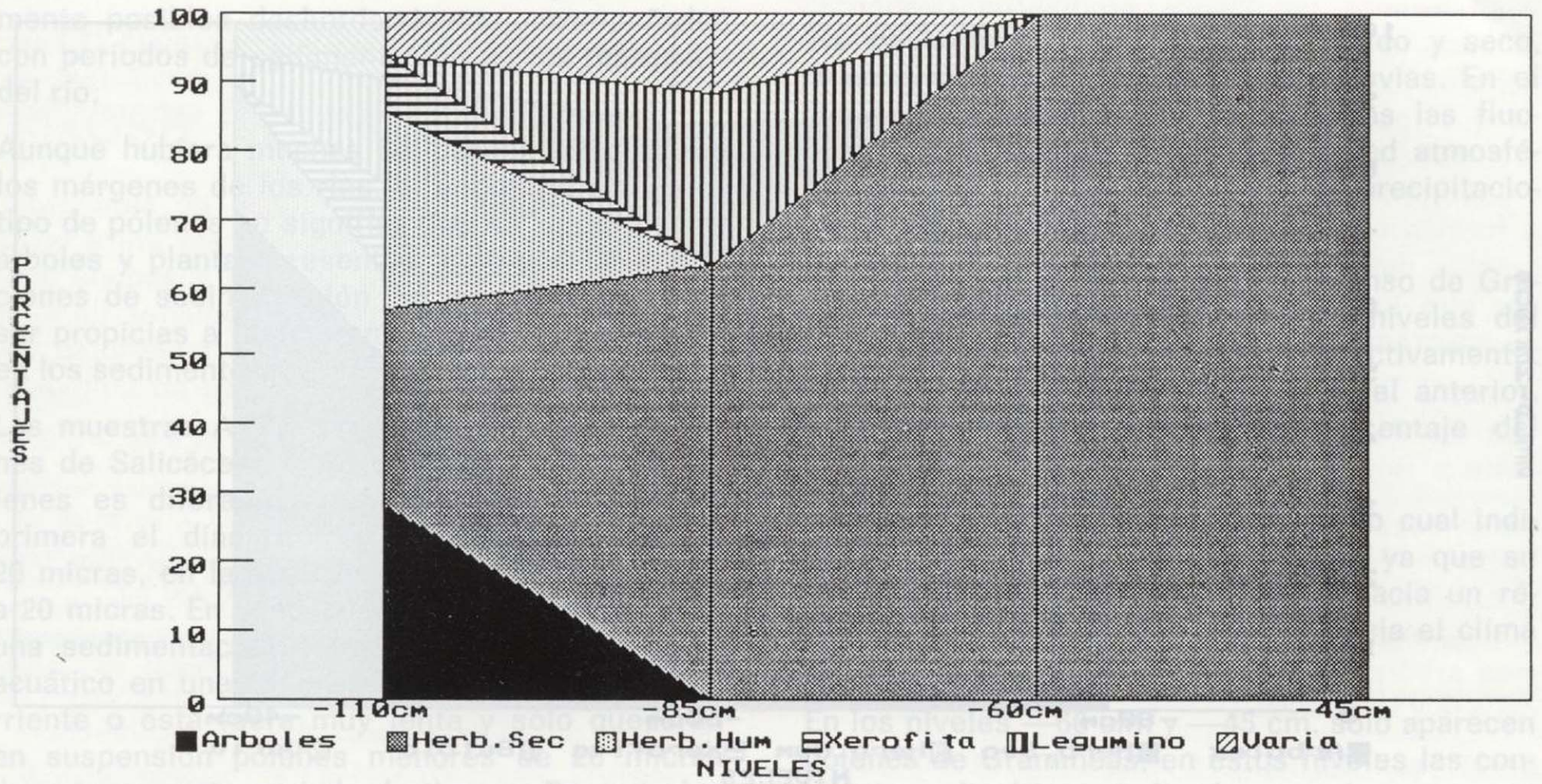


Figura 1.

HERRERIAS: PERFIL NORTE Corte 2-B

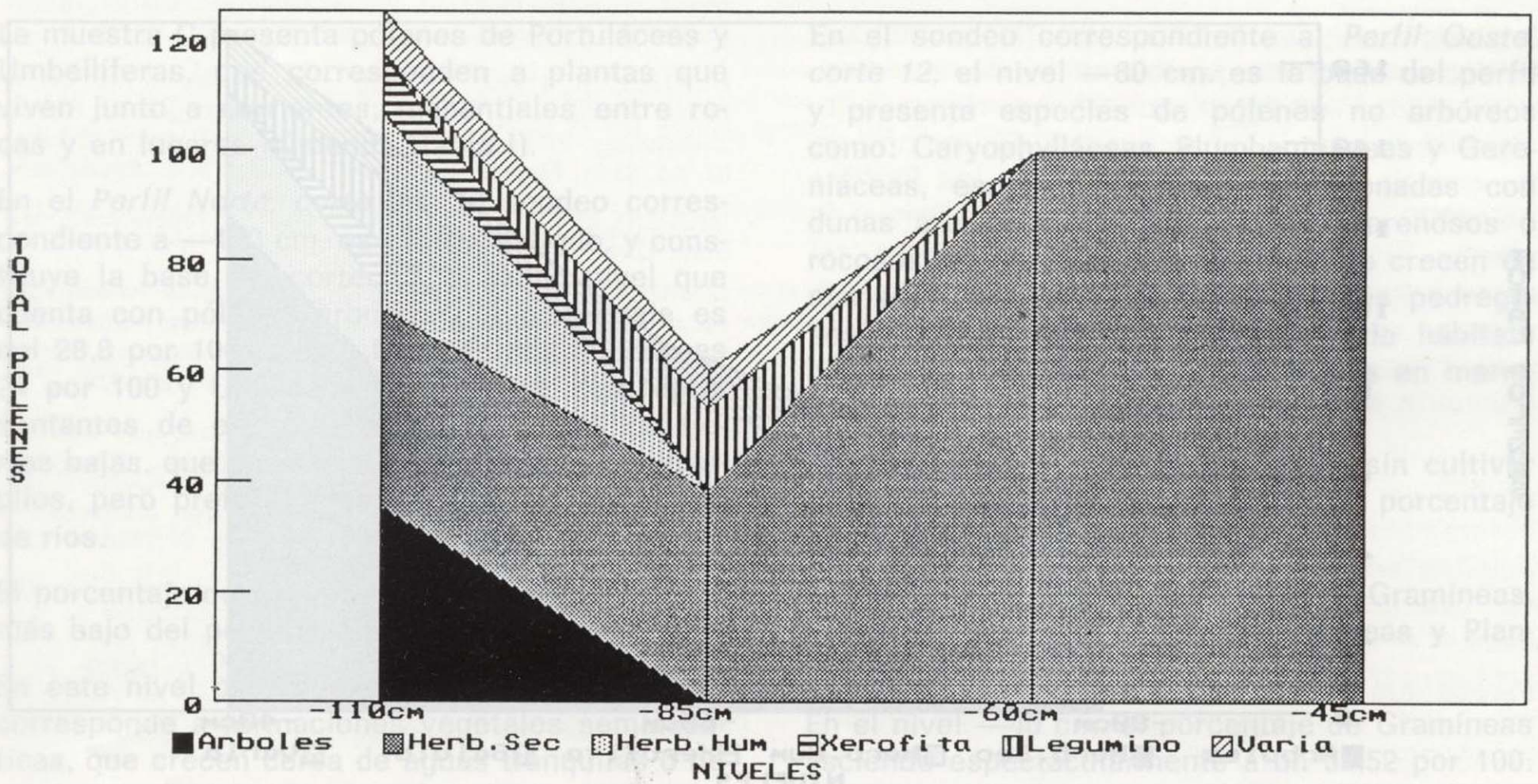


Figura 2.

HERRERIAS: PERFIL OESTE Corte 12

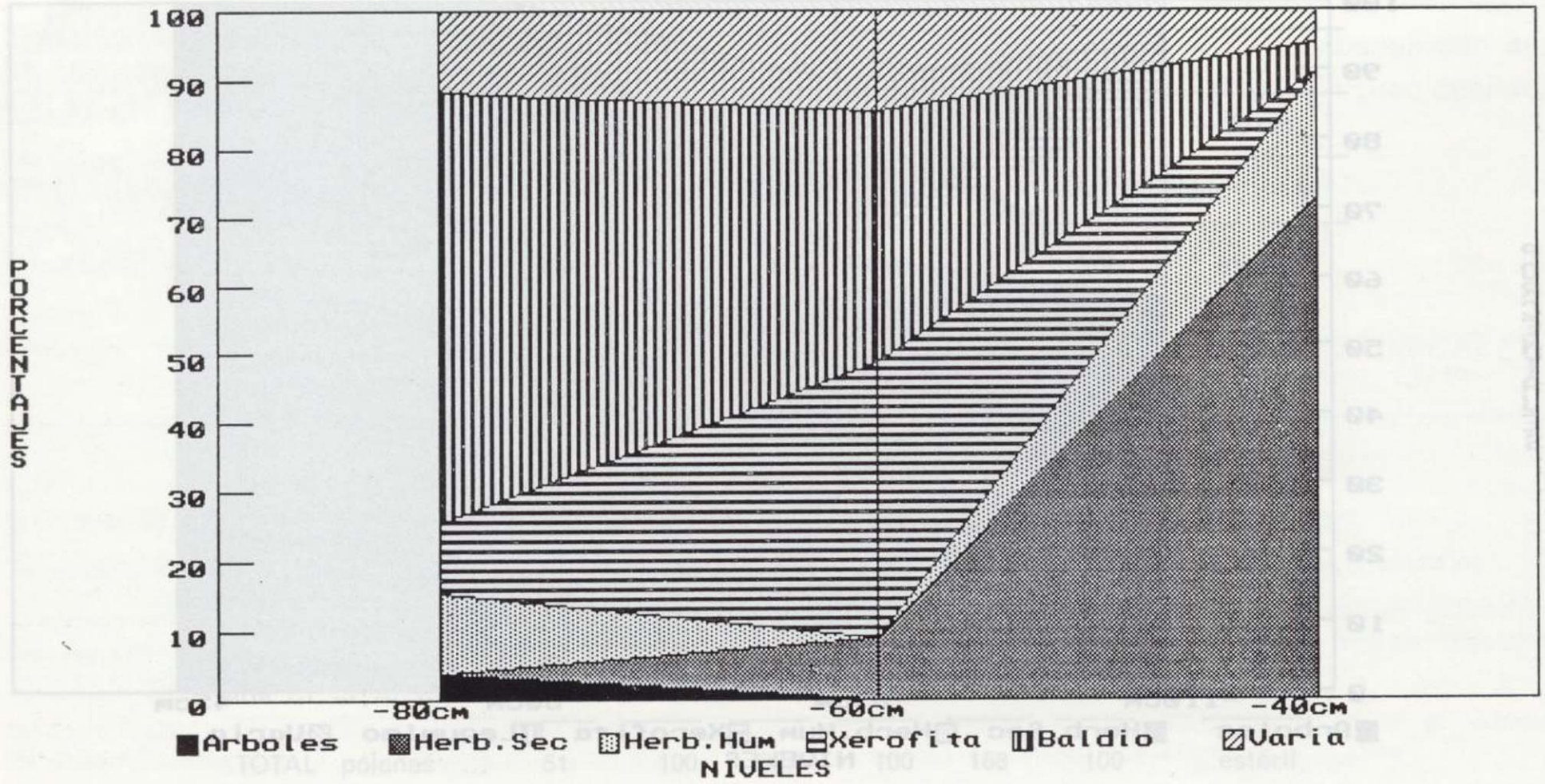


Figura 3.

HERRERIAS: PERFIL OESTE Corte 12

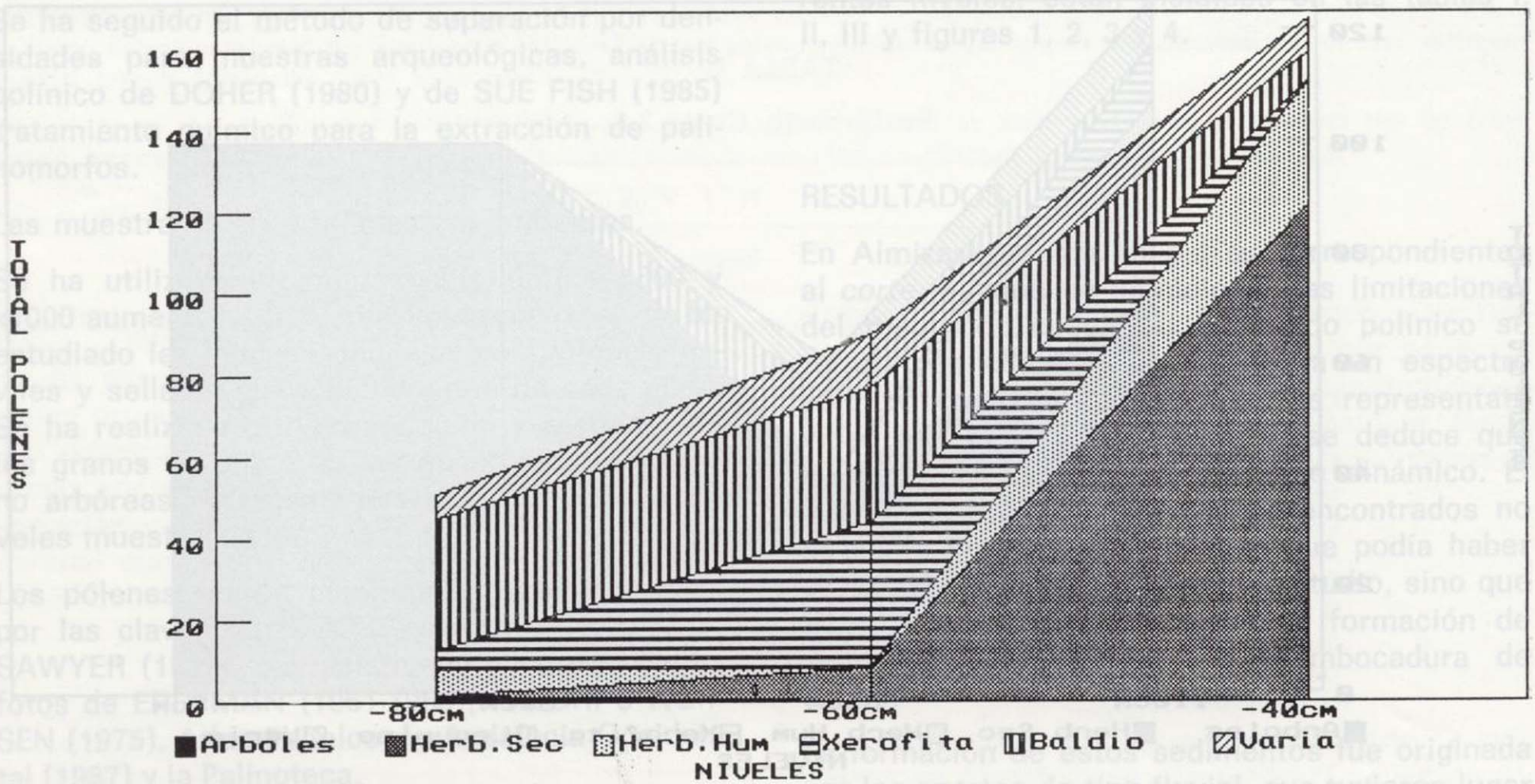


Figura 4.

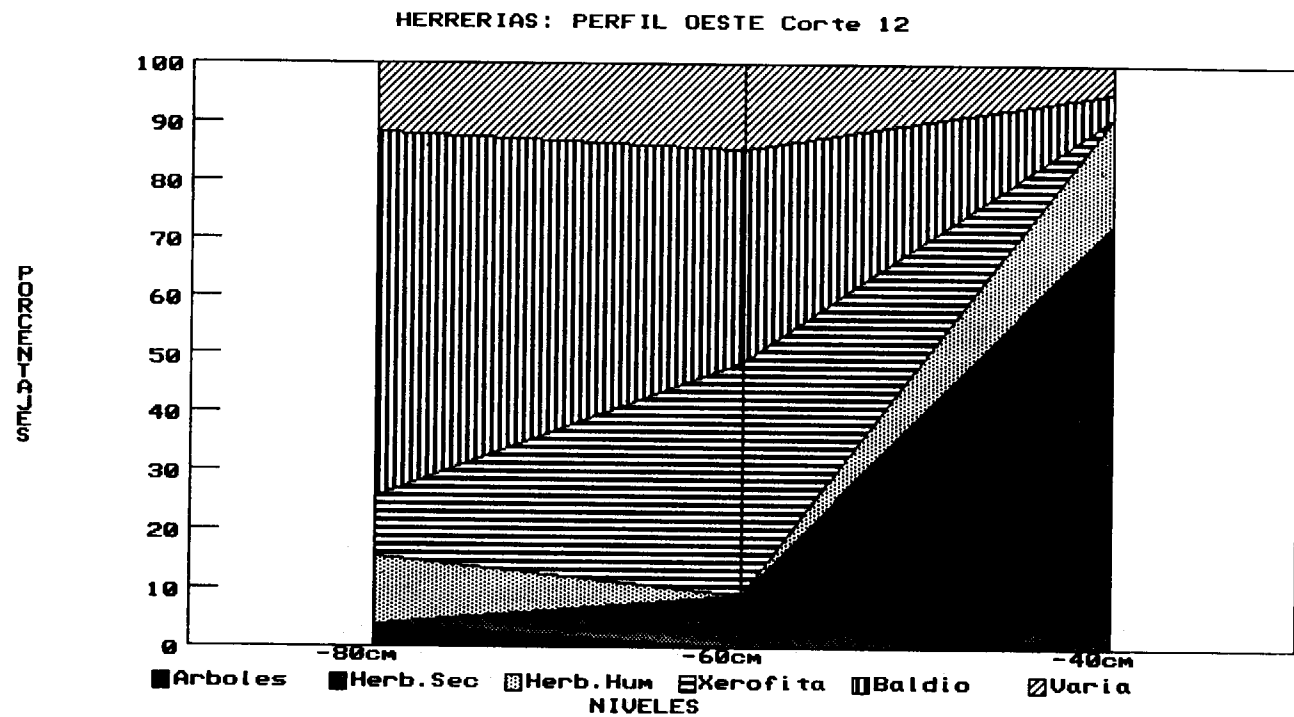


Figura 3.

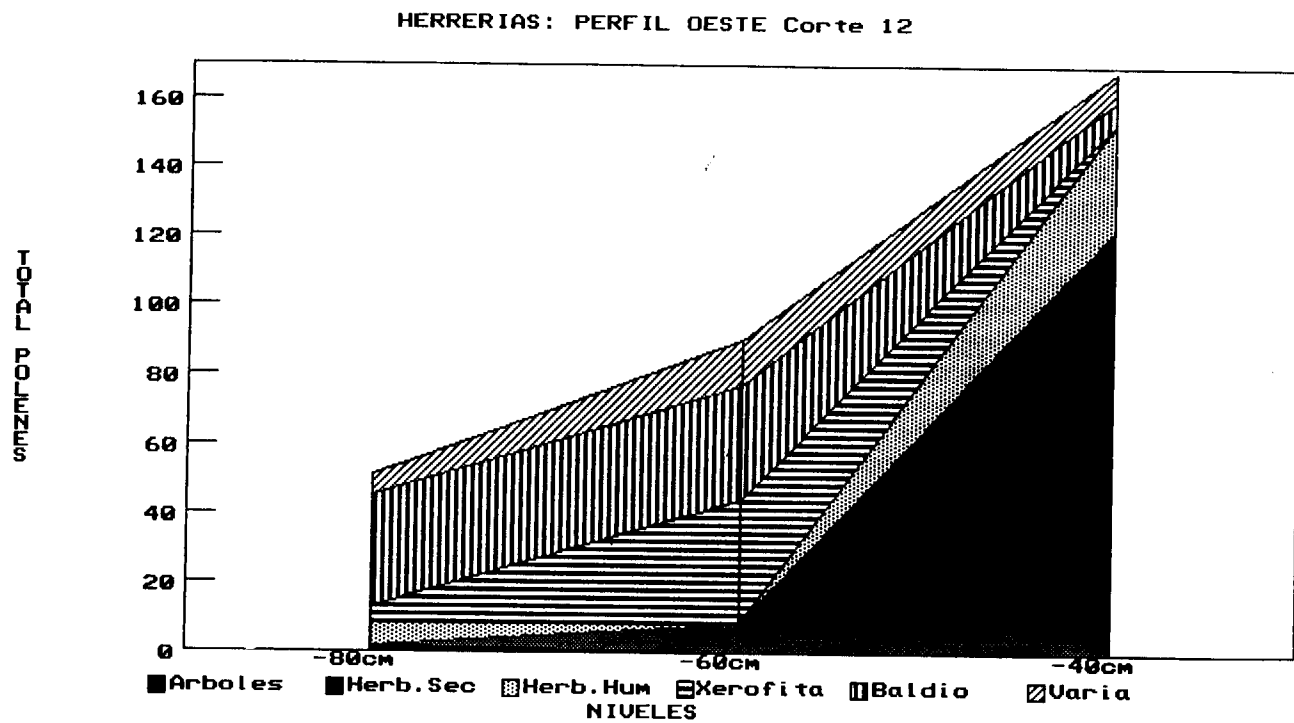


Figura 4.

río debía aumentar considerablemente. Se producirían cambios en la corriente, y posteriormente posibles desbordamientos, acompañados con períodos de sedimentación en los márgenes del río.

Aunque hubiera muchas Salicáceas (álamos) en los márgenes de los ríos, el encontrar sólo este tipo de pólenes no significa que no hubiera otros árboles y plantas presentes, sino que las condiciones de sedimentación del medio no debieron ser propicias a la permanencia de otros pólenes en los sedimentos.

Las muestras A y B presentan cientos de pólenes de Salicáceas, pero el tamaño de estos pólenes es diferente en ambas muestras, en la primera el diámetro de éstos es superior a 20 micras, en la segunda el diámetro es inferior a 20 micras. En consecuencia, podría tratarse de una sedimentación polínica en un medio semiacuático en una zona en la que no existiera corriente o ésta fuera muy lenta y sólo quedarán en suspensión pólenes menores de 20 micras durante un corto período de tiempo. Por esto los procesos sedimentarios pueden modificar los índices de representatividad del espectro polínico y también porque en zonas lacustres el contenido polínico depende de los índices de dispersión del polen (JACKSON, S. T., 1990).

La muestra C presenta pólenes de Portuláceas y Umbelíferas, que corresponden a plantas que viven junto a corrientes, manantiales entre rocas y en lugares húmedos (tabla I).

En el Perfil Norte, corte 2-B, el sondeo correspondiente a -110 cm. es el más antiguo, y constituye la base del corte. Es el único nivel que cuenta con pólenes arbóreos, el porcentaje es del 28,8 por 100, y está formado por Salicáceas 24 por 100 y Ulmáceas 4,8 por 100, son representantes de especies arbóreas típicas de tierras bajas, que corresponden a hábitats muy amplios, pero preferentemente próximos a riberas de ríos.

El porcentaje de Gramíneas, 21,60 por 100, es el más bajo del perfil (tabla II).

En este nivel parece que el tipo de vegetación corresponde a formaciones vegetales semiacuáticas, que crecen cerca de aguas tranquilas o de corrientes lentas, en acequias, junto a charcas y lagos, y en hábitats pantanosos, con fangos

y arenas húmedas, como son las Portuláceas, Scrofulariáceas, etc.

No obstante el clima debía ser cálido y seco, aunque se produjeran abundantes lluvias. En el período Subboreal son muy acusadas las fluctuaciones climáticas y la inestabilidad atmosférica, sobre todo con respecto a las precipitaciones (FONT TULLOT, I, 1988).

El nivel -85 cm. representa el ascenso de Gramíneas y Compuestas, hasta unos niveles del 41,67 por 100 y 21,67 por 100, respectivamente. Las Leguminosas, ausentes en el nivel anterior, aparecen con el espectacular porcentaje del 25 por 100.

Desaparecen las plantas higrofitas, lo cual indica una etapa de menor pluviosidad, ya que su extinción puede indicar un cambio hacia un régimen menos lluvioso; en consecuencia el clima sería caluroso y seco.

En los niveles -60 cm. y -45 cm. sólo aparecen pólenes de Gramíneas, en estos niveles las condiciones climáticas, indicadas anteriormente, se intensifican. El máximo desarrollo de Gramíneas puede coincidir con un período de sequedad o aridez, y el clima, por lo tanto podría estar incluido en el de tipo mediterráneo semiárido, como el actual en esa zona almeriense.

En el sondeo correspondiente al Perfil Oeste, corte 12, el nivel -80 cm. es la base del perfil y presenta especies de pólenes no arbóreos como: Caryophylláceas, Plumbagináceas y Geraniáceas, especies vegetales relacionadas con dunas arenosas blandas y lugares arenosos o rocosos próximos al mar, plantas que crecen en marismas turbias y arenosas, lugares pedregosos y arenas móviles. Matorrales de hábitats abiertos, con sequedad, sobre rocas en marismas saladas y en bordes rocosos.

Las Urticáceas, comunes en tierras sin cultivar y baldíos, en este nivel, alcanzan un porcentaje muy importante, 49,02 por 100.

En el nivel -60 cm. aparecen las Gramíneas, 8,89 por 100, junto con Asclepiadáceas y Plantagináceas.

En el nivel -40 cm. el porcentaje de Gramíneas asciende espectacularmente a un 59,52 por 100. Aparecen Compuestas, Chenopodiáceas, etc. (tabla III).

CONCLUSIONES

Posiblemente las lluvias produjeron desbordamientos, zonas encharcadas en los márgenes del río, formando una zona húmeda estacional, ya que los pólenes arbóreos, *Perfil Este, corte A-1*, corresponden a Salicáceas y Ulmáceas, que crecen preferentemente cerca de ríos y arroyos, o forman corredores en las riberas, y los sedimentos están formados por limos y arcillas en los que se aprecia una decantación selectiva de los granos de polen.

Además los pólenes no arbóreos encontrados son de Portuláceas y Umbellíferas, que viven junto a ríos y lugares húmedos.

En la base del *Perfil Norte, corte 2-B*, también aparecen plantas higrofitas, como Portuláceas y Scrofulariáceas que crecen cerca de aguas tranquilas. Asimismo encuentran pólenes de especies arbóreas como las del corte anterior: Salicáceas y Ulmáceas.

En la base del *Perfil Oeste, corte 12*, aparecen pólenes de vegetales relacionados con dunas arenosas blandas como Plumbagináceas y Geraniáceas, éstas proliferan en lugares arenosos y rocosos próximos al mar, en marismas turbias, sobre rocas en marismas saladas y en bordes rocosos.

Posteriormente se produce una fluctuación climática acompañada, posiblemente, de una intensa actividad antrópica, que se manifiesta principalmente por los porcentajes de gramíneas. Se aprecia un cambio climático en los *Perfiles 2-B y 12*, por la desaparición de los pólenes de plantas higrofitas y de especies arbóreas así como por el incremento extraordinario de Gramíneas, aparecen Leguminosas y Compuestas, y destaca la presencia de malas hierbas, posiblemente el clima sería seco y caluroso.

Por último, es patente en los niveles superiores de los perfiles una tendencia general hacia la deforestación como indica la desaparición de pólenes arbóreos y por la destacada presencia de Gramíneas, Plantagináceas y Chenopodiáceas.

Parece que a un período de lluvias estacionales, durante el Subboreal (Holoceno), sucede otro de menor pluviosidad y posteriormente el clima cá-

lido y seco tendería hacia una etapa semiárida con períodos de sequías.

La actividad antrópica aparece después del período de las lluvias y se prolonga hasta que las condiciones climáticas fueron de extraordinaria sequedad.

Posiblemente las características de semiaridez del clima y las sequías pudieron ser entre otras causas lo que motivó, en parte, el abandono temporal de esta zona, ya que los pólenes de Gramíneas presentes en los niveles superiores corresponden a vegetación regresiva no cultivada.

REFERENCIAS

ERDTMAN, G. (1971): *Pollen Morphology and Plant Taxonomy*. Hafner Publishing Co. New York, 450 pp.

DELIBES, G.; FERNANDEZ MIRANDA, M.; FERNANDEZ POSSE, M. D., y MARTIN MORALES, C. (1986): *El poblado de Almizaraque*. Homenaje a Luis Siret (1934-1984). Consejería de cultura de la Junta de Andalucía, 167-177.

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, 297 pp.

JACKSON, S. T. (1990): *Pollen source area and representation in small lakes of the Northeastern United States*. Review of Paleobotany and Palynology, vol. 63, 53-76.

HUNTLEY, B. (1990): *Studying global change: the contribution of Quaternary palynology*. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology (Global and planetary change), 82, pp. 53-61. Elsevier Science Publishers B. V. Amsterdam.

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

MARISCAL, B. (1986): *Reconstrucción de la Paleoflora y de la Paleoclimatología durante el Holoceno*. Quaternary Climate in Western Mediterranean. Symposium on Climate Fluctuations during the Quaternary. Madrid, 205-220.

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

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

REX SAWYER (1981): *Pollen identification*. University College, Cardiff Press, 110 pp.

VADES, B.; DIEZ, M. J., y FERNANDEZ, I. (1987): *Atlas Polínico de Andalucía Occidental*. Instituto de Desarrollo Regional núm. 43. Universidad de Sevilla. Diputación de Cádiz, 450 pp.

Original recibido: Mayo de 1992.

Original aceptado: Diciembre de 1992.

Contribución al estudio del color del granito «Rosa Porriño».

Por A. VERGARA PARDEIRO (*)

RESUMEN

Se han analizado por microscopía óptica (MO), microsonda electrónica (EPMA), difracción de rayos X (XRD), fluorescencia de rayos X (XRF), espectrometría de plasma de acoplamiento inductivo (ICP-AES) y espectrometría de absorción atómica (AAS) muestras de dos variedades de granito. El material procede de las canteras situadas en el plutón de Porriño (Pontevedra) y está comercializado con el nombre de «Rosa Porriño». El objetivo del trabajo ha sido tratar de conocer el origen del color rosa que da nombre a este granito. Después de la separación y análisis de los granos minerales con tamaños comprendidos entre 0,5 y 1 mm, se llega a la conclusión de que el color rosa depende de dos factores:

- i) Existencia de finas lamelas y pequeñas inclusiones rojizas ferríferas en granos de cuarzo y feldespato como ya se ha observado y citado en otros granitos.
- ii) Presencia de esta coloración en algunos de los granos de feldespato, tanto de microclina como de albita, sin evidencia de microinclusiones ferríferas con un límite de tamaño de 4 μ .

Palabras clave: Granito, «Rosa Porriño», Albita, Microsonda.

ABSTRACT

Different analytical techniques - optical microscopy (OM), electron probe microanalysis (EPMA), X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence (XRF), inductively coupled plasma - atomic emission spectrometry (ICP-AES) and atomic absorption spectrometry (AAS) - have been applied to samples of two varieties of granite. The material comes from quarries located in the Porriño pluton (Pontevedra, NW Spain). The aim of this study is to know better the origin of the pinkish rock colour. After separation and analysis of the mineral grains, 0.5 to 1 mm in size, it is printed out that the colour depend upon two main factors:

- i) Ferriferous thin red lamellae and minute cloudy inclusions in some quartz and feldspars grains. This fact has been observed and depicted in other granites.
- ii) Some feldspars (microcline, albite) grains have a homogeneous pink colour. No evidence of microinclusions or lamellae, with a lower detection size of about 4 μ m was found.

Key words: Granite, «Rosa Porriño», Albita, Electron Microprobe.

INTRODUCCION

La industria española de la Piedra Natural (roca ornamental, «Natural Stone, Dimension Stone») es la segunda del mundo en volumen económico (251.500 millones de pesetas en 1990) y supone cerca del 18 por 100 del valor de la producción minera nacional. Se extraen y comercializan gran

número de rocas, varias de ellas con renombre internacional. Así, cabe citar las denominadas «Negro Marquina», que es una caliza marmórea, «Blanco Macael», mármol y pizarra tipo «Valdeorras». Entre las rocas ígneas, el granito «Rosa Porriño» (1) es el más conocido internacionalmente. Este granito posee grano grueso a muy grueso y presenta un vistoso color rosado, características estas que junto con su buen comportamiento físico-mecánico y resistencia a la

(*) Instituto Tecnológico Geominero de España. Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid.

alteración, hacen que tenga una buena aceptación en el mercado.

Las canteras donde se explota están situadas en el sector occidental del Macizo de Porriño, que aflora con contorno ovoide de unos 25 x 15 Km. al SO de la provincia de Pontevedra. Este macizo es un gran cuerpo plutónico formado en el tránsito entre los periodos Carbonífero y Pérmico, durante la última etapa térmica de la orogenia Hercínica, hace unos 287 millones de años (2).

Geológicamente y según la clasificación de rocas graníticas propuesta por BELLIDO et al. (3), el Macizo de Porriño entra dentro del grupo III: granitoides postcinemáticos de emplazamiento somero. Dentro de él se diferencian tres facies litológicas (4), de las que sólo la denominada Facies A interesa para el presente trabajo. Esta facies aflora en forma de banda de unos 2 Km. de anchura en el borde O del macizo.

Texturalmente, dicha facies se caracteriza por ser bastante equigranular y químicamente por ser rica en componentes potásicos, lo cual la diferencia de las otras dos, que presentan texturas con grandes diferencias en el tamaño de los cristales (textura porfídica) y son menos potásicas. La composición mineralógica de la Facies A es la siguiente: cuarzo, feldespato potásico (microclima), albita y biotita como minerales mayoritarios; apatito, circón, allanita, titanita, fluorita y opacos, como minoritarios; y clorita, moscovita y epidota como fases alteradas.

Sobre este granito se ha centrado el estudio, que ha consistido fundamentalmente en el análisis de los feldespatos para intentar aclarar las causas del color rosado que presentan.

PARTE EXPERIMENTAL

Origen, preparación y estudio previo de las muestras

La roca analizada procede de dos plaquetas, de tamaño 30 x 30 x 2 cm, pulidas por una cara, de dos de las variedades comerciales de «Rosa Porriño». La variedad conocida por 1A presenta un tono rosado más intenso que la variedad conocida por 1C.

Mediante inspección ocular se constató que la mayoría de los cristales de feldespato presen-

tan color rosado, siendo éstos algo menos abundantes en la variedad 1C, lo cual explica su tono rosado general más pálido.

La superficie pulida de las plaquetas se sometió también a observación con lupa binocular de hasta 25 X.

Como determinación previa, de cada una de las plaquetas se cortó con sierra de disco adiamantado un fragmento de 12 x 4 cm, una de cuyas caras mayores se tiñó para conocer la naturaleza de los feldespatos (feldespato potásico o plagioclasa). Se atacaron dichas caras con HF por inmersión durante 30 seg., introduciéndose a continuación en una disolución de cobaltinitrito sódico durante 4 minutos, con lo que los cristales de feldespato potásico de las caras atacadas se tiñeron de amarillo (fig. 1).

La observación de ambas probetas llevó a los siguientes resultados:

- La mayor parte del feldespato rosado de la roca es feldespato potásico, el cual es claramente predominante en porcentaje sobre la plagioclasa.
- Gran parte de la plagioclasa es blanca, aunque existe un porcentaje significativo de cristales de este mineral de tonos rosados.
- En la variedad 1A se observa que la plagioclasa presenta un mayor porcentaje de cristales de feldespato rosados que en la variedad 1C, y un porcentaje ligeramente menor de cristales de cuarzo.

La coloración rosada del feldespato potásico había sido ya citada en la bibliografía consultada (5, 6), pero no así la de la plagioclasa, por lo que el estudio se centró principalmente en ella.

Otra parte de la muestra se molió en mortero de ágata y se tamizó, seleccionándose la fracción granulométrica comprendida entre 0,5 y 1,0 mm. Dicha fracción se sometió a la acción de un campo magnético de 1,7 A de intensidad, para separar la biotita. Realizado el proceso anterior, el material se sometió a separación gravimétrica por líquidos densos, en una mezcla de bromoformo y acetato de isoamilo (densidad = 2,6 g/cm³) para dividirla en dos nuevas fracciones, de diferente densidad:

- Fracción pesada (FP), constituida por cuarzo,

Figura 1.—El granito Rosa Porriño pulido (izquierda) y teñido (derecha).



A



B

Figura 4.—Micrografías de las zonas blancas y rosas analizadas.

Figura 1.—El granito Rosa Porriño pulido (izquierda) y teñido (derecha).



A

Figura 4.—Micrografías de las zonas blancas y rosas analizadas.



B



Figura 6.—Micrografía correspondiente a dos granos de albita rosa y blanca.



Figura 7.—Micrografía de una zona de la muestra con inclusiones rojas.



Figura 9 A.—Micrografía de un grano con inclusiones rojas y su correspondiente imagen de electrones retrodispersados.



Figura 6.—Micrografía correspondiente a dos granos de albita rosa y blanca.

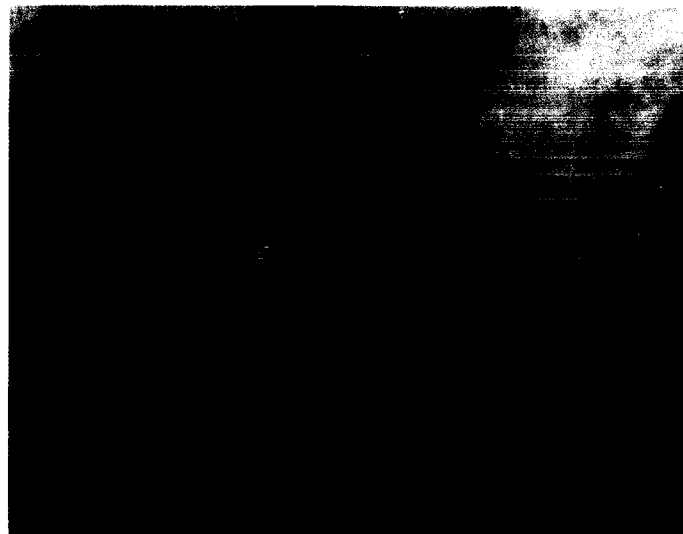


Figura 7.—Micrografía de una zona de la muestra con inclusiones rojas.

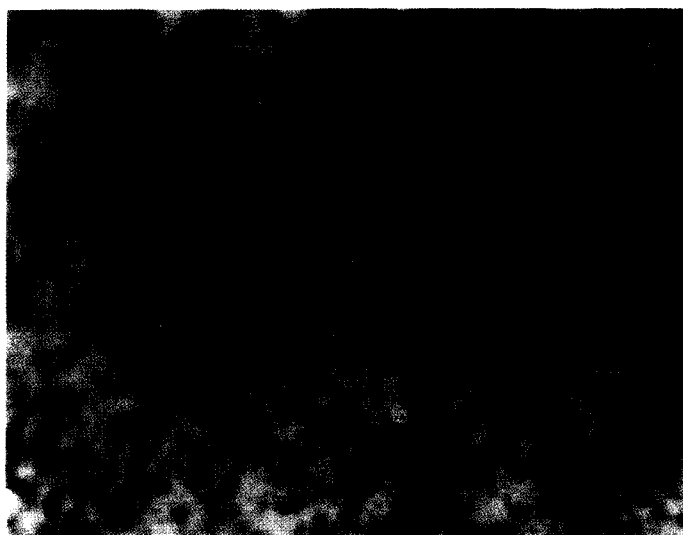


Figura 9 A.—Micrografía de un grano con inclusiones rojas y su correspondiente imagen de electrones retrodispersados.

albita y algo de microclima procedente de los granos mixtos.

- Fracción ligera (FL), constituida fundamentalmente por microclina y algo de albita, procedente de los mixtos.

Ambas fracciones se han analizado por difracción de rayos X (XRD). La figura 2 muestra los resultados correspondientes a la FP (difractograma A) y a la FL (difractograma B). Para evitar una concentración excesiva de símbolos, en estos y en posteriores difractogramas sólo aparecen marcadas las reflexiones más intensas o de mayor interés.

Posteriormente, se ha procedido a separar manualmente granos de feldespato blanco y de feldespato rosa en la FP, con ayuda de una lupa binocular, trabajando a 10-15 aumentos.

Análisis por microsonda electrónica

Mediante esta técnica se estudiaron las muestras preparadas de dos formas diferentes:

- Se cortaron trozos de plaqueta de 3 x 3 cm, cuya superficie pulida se sometió primero a observación bajo lupa binocular, marcándose con círculos las áreas a analizar por microsonda y a continuación se metalizaron con una capa de grafito de unos 200 Å de espesor.
- Los granos rosas y blancos obtenidos por separación manual se montaron sobre portamuestras de vidrio, mediante cinta adhesiva por sus dos caras y se metalizaron de forma análoga.

El equipo utilizado ha sido una microsonda electrónica modelo SEMQ2, provista de dos sistemas para el análisis de la radiación característica: cristales analizadores de dispersión de longitud de onda (WDS) y detector de estado sólido Si (Li) en dispersión de energías (EDS).

Las condiciones experimentales para el análisis cuantitativo por WDS han sido:

- Potencial acelerador de los electrones, 15 kV.
- Intensidad de corriente de sonda, 20 nA.
- Cristales analizadores, LiF (200), PET y TAP.
- Tiempos de medida, 10 s (pico) y 4 s (fondo).
- Patrones, Na (albita); Al (espinela); Si (cuarzo); K (ortosa); Ca (anhidrita) y Fe (hematites).
- Programa de corrección de datos, MAGIC IV.

Las condiciones experimentales para el análisis cualitativo por EDS han sido:

- Potencial analizador de los electrones, 25 kV.
- Intensidad de corriente de sonda, 1 nA.

Fluorescencia de rayos X

Los granos de feldespato rosa y feldespato blanco de separados manualmente de la FP, se analizaron también por esta técnica (FRX).

Se utilizó un espectrómetro Philips modelo PW 1404 en las siguientes condiciones experimentales:

- Potencial de excitación, 40 kV.
- Intensidad de corriente, 70 mA.

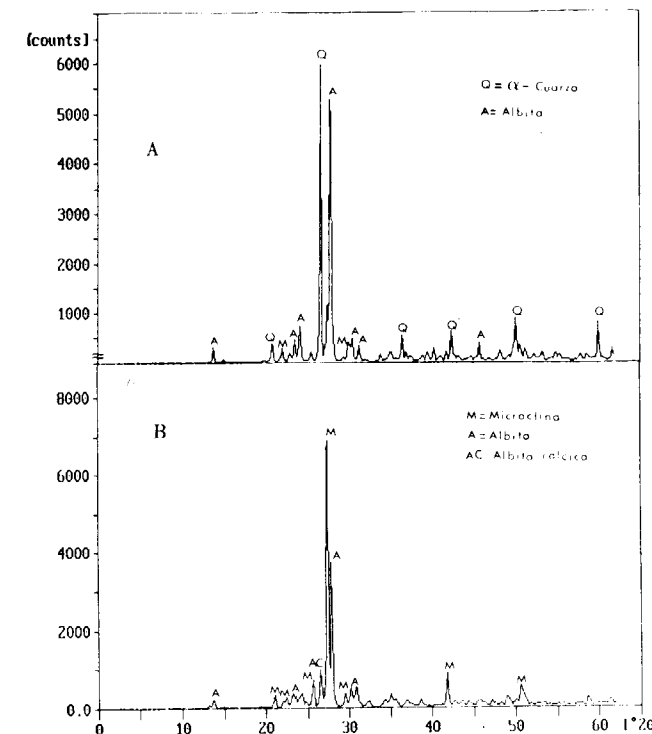


Figura 2.—Difractogramas correspondientes a la fracción pesada (A) y fracción ligera (B).

— Cristales analizadores, Si y Al (PET); Fe, Ti, K, Mn, y Ca (LiF 200); Mg (PX1); P (Ge).

Para minimizar el efecto matriz, las muestras se fundieron en crisol de platino con $Li_2B_4O_7$ en una perladora automática (relación material: fundente, 1:10).

Espectrometría de plasma

1 g de muestra de feldespato rosa y 1 g de feldespato blanco, separados manualmente de la FP, se analizaron por esta técnica.

Se ha utilizado un espectrómetro de plasma (ICP) Jarrell-Ash modelo ICAP-61 en las siguientes condiciones experimentales:

- Potencia inducida, 1,1 kW.
- Flujo del gas plasmógeno (Ar), 15 l/min.
- Flujo del gas de nebulización (Ar), 0,7 l/min.
- Caudal de aspiración, 2 ml/min.
- Tiempo de integración, 5 s.
- Altura de observación, 16 mm

Las muestras se atacaron con una mezcla de HNO_3 , $HClO_4$, y HF a $170^\circ C$ en reactores de teflón. El residuo procedente del ataque fue disuelto en HCl diluido en caliente. La solución resultante se aforó a 100 ml con agua destilada.

Resultados y discusión

La observación mediante lupa binocular de la superficie pulida de las muestras ha permitido detectar varios tipos de estructuras que contribuyen a la impresión visual del color de la roca. Estas son:

- a) Cristales de feldespato de color rosado homogéneo a esta escala de observación.
- b) Cristales de feldespato blanco con zonas ligeramente rosadas.
- c) Cristales pertitzados (por intercrecimiento de microclina y plagioclasa), en los cuales algunas zonas muestran tono rosa y otras no.
- d) Pequeñas manchas puntuales de color rojo oscuro a marrón, de contorno difuso, incluidas en algunos cristales de feldespato.

e) Estructuras lineales de color rojo-marrón que coinciden con pátinas que tapizan las caras de algunos cristales de cuarzo y feldespato o rellenan fracturas en los mismos.

Los primeros análisis realizados por EPMA de las estructuras tipo a), b) y c) indican que las zonas rosadas están constituidas indistintamente por plagioclasa (albita) o feldespato potásico (microclina). Las figuras 3 y 4 ofrecen espectros y micrografías de estas zonas.

En una segunda etapa y para ver si existen diferencias entre los cristales de albita blanca y de

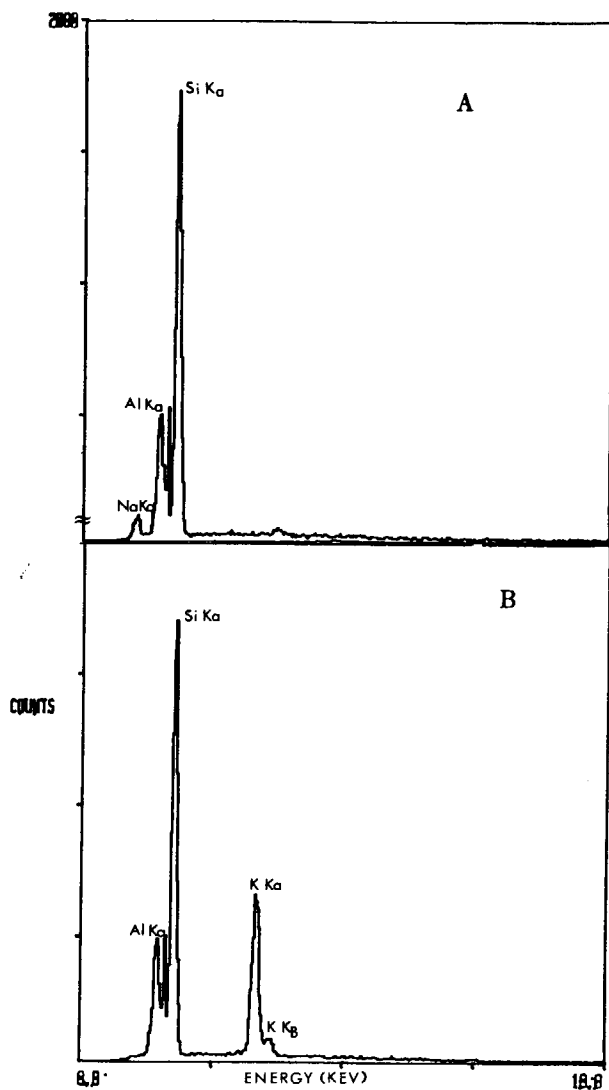


Figura 3.—Espectros por EPMA correspondientes a la albita (A) y a la microclina (B).

albita rosa, ambos tipos fueron analizados por XRD. Los difractogramas de ambos (fig. 5) son semejantes y se corresponden a un feldespato de esta composición y gran pureza.

Los análisis de plagioclasa blanca y rosa obtenidos por XRF e ICP aparecen reflejados en las tablas I y II. La tabla I incluye también un ejemplo de análisis por EPMA de cada uno de los dos tipos. Se deduce que la composición química de ambos es prácticamente igual. La única diferencia radica en que la plagioclasa blanca es más cálcica y menos potásica que la rosa. Pero ello no explica, en principio, la diferencia de color que hay entre ambas, muy evidente en casos como el que se muestra en la figura 6, que es una micrografía de dos granos de plagioclasa (rosa y blanco).

Según estos análisis, la composición mineralógica teórica de la plagioclasa de color rosa es $An_9Ab_{83}Or_{87}$, mientras que la blanca es $An_{15}Ab_{82}Or_{3}$, esto es, la primera se sitúa cerca del límite

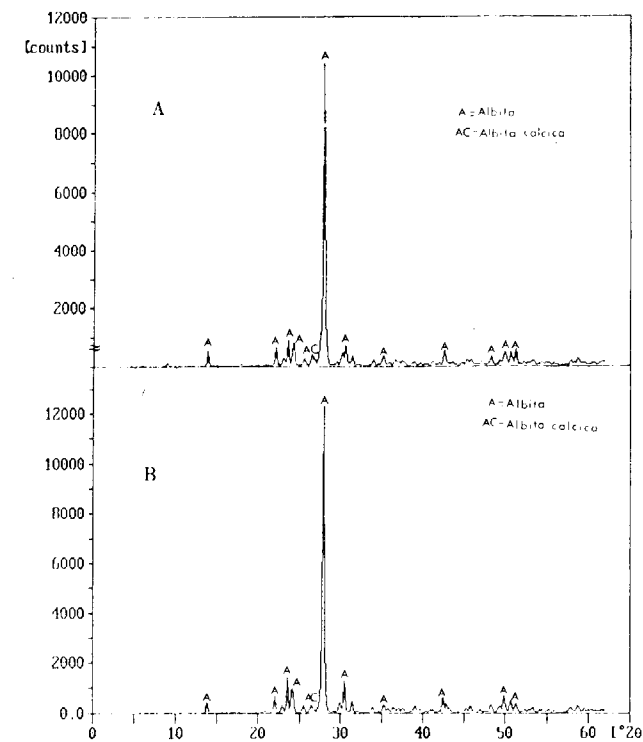


Figura 5.—Difractogramas correspondientes a la fracción albita rosa (A) y albita blanca (B).

oligoclasa-albita, mientras que la de color blanco es oligoclasa francamente.

En cuanto a las estructuras tipo d) y e) (fig. 7) de color rojo oscuro o marrón, una vez analizadas

TABLA I
Análisis químico de plagioclasas

	Granos rosas		Granos blancos	
	(1)	(2)	(1)	(2)
SiO ₂	64,13	66,59	63,19	64,61
Al ₂ O ₃	21,36	21,73	21,97	21,71
CaO	1,92	1,66	3,26	3,75
Na ₂ O	10,10	9,94	9,96	9,40
K ₂ O	1,44	0,92	0,61	0,21
Fe ₂ O ₃	0,23	0,35	0,13	
TiO ₂	0,01	NA	<0,01	NA
MgO	0,02	NA	0,02	NA
MnO	<0,01	NA	<0,01	NA
P ₂ O ₅	<0,01	NA	<0,01	NA

(1): Análisis por FRX excepto para Na₂O, que se realizó por AA.
(2): Ejemplo de análisis puntual por EPMA
NA: No analizado

TABLA II
Análisis químico de elementos traza por ICP en plagioclasas

	Granos rosas	Granos blancos
Ba	40	35
Be	7	8
Cu	ND	ND
Pb	16	16
Zn	6	8
Ni	4	5
Cr	ND	ND

por EPMA se ha encontrado que con toda probabilidad están constituidas por los siguientes minerales:

- Hematites.
- Hematites asociado a posible allanita.

La figura 8 ofrece los espectros de ambas composiciones y en la figura 9 se muestra una micrografía de un grano con inclusiones rojas y su imagen correspondiente de electrones retrodispersados.

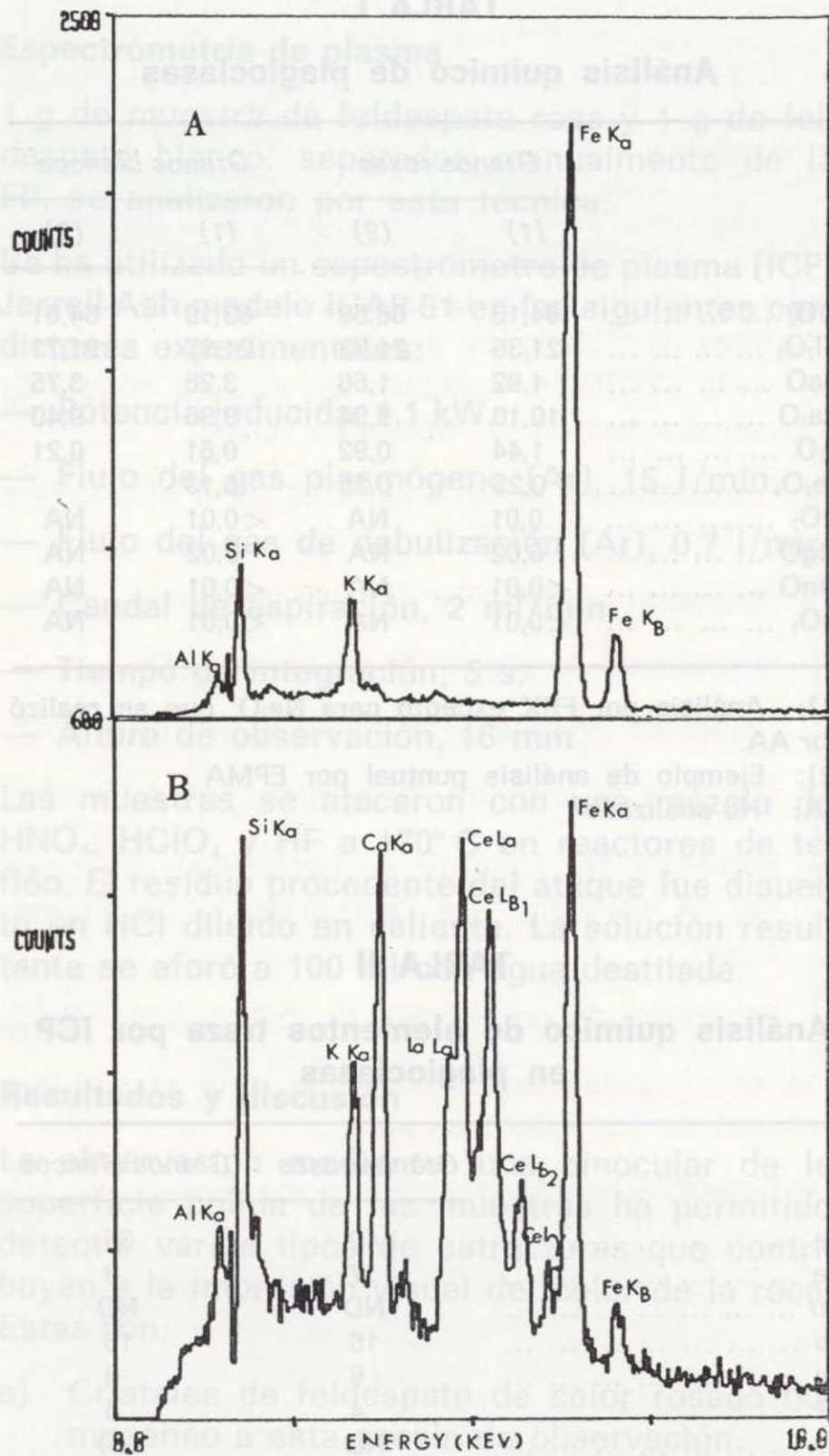


Figura 8.—Espectros por EPMA de inclusiones de hematites (A) y posible allanita con hematites (B).

CONCLUSIONES

El color rosado del granito «Rosa Porriño» debe ser atribuido a la suma de dos efectos visuales:

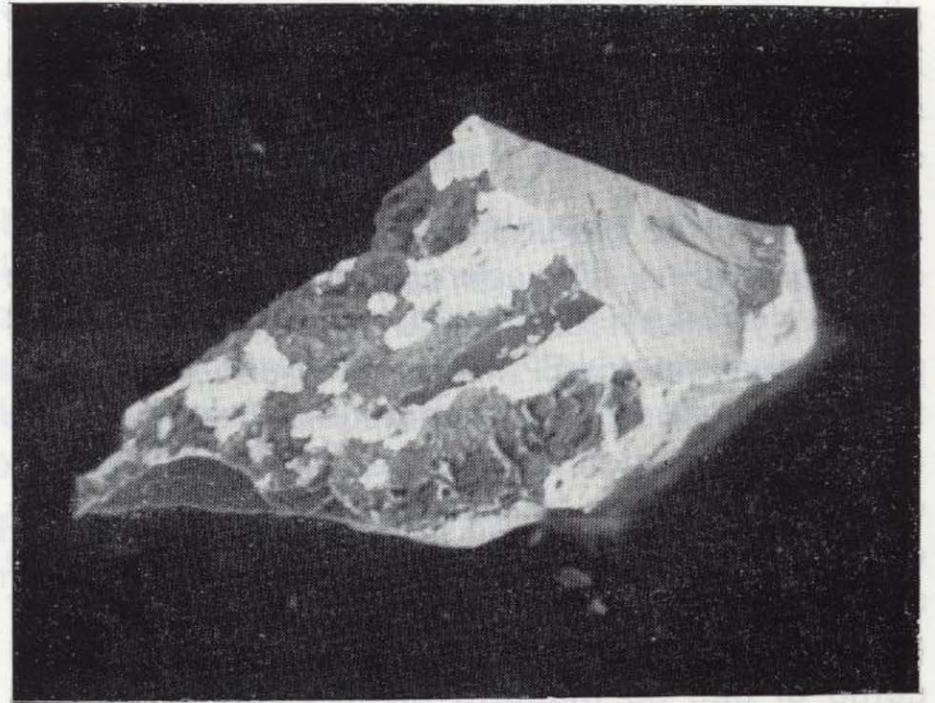


Figura 9.—Micrografía de un grano con inclusiones rojas y su correspondiente imagen de electrones retrodispersados.

- Existencia de cristales de color rosa o con zonas rosadas, de microclina (mayoritariamente) y de albita.
- Presencia de inclusiones y pátinas ferríferas rojizas en determinados cristales de feldespato y cuarzo.

La coloración de las zonas rosadas y de los granos rosa de la albita, no citada anteriormente en la bibliografía consultada, no parece estar relacionada con la composición química. Tampoco parece estarlo con la presencia de partículas (ferríferas o de otra naturaleza) de tamaño superior a $4 \mu\text{m}$, que habrían sido detectadas por la microsonda.

Las inclusiones ferríferas rojizas observadas son bastante escasas y tienen, en general, tamaño superior a $10 \mu\text{m}$. Se presentan en forma de pequeños puntos o, más frecuentemente, como finas pátinas que rellenan algunas microfracturas de los cristales de feldespato y cuarzo, indistintamente, o bien recubren ciertas caras de los mismos. Hay que hacer notar que salvo en estas zonas, los cristales de cuarzo son totalmente incoloros.

Lo anterior sugiere que los minerales que forman las inclusiones rojizas cristalizaron en la última etapa de consolidación magmática del granito de Porriño. La EPMA ha revelado en ellas un alto

La figura 8 ofrece los espectros de ambas composiciones y en la figura 9 se muestra una micrografía de un grano con inclusiones rojas y su imagen correspondiente de electrones retrodispersados.

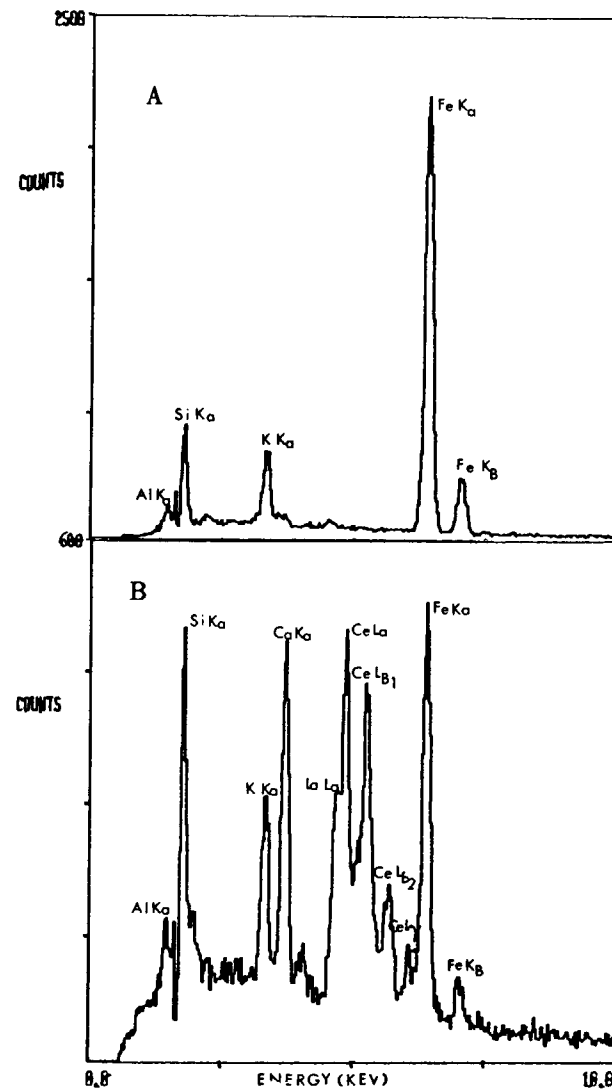


Figura 8.—Espectros por EPMA de inclusiones de hematites (A) y posible allanita con hematites (B).

CONCLUSIONES

El color rosado del granito «Rosa Porriño» debe ser atribuido a la suma de dos efectos visuales:



Figura 9.—Micrografía de un grano con inclusiones rojas y su correspondiente imagen de electrones retrodispersados.

- Existencia de cristales de color rosa o con zonas rosadas, de microclina (mayoritariamente) y de albita.
- Presencia de inclusiones y pátinas ferríferas rojizas en determinados cristales de feldespato y cuarzo.

La coloración de las zonas rosadas y de los granos rosa de la albita, no citada anteriormente en la bibliografía consultada, no parece estar relacionada con la composición química. Tampoco parece estarlo con la presencia de partículas (ferríferas o de otra naturaleza) de tamaño superior a 4 μm , que habrían sido detectadas por la microsonda.

Las inclusiones ferríferas rojizas observadas son bastante escasas y tienen, en general, tamaño superior a 10 μm . Se presentan en forma de pequeños puntos o, más frecuentemente, como finas pátinas que rellenan algunas microfracturas de los cristales de feldespato y cuarzo, indistintamente, o bien recubren ciertas caras de los mismos. Hay que hacer notar que salvo en estas zonas, los cristales de cuarzo son totalmente incoloros.

Lo anterior sugiere que los minerales que forman las inclusiones rojizas cristalizaron en la última etapa de consolidación magmática del granito de Porriño. La EPMA ha revelado en ellas un alto

contenido en Fe y tierras raras, que con gran probabilidad se corresponde con hematites y allanita, respectivamente.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi agradecimiento a D. Manuel Lombardero y a D. Martín Fernández por su colaboración y aportaciones a este trabajo; dar las gracias a todo el personal de los laboratorios del ITGE que han intervenido en los ataques de las muestras y en sus análisis.

REFERENCIAS

(1) ITGE (1991): *Granitos de España*. Serv. Public. Inst. Tec. Geom. Esp. ISBN: 84-7840-054-0.

(2) GARCIA-GARZON, J. (1987): *Datación por el método Rb-Sr de dos muestras de granito de Galicia*. Bol. Geol. Min., t. XCVIII-V, pp. 107-110. Serv. Public. Inst. Tec. Geom. Esp.

(3) BELLIDO MULAS, F.; GONZALEZ LODEIRO, F.; KLEIN, E.; MARTINEZ CATALAN, J. R., y PABLO MACIA, J. de (1987): *Las rocas graníticas hercínicas del Norte de Galicia y del occidente de Asturias*. Colección Memorias, t. 101, 157 pp. Serv. Public. Inst. Tec. Geom. Esp.

(4) BARRERA, J. L. (1987): *Macizo de Porriño*. En RODRIGUEZ FERNANDEZ, L. R. (Coordinador), *Estudio y caracterización petrológica y geoquímica de las rocas graníticas de la zona suroccidental de Galicia*. 1.ª Fase. Informe inédito. Fondo documental del Ins. Tec. Geom. Esp.

(5) HOFMEISTER, A. M., y ROSSMAN, G. R. (1984): *Color in Feldspars*. En RIBBE, P. (Ed.): *Cremistry, Structure and Nomenclature of Feldspars*. Feldspat Mineralogy. Rev. in Mineralogy, V. 2. Min Soc. Am., pp. 1-20.

(6) KRAEFT, U. von, y SAAFELD, H. (1967): *Über die Aventurin-Oligoklase von Tredestrand und Bjordam (Norwegen)*. Sonderdruck aus. Scheweis Mineralogische u. Petrographische Mitteilungen. Band 17. Heft 1.

Original recibido: Noviembre de 1992.

Original aceptado: Diciembre de 1992.

INFORMACION

La «Orygthología» de Juan José Elhúyar (1754-1796) y la «Oritognosia» de Andrés Manuel del Río (1764-1849), primeros tratados geológicos, escritos por españoles en América.

Por O. PUCHE RIART (*) y F. J. AYALA CARCEDO (**)

El significado de las aportaciones de J. J. ELHUYAR Y DE SUBICE (Logroño, 1754 - Bogotá, 1796) y A. M. DEL RÍO Y FERNANDEZ (Madrid, 1764 - México, 1849), ingenieros de minas-geólogos españoles, autores de los primeros tratados geológicos escritos por españoles en la España de su tiempo y descubridores del volframio (con Fausto de Elhúyar) y del eritronio o vanadio respectivamente, no puede ser comprendido sin un examen, siquiera sea somero, del grado de evolución al que habían llegado las Ciencias Geológicas en su época, tanto en el mundo como en España.

1. LA EVOLUCION DE LAS GRANDES IDEAS GEOLOGICAS EN EL MUNDO HASTA 1800

1.1. LA EVOLUCION DEL AMBIENTE SOCIOECONOMICO, TECNICO Y CIENTIFICO

El impulso fundamental que acabaría constituyendo la Civilización actual y su Cultura, proviene del Renacimiento en Europa, en los siglos XV y XVI, originado en Italia.

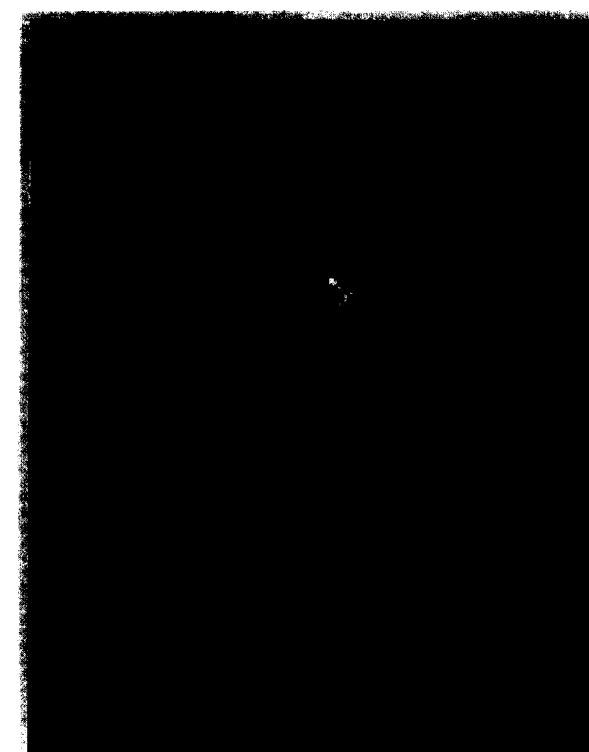
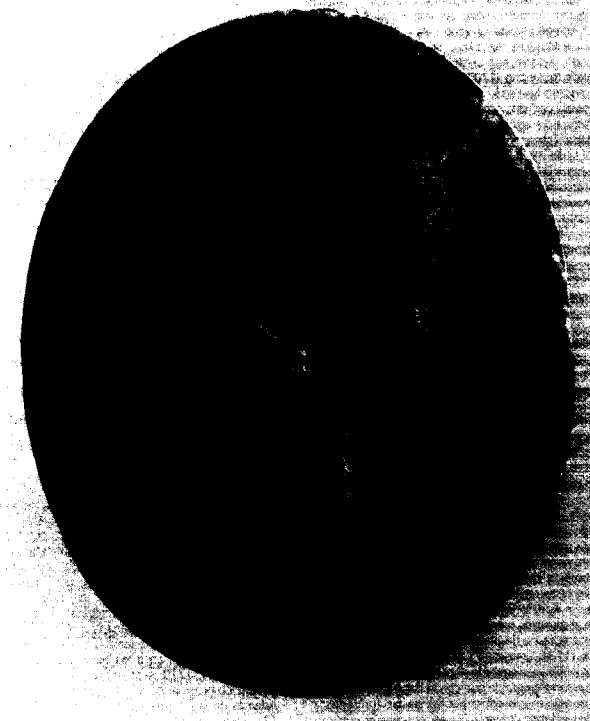
(*) Dr. Ingeniero de Minas (Ingeniería Geológica). Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid.

(**) Dr. Ingeniero de Minas (Ingeniería Geológica). Instituto Tecnológico Geominero de España.

Es en esta época cuando surgen los primeros Estados Nacionales de carácter monárquico que aglutinan a las unidades políticas menores del feudalismo y reorganizan social, política y económicamente a Europa. Portugal, España, Francia e Inglaterra irán constituyéndose de esta forma y proyectando su hegemonía sobre un mundo que se está descubriendo y que hacia 1750 está básicamente dominado por Europa. Aunque esto no significará la constitución de verdaderos mercados nacionales debido al carácter agrario y fuertemente autárquico de la mayor parte de la población, y a un sistema de transportes terrestres básicamente igual al de la baja Edad Media, que durará hasta la introducción del ferrocarril público en 1825, será un estímulo comercial e intelectual poderoso. La imprenta de Gutenberg de 1455, constituirá una formidable herramienta en la difusión del saber y la formación de comunidades intelectuales cada vez mayores, junto al latín, verdadera «lingua franca» en el mundo religioso y científico, como ahora sucede con el inglés. A partir del siglo XVII, con las revoluciones inglesa y de los Países Bajos, los ideales democráticos se irán incorporando al bagaje de valores de los Estados Nacionales y los pueblos europeos, facilitando la libertad de investigación y difusión de los conocimientos.

El siglo XVIII conoce un vasto movimiento de renovación y reactualización de los valores renacentistas que afecta a toda Europa y sus colonias americanas: la Ilustración.

JUAN JOSE ELHUYAR Y DE SUBICE (Logroño, 1754 - Bogotá, 1796), ingeniero de minas de Freiberg, probable autor de la *Orygthologia*, primer tratado de Mineralogía español, realizado en Nueva Granada hacia principios de la década de los 90 en el XVIII, y descubridor con su hermano del volframio en 1783. Cortesía del Dr. Bernardo J. Gaycedo.



ANDRES MANUEL DEL RIO Y FERNANDEZ (Madrid, 1764 - México, 1849), ingeniero de minas de Almadén, Freiberg y Schmnitz, autor de la *Oritognosia*, primer tratado de Mineralogía español publicado, en 1796, en México, y descubridor del rionio o eritronio (hoy vanadio) en 1801. Secretaría de la E.T.S. de Ingenieros de Minas. Cortesía de J. M. López de Azcona.

JUAN JOSE ELHUYAR Y DE SUBICE (Logroño, 1754 - Bogotá, 1796), ingeniero de minas de Freiberg, probable autor de la *Orythologia*, primer tratado de Mineralogía español, realizado en Nueva Granada hacia principios de la década de los 90 en el XVIII, y descubridor con su hermano del volframio en 1783. Cortesía del Dr. Bernardo J. Gaycedo.



ANDRES MANUEL DEL RIO Y FERNANDEZ (Madrid, 1764 - México, 1849), ingeniero de minas de Almadén, Freiberg y Schmnitz, autor de la *Oritognosia*, primer tratado de Mineralogía español publicado, en 1796, en México, y descubridor del rionio o eritronio (hoy vanadio) en 1801. Secretaría de la E.T.S. de Ingenieros de Minas. Cortesía de J. M. López de Azcona.

que incorpora una novedad, la idea del Progreso. Los gobiernos ilustrados se convierten en impulsores de las «luces», especialmente entre las élites. El nuevo conocimiento técnico y científico, especialmente tras la Revolución Científica del XVIII, adquirido en base a la observación directa y la reflexión racional, irá modificando sustancialmente buena parte de la cultura europea, y convirtiéndose, especialmente a partir de la segunda mitad del XVIII y en estrecha alianza con el capital y el liberalismo económico, en el motor del progreso económico. Esta nueva forma, científica, de adquisición del conocimiento, irá orillando los criterios de autoridad en el campo del saber, y deslindando creencias y saberes, en un largo y complejo proceso, en la óptica baconiana de separación de hechos y valores. El desencadenamiento de la Primera Revolución Industrial en el Reino Unido en la segunda mitad del XVIII sobre las bases del carbón, el vapor y el textil, significará un movimiento global de cambio que está en los fundamentos inmediatos de nuestra Civilización Tecnológica.

En este contexto se irán construyendo las primeras disciplinas científicas: la Geometría Celeste en el XVI-XVII con Copérnico, Kepler, Tycho y Galileo; la Mecánica en el XVII con Galileo, Huygens, Hooke y Newton; la Matemática con Descartes, Newton y Leibniz en el XVII y Euler, Laplace, Taylor, Lagrange y Monge en el XVIII, todo ello tras el progreso del Álgebra y la Trigonometría en el Renacimiento. La Química se constituirá ya en la segunda mitad del XVIII, con Priestley, Lavoisier, Proust y Dalton.

Las Ciencias de la Naturaleza, se desarrollarán con aproximadamente un siglo de retraso respecto a la Mecánica o las Matemáticas, por la misma época que la Química, aunque las grandes teorías que den razón de la dinámica del mundo natural tardarán aún más: la Teoría de la Evolución orgánica, con Darwin y Wallace en 1859; la Tectónica Global de Placas, hacia 1965. Este retraso diferencial, guarda un paralelismo con el de las Ciencias Sociales y será analizado más adelante, una vez expuesta la evolución histórica de las grandes ideas geológicas.

1.2. LAS GEOGENESIS ANTES DE BUFFON Y LAS APORTACIONES CIENTÍFICAS ANTERIORES AL XVIII

Previamente al establecimiento de las Ciencias Geológicas como un «corpus» sistemático basado en la observación, lo cual comenzará a tener lugar con Werner y se establecerá de forma casi definitiva con Hutton, se elaboran diversas teorías geogenéticas en el siglo XVII y la primera mitad del XVIII.

Estas teorías incorporan en alguna medida observaciones para tratar de explicar los hechos, pero tienen un importante componente especulativo o incorporan generalmente elementos bíblicos literales.

DESCARTES (1596-1650) expone su geogénesis en «Princi-

pia Philosophiae», publicada en 1644. Supone que la Tierra es un astro enfriado en cuyo interior hay materia incandescente y que está organizado en diversas capas con-

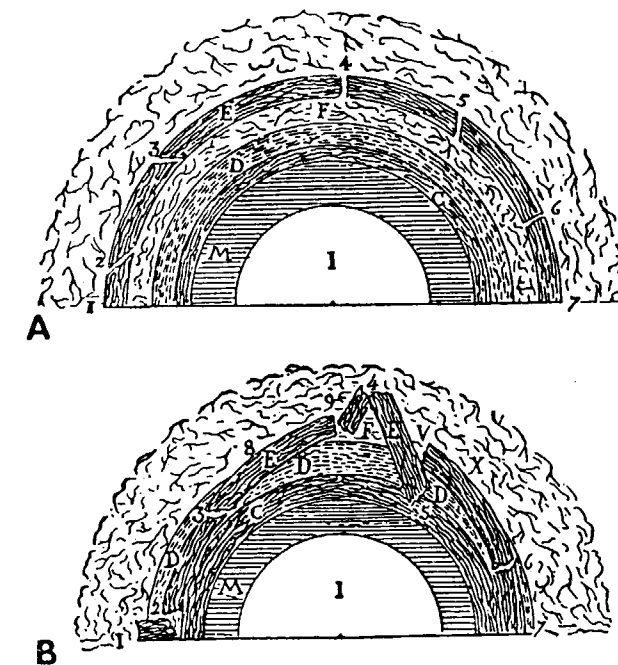


Figura 1.—Descartes (1596-1650) imaginó una Tierra con núcleo fundido (I) y capas intermedias: M (metálica), C (pesada), E (ligera), D-F (agua y aire), E (costra externa enfriada). B: Desplome de E sobre C.

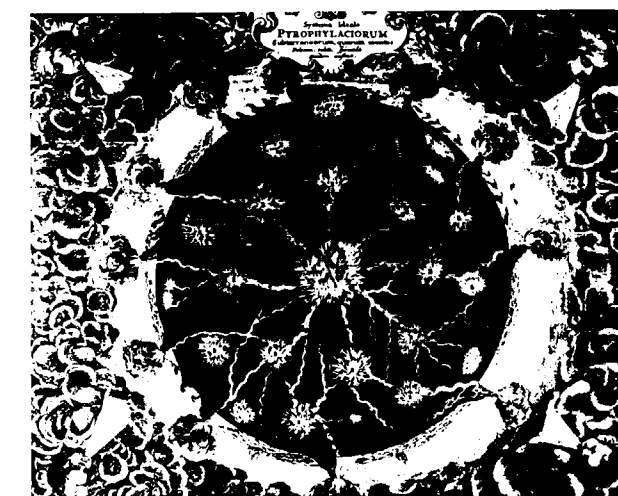


Figura 2.—El jesuita Kircher, en el XVII, imaginó una Tierra con depósitos de fuego interconectados (pyroplaciorum), que serían los responsables de los volcanes.

céntricas. La exterior, se agrieta al enfriarse, y al desplomarse sobre el interior se originan las montañas y los océanos debido a la salida del agua de una de las capas interiores. La capa profunda es metálica y de ella salen los metales. Esta teoría, fundamentalmente especulativa, tiene el mérito de ser el primer intento sistemático de explicar la estructura interior de la Tierra.

El jesuita KIRCHER publicó en 1665 su «Mundus Subterraneus», una obra cuya influencia se dejó sentir casi durante cien años, y de la cual sería uno de sus propagandistas en el XVIII Torres de Villarroel, el «gran Piscator» salmantino. Según Kircher, en el interior de la Tierra existen depósitos de fuego (pyrofilacios) conectados entre sí y con un gran pyrofilacio central; estos pyrofilacios son los causantes de los volcanes. Además existen depósitos de agua (hydrofilacios) y de aire, aerofilacios. Es posible que sus ideas sobre el fuego central influyeran en algunos plutonistas. Según Kircher, los terremotos eran los causantes de las montañas. Kircher tenía una visión organicista de la Tierra (CAPEL, 1985), y hablaba del «útero del globo terrestre», de la «vis petrífica» y la «vis seminalis» fuerza creadora de minerales y seres vivos de carácter universal. Como puede verse, las ideas organicistas de la Tierra, de las cuales el principal exponente actual es la tesis de «Gaia» del inglés Lovelock, leiv-motif de muchos ecologistas, tienen precedentes antiguos.

BURNET, un clérigo inglés, publicaría en 1681 su «Telluris Theoria Sacra», en la que intenta ofrecer una exposición del pasado y el futuro de la Tierra de tal manera que se armonicen la revelación bíblica y la razón. Un ejemplo de ella es la conclusión de que la Tierra, antes del Diluvio Universal bíblico, tenía que ser plana, pues si no hubiera sido imposible que resultara cubierta por las aguas; esta idea no era original suya, sino que, tal y como expone CAPEL (1985), Antonio de Torquemada ya la había expuesto en 1570. Su teoría sobre la estructura de la Tierra, influida por Kircher y quizá Descartes, contiene también un núcleo ígneo y más pesado que la costra superficial. El intento de Burnet de conciliar razón y creencia, tuvo bastante difusión, pero fue criticado por parte de la Iglesia Anglicana.

Aunque hasta finales del XIX, con LANDERER en Centroeuropa y ALMERA en España, por ejemplo, el intento de acordar las Ciencias Geológicas y el Génesis bíblico se realizará no pocas veces, el último gran intento geogenético y conciliador de razón y fe, previo a la eclosión de sistemas geológicos científicos en el último cuarto del XVIII, es considerado el del médico y matemático suizo SCHEUCHZER, J. J. (1672-1733), que publicó en 1721 su «Jobi Physica Sacra». Scheuchzer había observado los Alpes, y trata de integrar sus observaciones con la narración bíblica del Diluvio. Así, atribuye las montañas a la rotura y elevación de la costra externa tras el Diluvio, proceso para el que «las leyes mecánicas de la Naturaleza no bastaban aquí. Ha sido precisa una fuerza divina como en la primera creación de la Tierra».

Aunque estas teorías, vistas con un criterio anacrónico, pueden parecer hoy irrelevantes, contienen sin embargo elementos claramente positivos. Por una parte, introducen elementos de observación o racionales (núcleo más pesado p.e.), por otra parte, aceptan el cambio y la Historia de la Tierra. En definitiva, presentan una transición entre el relato bíblico y el conocimiento científico. Por ello, prepararon el terreno para una aceptación generalizada de estos hechos básicos en la segunda mitad del XVIII, que serviría para constituir una verdadera Geología Positiva.



Figura 3.—En el siglo XVII era corriente creer que el agua subterránea procedía del mar, como expone Kircher en esta ilustración.

En este sentido, la idea del Diluvio representaba un elemento de avance en torno al problema de los fósiles orgánicos. Aristóteles los había caracterizado como formas caprichosas de la Naturaleza; los diluvistas, no tendrían sin embargo inconveniente alguno en aceptar que eran restos de animales, eso sí, muertos y petrificados en el Diluvio.

Previamente a la formulación de estas geogénesis, hubo aportaciones aisladas de carácter claramente científico.

Debe citarse ante todo a LEONARDO DA VINCI (1452-1519), que realizó aportaciones científicas importantes, aunque no llegaron a publicarse. Como ha expuesto el profesor Bermudo Meléndez «Demuestra la falsedad de las doctrinas entonces en boga, según las cuales, las conchas que aparecen en las rocas de las montañas, habían sido llevadas allí por las aguas del diluvio, advirtiendo acertadamente,

actual en «primarios» (pizarras y cuarcitas entre otros), «secundarios» (calizas, areniscas y margas fosilíferas), «terciarios» (calizas, areniscas, yesos y arcillas) y «cuaternarios» (aluviones).

1.3. LA EVOLUCION DE LA GEOLOGIA POSITIVA DESDE BUFFON HASTA 1800

Metodológicamente, BUFFON (1707-1781) representa claramente un punto de vista científico con su insistencia en centrarse en los «hechos y la observación» y dejar de lado el resto de los aspectos externos. Su geogénesis, como también sucederá con Werner, contiene sin embargo dosis nada despreciables de especulación, aunque al margen de la narración bíblica del Génesis. En su «Histoire Naturelle» de 1749-1788, probablemente el libro más leído en este campo en el XVIII, expone un origen del Sistema Solar debido al choque de una cometa con el Sol. Más adelante, en 1778, en su «Epoques de la Nature», distingue siete épocas en la Historia de la Tierra. Pensaba que la Tierra estuvo cubierta enteramente por agua como parecían demostrar los fósiles marinos de las montañas; éstas, se habían formado en el proceso de enfriamiento del globo fundido, con la corteza. El volcanismo, derivaría de la combustión de «azufre y betún», y los terremotos de explosiones de gases en cavidades subterráneas. Buffon fue el primero en experimentar con objeto de probar hipótesis o hallar nuevos conocimientos. Calentó esferas de diversos tamaños con objeto de evaluar la edad del planeta de acuerdo con el ritmo de enfriamiento, enfriamiento cuya prueba más palpable serían los glaciares alpinos; llegó así a la conclusión de que el planeta tenía 132.000 años y 25.000 desde la condensación del agua, edad de la que tuvo que retractarse por la presión de la Facultad de Teología de la Sorbona en 1780. Así mismo, a través de experiencias con un horno de reverbero, generó silicatos nuevos por fusión a partir de argilitas.

La evolución científica de la Geología durante 50 años, desde 1775 a 1825, estuvo presidida por el debate entre *neptunistas* de un lado y *vulcanistas* y *plutonistas* de otro. El origen de toda la polémica se situó en el agente causal de la formación de rocas, el agua en el caso de los neptunistas, el calor interno o los volcanes en el caso de los plutonistas y vulcanistas. LEIBNIZ, A. (1646-1716), en su «Petrogea» de 1680, ya había señalado en el XVII que las rocas podían ser originadas por procesos de sedimentación o de fusión. Cruzada en parte con esta polémica se desarrollará desde la última década del siglo y hasta casi mediados del XIX, otra entre *uniformistas* con HUTTON, J. (1726-1797) y LYELL, CH. (1797-1875) como figuras más prominentes y *catastrofistas* con DE LUC (1727-1817), CUVIER (1769-1832), ELIE DE BEAUMONT (1798-1874), BUCKLAND (1784-1856) y SEDGWICK y MURCHISON. La Geología como ciencia se estructuró en lo fundamental en torno a estas dos polémicas.



Figura 4.—Leonardo da Vinci (1452-1519), artista, ingeniero y científico renacentista, realizó algunas de las primeras reflexiones geológicas científicas.

que se trata de conchas marinas, que no han podido ser llevadas contra corriente por los ríos». Estudió el problema del origen de los fósiles orgánicos, concluyendo de forma acertada sobre él. Igualmente, demuestra que los valles han sido originados por los ríos, aportando como prueba que la estructura geológica es igual a ambos lados. Piensa sin embargo que la situación de las conchas fósiles en zonas altas es prueba del descenso del mar.

La obra de STENO (1638-1687), especialmente en su «Prodromus» de 1669, es fundamental porque sienta las bases de la Estratigrafía. Así, establece el carácter sedimentario de los estratos, su carácter de indicador ambiental continental o marino de acuerdo con los fósiles u otros detalles en ellos contenidos, el orden cronológico de formación y la disposición horizontal originaria. Además establece que «La disposición alterada de los estratos, es evidentemente, el origen de las montañas», por lo que de acuerdo con los principios que había establecido antes, concluye que las montañas son el producto de procesos internos que han cambiado la posición originalmente horizontal de los estratos.

Por último, ARDUINO, a fines del XVII, establece un primer intento de clasificación cronoestratigráfica dividiendo los terrenos de una forma relativamente parecida a la

En 1702 la Oficina de Minas de Freiberg decidió crear una caja de pensiones para becar en el estudio de las ciencias mineras a jóvenes del lugar. El Profesor más conocido de estas dependencias fue HENCKEL, J. F., autor de una obra titulada «Kies Historie», en la que se describen numerosos minerales. Su fama atrajo hacia Freiberg a diversos estudiosos extranjeros, tal es el caso del mineralogista ruso LOMONOSOV, W. I. (1711-1765).

El 14 de noviembre de 1766 se regularizan estas enseñanzas con la organización de la Academia de Minas de Freiberg, gracias a la labor de ZIMMERMAN, C. F., HEYNITZ, F. A., y VON OPPEL, F. W. En el plan de estudios inicial ya se impartía la asignatura de Mineralogía. En 1775 WERNER, A. G. (1749-1807) sería contratado para dar lecciones de dicha materia.

WERNER, A. G. (Lushcia, 1749-Desden, 1817), ingeniero de minas-geólogo, fue desde 1775 profesor de la Academia de Minas de Freiberg, constituyéndose a su alrededor lo que podría considerarse la primera «escuela geológica» de carácter internacional. Elaboró una geogenia en la cual, a partir de un océano primordial, la Panthalasa, por sedimentación sucesiva derivaban los cuatro grandes tipos de terrenos (en parte identificados por LEHMAN y FÜCHSEL): el Primitivo (con granitos y gneis), de Transición (atribuido hoy al Paleozoico superior), Flötz (con diversas subdivisiones que irían desde el Permiano al Terciario inclusive), y los de Acarreo. Los materiales volcánicos y pseudo-volcánicos fueron añadidos después, derivando de la combustión de carbón subterráneo.



Figura 5.—La constitución de las primeras Escuelas de Ingeniería de Minas europeas, en la segunda mitad del XVIII, fue un hito para la evolución de las ideas geológicas (Peithner, 1780).

WERNER pensaba que los basaltos y demás rocas se habían formado por deposición en el gran océano mundial. De esta forma se explicaba bien el origen de los fósiles, así como la presencia de los terrenos primitivos hacia la parte central de las cordilleras (zona donde se habían retirado antes las aguas).

Por derivar todos los materiales del agua, se conoció como teoría neptunista (del dios del mar Neptuno). La exposición de su sistema estratigráfico, fue realizada en su «Kurze Klassifikation», realizada en 1777 y publicada diez años después. Esta clasificación, elaborada en base a numerosas observaciones de campo, representó, tras el primer intento de Arduino a fines del XVII, y el del zoólogo alemán PALLAS, P. S. (1741-1811), el primer sistema cronoestratigráfico, que junto al reconocimiento del valor de los fósiles como criterio de correlación, fue una aportación fundamental. Igualmente, sistematizó en unas tablas que fueron ampliamente utilizadas, una clasificación de minerales y rocas. Werner, además, unificó en un todo coherente por primera vez, la Geognosia, los conocimientos geológicos. La voz «jheólogo» fue obra del cremonés Juanelo Turriano como ha demostrado el Doctor López de Azcona.

Werner, por otra parte, tenía una actitud estrictamente científica en sus planteamientos y discusiones. Por todo ello, puede ser considerado el fundador de la Geología moderna. PEDRINACI y GARCIA (1992), han resaltado recientemente la importancia epistemológica de Werner.

La Geogenia werneriana, tuvo siempre, sin embargo, una gran laguna al dejar sin contestar la interrogante del destino del agua del océano primordial. Además sus tesis sobre la generación de montañas eran muy débiles, suponiendo que los estratos inclinados correspondían a sedimentación de borde; la Tierra era fundamentalmente inactiva. Por otra parte, topó con un grave problema en torno al origen del basalto, intentando encontrar una relación entre la distribución del carbón y el basalto, que se derivaría de combustión de las capas de carbón, teoría que había propuesto el francés GUETTARD, J. E. (1715-1786) para la génesis de los volcanes.

El joven médico GUETTARD, que bajo la influencia de los JUSSIE había llegado a ser el conservador del Gabinete de Historia Natural del Duque Luis de Orleans, recorre en 1752 la zona de la Auvernia, comprobando que los materiales pétreos de la cadena de los «puys» tienen un origen volcánico.

DESMAREST (1725-1815), inspector general de manufacturas francés y apasionado por los temas geológicos, como reacción a la teoría de Guettard, en 1774 expuso la teoría de que el basalto derivaba de un proceso de fusión, basándose en sus observaciones en Auvernia, creando así la escuela vulcanista.

DOLOMIEU (1750-1801), profesor de la Escuela de Minas de París, aristócrata partidario de la Revolución de 1789

y descubridor de la dolomita, propuso en 1789 que el foco de calor, de acuerdo con sus observaciones, era inferior al granito, que estaba por encima del origen del basalto, con lo cual el granito perdía su carácter de roca primordial. Desmarest, sin embargo, siempre pensó que el granito era sedimentario. En Italia, con sus espectaculares manifestaciones volcánicas, BREISLAK y MORO pensaban que los volcanes podían levantar los estratos.

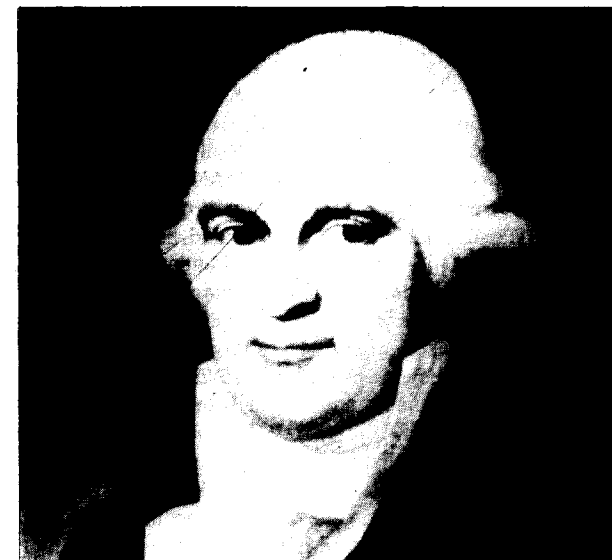


Figura 6.—Werner (1749-1817), ingeniero de minas-geólogo alemán, profesor de la Escuela de Minas de Freiberg, dio un gran impulso a la Geología científica.

El neptunismo fue progresivamente abandonado por los principales discípulos de Werner, los ingenieros de minas-geólogos de Freiberg D'AUBUISSON, HUMBOLDT y VON BUCH, que al ampliar el ámbito geográfico de sus observaciones y observar hechos que contradecían la teoría, fueron adoptando posturas plutonistas sobre el origen del basalto y el granito. Hacia 1820, estaba ya abandonado por la mayor parte de los científicos; las clasificaciones estratigráficas y mineralógicas, se siguieron empleando casi hasta 1850, p.e., en España.

Las dos teorías antagónicas se concilian definitivamente en la obra del médico escocés HUTTON, J. (1726-1797). Esto puede apreciarse en un trabajo que dicho autor presentó a la Royal Society de Edimburgo, bajo el título «Theory of the Earth» (1785), donde se definen dos posibles orígenes de las rocas: sedimentos marinos procedentes de la erosión de los continentes y de la acumulación de los restos orgánicos, y materiales resultantes del vulcanismo, así como del calor interno de la Tierra. Estas ideas fueron duramente criticadas por la sociedad cientí-

fica de la época, muy influenciada por el neptunismo, que, aunque no recurriera a ellas, era más acorde con las tesis diluvistas de la Biblia.

En esta obra, aun con elementos especulativos y finalistas, se exponían aportaciones fundamentales fruto de la observación y la reflexión. Demuestra que el granito no había sido fruto de la fusión de sedimentos preexistentes, sino que tenía carácter intrusivo en una serie de afloramientos. Granito y basalto, tenían un origen ígneo, debido al calor interno de la Tierra. Por ello él y sus seguidores, fueron llamados plutonistas. El calor interior era también el responsable de los levantamientos del fondo del mar que habían dejado depósitos de conchas marinas en las montañas. A su vez, éstas eran erosionadas y depositados los sedimentos en el mar que volvía otra vez a elevarse en un nuevo ciclo. Esta obra, fue aumentada notablemente en 1795, para responder a los ataques de KIRWAN, presidente de la Royal Society irlandesa, que la criticaba por su ignorancia de la cronología bíblica. Hutton, que sentaba en 1788 el actualismo («la suposición de que la labor de la naturaleza es uniforme y constante»), concluía diciendo que «El resultado, por lo tanto, de nuestra investigación actual es que no encontramos huellas de un principio, ni perspectivas de un final». Con esa conclusión, Hutton abría las puertas a un concepto y una dimensión modernos del tiempo geológico, básico para el desarrollo de la Geología y de la Teoría de la Evolución Biológica, ya que los cálculos deducidos de la lectura literal de la Biblia, fijaban la edad del mundo en no más de 8.000 años (5.920 según la versión de la Vulgata y 7.370 según la de los Setenta, casi un millón de veces menos que la edad real de la Tierra). Esta auténtica revolución en la dimensión temporal es tan importante como la espacial producida por los Descubrimientos y la Astronomía. La obra de Hutton, fue sin embargo poco leída, y sus conclusiones no se divulgarían ampliamente hasta que PLAYFAIR, matemático amigo de Hutton, editara su obra didáctica «Illustrations of the Huttonian Theory» en 1802. El grueso de la polémica actualismo-catastrofismo se desarrolló ya en el XIX.

Como puede observarse por lo expuesto más arriba, la Tectónica de todas las teorías era sumamente pobre. En este terreno, el suizo SAUSSURE (1740-1799), tras un extenso trabajo de campo en los Alpes, que se concretó en sus cuatro volúmenes de «Voyages dans les Alpes» publicados entre 1779 y 1796, estableció que los plegamientos derivaban de la acción de fuerzas de compresión horizontales, abriendo así el camino a unas ideas tectónicas más correctas. Ya LEIBNIZ había avanzado la idea de las fuerzas de compresión producidas durante el enfriamiento del planeta como causantes de la formación de montañas, por lo que puede ser considerado el primer contraccionista, una teoría tectónica que dominaría toda la segunda mitad del XIX, con SUESS como principal portavoz.

El mérito de haber desarrollado los primeros la *cartografía geológica* corresponde a los franceses. El Ministerio de Minas patrocinó en 1766 un proyecto para realizar toda

y descubridor de la dolomita, propuso en 1789 que el foco de calor, de acuerdo con sus observaciones, era inferior al granito, que estaba por encima del origen del basalto, con lo cual el granito perdía su carácter de roca primordial. Desmarest, sin embargo, siempre pensó que el granito era sedimentario. En Italia, con sus espectaculares manifestaciones volcánicas, BREISLAK y MORO pensaban que los volcanes podían levantar los estratos.

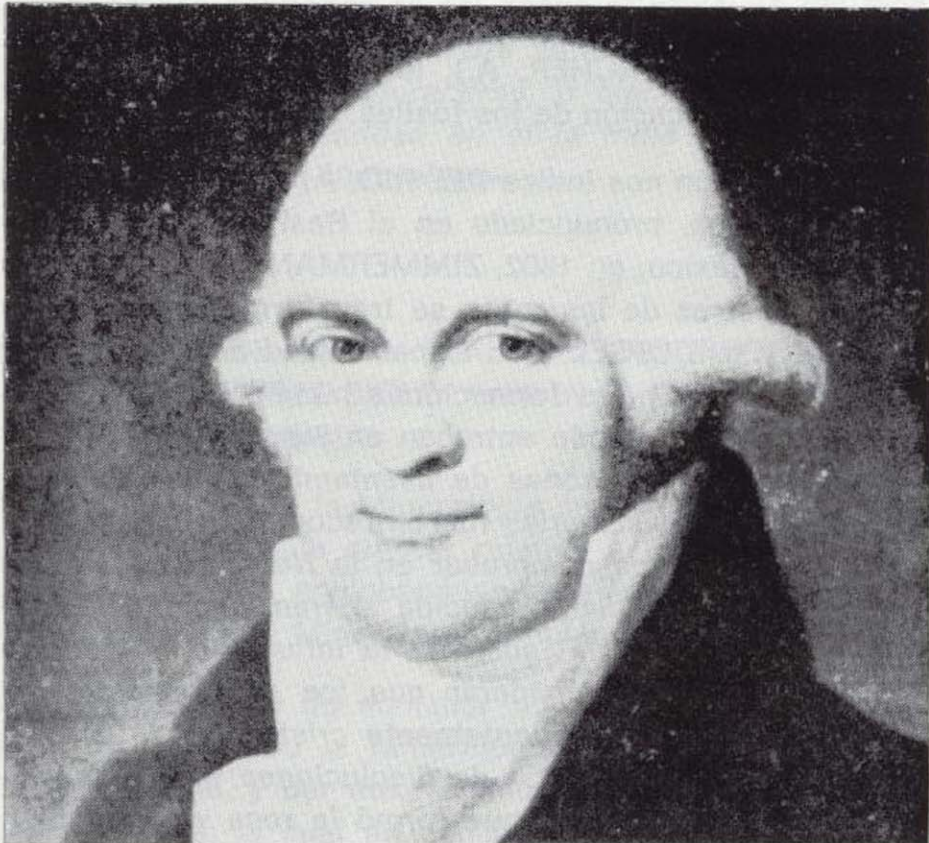


Figura 6.—Werner (1749-1817), ingeniero de minas-geólogo alemán, profesor de la Escuela de Minas de Freiberg, dio un gran impulso a la Geología científica.

El neptunismo fue progresivamente abandonado por los principales discípulos de Werner, los ingenieros de minas-geólogos de Freiberg D'AUBUISSON, HUMBOLDT y VON BUCH, que al ampliar el ámbito geográfico de sus observaciones y observar hechos que contradecían la teoría, fueron adoptando posturas plutonistas sobre el origen del basalto y el granito. Hacia 1820, estaba ya abandonado por la mayor parte de los científicos; las clasificaciones estratigráficas y mineralógicas, se siguieron empleando casi hasta 1850, p.e., en España.

Las dos teorías antagónicas se concilian definitivamente en la obra del médico escocés HUTTON, J. (1726-1797). Esto puede apreciarse en un trabajo que dicho autor presentó a la Royal Society de Edimburgo, bajo el título «Theory of the Earth» (1785), donde se definen dos posibles orígenes de las rocas: sedimentos marinos procedentes de la erosión de los continentes y de la acumulación de los restos orgánicos, y materiales resultantes del volcanismo, así como del calor interno de la Tierra. Estas ideas fueron duramente criticadas por la sociedad cientí-

fica de la época, muy influenciada por el neptunismo, que, aunque no recurriera a ellas, era más acorde con las tesis diluvistas de la Biblia.

En esta obra, aun con elementos especulativos y finalistas, se exponían aportaciones fundamentales fruto de la observación y la reflexión. Demuestra que el granito no había sido fruto de la fusión de sedimentos preexistentes, sino que tenía carácter intrusivo en una serie de afloramientos. Granito y basalto, tenían un origen ígneo, debido al calor interno de la Tierra. Por ello él y sus seguidores, fueron llamados plutonistas. El calor interior era también el responsable de los levantamientos del fondo del mar que habían dejado depósitos de conchas marinas en las montañas. A su vez, éstas eran erosionadas y depositados los sedimentos en el mar que volvía otra vez a elevarse en un nuevo ciclo. Esta obra, fue aumentada notablemente en 1795, para responder a los ataques de KIRWAN, presidente de la Royal Society irlandesa, que la criticaba por su ignorancia de la cronología bíblica. Hutton, que sentaba en 1788 el actualismo («la suposición de que la labor de la naturaleza es uniforme y constante»), concluía diciendo que «El resultado, por lo tanto, de nuestra investigación actual es que no encontramos huellas de un principio, ni perspectivas de un final». Con esa conclusión, Hutton abría las puertas a un concepto y una dimensión modernos del tiempo geológico, básico para el desarrollo de la Geología y de la Teoría de la Evolución Biológica, ya que los cálculos deducidos de la lectura literal de la Biblia, fijaban la edad del mundo en no más de 8.000 años (5.920 según la versión de la Vulgata y 7.370 según la de los Setenta, casi un millón de veces menos que la edad real de la Tierra). Esta auténtica revolución en la dimensión temporal es tan importante como la espacial producida por los Descubrimientos y la Astronomía. La obra de Hutton, fue sin embargo poco leída, y sus conclusiones no se divulgarían ampliamente hasta que PLAYFAIR, matemático amigo de Hutton, editara su obra didáctica «Illustrations of the Huttonian Theory» en 1802. El grueso de la polémica actualismo-catastrofismo se desarrolló ya en el XIX.

Como puede observarse por lo expuesto más arriba, la Tectónica de todas las teorías era sumamente pobre. En este terreno, el suizo SAUSSURE (1740-1799), tras un extenso trabajo de campo en los Alpes, que se concretó en sus cuatro volúmenes de «Voyages dans les Alpes» publicados entre 1779 y 1796, estableció que los plegamientos derivaban de la acción de fuerzas de compresión horizontales, abriendo así el camino a unas ideas tectónicas más correctas. Ya LEIBNIZ había avanzado la idea de las fuerzas de compresión producidas durante el enfriamiento del planeta como causantes de la formación de montañas, por lo que puede ser considerado el primer contraccionista, una teoría tectónica que dominaría toda la segunda mitad del XIX, con SUESS como principal portavoz.

El mérito de haber desarrollado los primeros la *cartografía geológica* corresponde a los franceses. El Ministerio de Minas patrocinó en 1766 un proyecto para realizar toda

The computación of the ages of the world.

The ages of the world after the computation of	The bible and Hebrews Ge. 7.	1	The creation of the world	To the deluge.	1656	
		2	The deluge	To Abzám.	292	
		3	Abzám's nativité	To the departyng of Isract out of Egypt	503	
		4	The departyng out of Egypt	To the temple buildyng.	481	
		5	Buildyng the temple.	To the captivité of Babil.	414	
		6	The captivité of Babil	To Christ.	614	
	Eusebius and the latine cro.	fr 8	1	The creation of the world	To the deluge.	2242
			2	The deluge	To Abzám.	942
			3	Abzám's nativité	To David.	941
			4	David	To the captivité of Babil.	485
			5	The captivité of Babil	To Christ.	589
			6	Christ	To this pere.	1560
The summe of the ages of the world after the compute of	Eusebius Augustine	fr 8	The Hebrews	5521.		
			Virandula	5047.		
			Eusebius	6737.		
			Augustine	8391.		
			Alphonse.	8522.		

FINIS.

Figura 7.—Cálculo de la «Edad del Mundo» de acuerdo con la cronología bíblica (Cooper's Chronicle, 1560).

Francia en 214 hojas, en el que estuvieron trabajando GUETTARD y LAVOISIER once años, realizando 16 hojas y dejando hechas en parte otras doce. Retomado el proyecto por MONNET, Inspector General de Minas, terminará publicando en 1780 un Atlas con 31 mapas.

1.4. IDEAS SOBRE EL ORIGEN DE LOS MINERALES

Durante el Renacimiento, en la zona de los Montes Metálicos, donde se sitúa Freiberg, el médico y minero G. BAUER, latinizado «Agrícola» (1494-1555) estudia las mineralizaciones existentes teniendo en mente su utilidad. Dicho autor estableció una serie de hipótesis sobre el origen de los filones, desechando las ideas en boga sobre el influjo de los astros. Las vetas se formarían debido a la circulación de las aguas subterráneas y a licores particulares. En definitiva se intuía la idea de la precipitación de sustancias contenidas en disolución.

Algo más tarde, el pensador francés DESCARTES (1596-1650) suponía que los minerales se formaban gracias al calor existente en el interior del globo terráqueo. Poste-

riormente, el autor de la teoría del «phlogistom» BECHER, J. J. (1635-1682) señala que los criaderos se formaron por sublimación de vapores metálicos que ascendían desde el centro de la tierra.

De igual forma, LOMONOSOV, W. I. publicó un trabajo donde indicaba que los minerales se formaban como consecuencia de los terremotos, mecanismos liberadores de las energías internas. Estas últimas ideas recuerdan un poco la obra de FEIJOO, B. J. (1676-17...) *Teatro Critico Universal*, tomo IV (1733), donde señala a los terremotos como responsables del ascenso de los vapores lapidíficos (según terminología de KIRCHER, A.), los cuales eran responsables de la petrificación de los fósiles.

Asimismo, según nos indica DEL RIO, A. M., en el *Discurso sobre las vetas*, pronunciado en el Real Seminario de la Minería de México, en 1802, ZIMMERMAN pensaba que las partes terrestres de las rocas se transformaban en menas metálicas y que OPPEL tuvo la paternidad sobre las ideas de la influencia de las formaciones húmedas en el origen de los filones, en donde entraban en juego las zonas fisurales creadas en las zonas de asentamientos de las montañas. Estas últimas teorías fueron recogidas por WERNER, tal y como podemos comprobar en la *Nouvelle théorie de la formation des filons*, traducida al francés por DABUISON, en 1802. WERNER sostenía la influencia química en estos procesos, al considerar que los minerales de las vetas, el mostrarse frecuentemente cristalizados, tendrían su origen en la precipitación de disoluciones, indicando también que la precipitación que formó la roca y la del filón no se depositaron al mismo tiempo.

Esta falta de consenso en cuanto a la definición de los



Figura 8.—Agrícola (1494-1555), médico e ingeniero de minas alemán, autor del *De Re Metallica* en 1556, realizó notables aportaciones a la Mineralogía descriptiva.

modelos metalogenéticos persistiría hasta el siglo XIX. Dicha situación se aprecia en la obra del irlandés BOWLES, G. (1714-1780), el cual *había sido llamado* por el Ministro ULLOA, A. (1716-1795) *para organizar el Gabinete de Historia Natural* y dependencias anexas. Este autor indica en *Introducción a la Historia Natural y a la Geografía Física de España* (1775) que: «Cuando el mineral puro penetra en las peñas, y está íntimamente mezclado con ellas, que es como se advierte en la mayor parte de las minas de España, se puede conjeturar que la materia metálica y la peña han permanecido así desde el principio del mundo, o que el mineral y la piedra se hallaron en estado de disolución antes de endurecerse, o bien que el peñasco ha mudado, produciéndose en él la mina por un trabajo interno y largo de la Naturaleza».

1.5. ESTADO DE LA MINERALOGIA DESCRIPTIVA A FINALES DEL SIGLO XVIII: NACIMIENTO DE LA ORITOGNOSIA

Por aquellas fechas la Mineralogía se entendía, en un sentido amplio, como la ciencia relativa a los conocimientos del reino mineral, englobándose en ella a: la Geología, la Paleontología y la Mineralogía propiamente dicha.

WERNER, al inicio de su labor docente en Freiberg, consideró por un lado la Mineralogía, bajo la denominación de Oritognosia, y por otro la Geología, bajo el nombre de Geognosia, en la cual se ubicaría la Paleontología (hasta que CUVIER la señaló como materia autónoma).

Oritognosia es una voz griega compuesta de «orukos», que significa excavado, y «gnosis», conocimiento. Para WERNER, dado los precarios avances de la Cristalografía y de la Mineralogía Determinativa, no era otra cosa que una Mineralogía Descriptiva, en su sentido clásico. La definición que da este autor es: «La parte de la Mineralogía que comprende la doctrina de las relaciones y propiedades sensibles de los minerales mecánicamente simples». De igual forma, la Geognosia trata y define lo relativo a la estructura y situación de las grandes porciones de la corteza (Geología Descriptiva).

Pese a todo, durante un cierto tiempo, ambas materias se consideraron como parte de la Mineralogía. Por ejemplo en la *Oritognosia* de WIDENMANN, J. F. G., traducida al castellano por HERRGEN, C., en 1797, se señala que la Mineralogía se divide en: Oritognosia (conocimiento de los fósiles), Química Mineralógica (análisis y recomposición de las partes constitutivas de los fósiles), Geognosia (conocimiento de las montañas), Geografía Mineralógica (ubicación y modo en que se encuentran los fósiles), y Mineralogía Económica (aplicaciones); no se considera a la Cristalografía.

Para DEL RIO (1795) la Oritognosia «es una ciencia experimental que enseña a conocer los fósiles por sus caracteres exteriores y a clasificarlos». En definitiva establece

A-6-20

NOUVELLE
THÉORIE
DE LA FORMATION
DES FILONS.

APPLICATION de cette Théorie à l'Exploitation des Mines, particulièrement de celles de Freyberg ;

PAR A. G. WERNER,

Conseiller des Mines de Saxe, Professeur de Minéralogie, de l'Art de l'Exploitation des Mines, etc.

NOUVELLE ÉDITION;

TRADUITE de l'Allemand, revue et augmentée d'un grand nombre de notes, dont plusieurs ont été fournies par l'Auteur même :

PAR J. F. DAUBUISSON.

A PARIS,
Chez VILLIER, Libraire, rue des Mathurins,
n° 396.

AN XI. — 1802

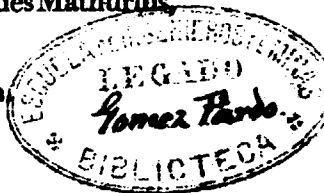


Figura 9.—Portada de la versión francesa de la obra de Werner *Nueva teoría de la formación de los filones*.

una definición algo más concisa que WERNER, aunque viene a decir lo mismo que su maestro.

Las primeras sistemáticas minerales se fundamentaban en el aspecto externo de las sustancias. Por ejemplo TEFRATO DE EFESO (371-286 a. C.), en *De Lapidibus*, de acuerdo

con este criterio, consideraba la existencia de tres clases: piedras, tierras y metales.

El ordenamiento de TEOFRASO fue mejorándose poco a poco. De esta forma el cordobés IBN SINA «AVICENA» (980-1037), en su *Tratado de las piedras*, establece una clasificación parecida: piedras y tierras, minerales combustibles o sulfurosos, sales y metales.

Esta idea persiste en el Renacimiento, así AGRICOLA considera la existencia de cinco clases minerales: tierras, sales, gemas, metales y otros minerales. Este autor realiza una profunda descripción de cada especie en base a sus distintas propiedades: color, brillo, densidad, olor, dureza, forma, exfoliación, solubilidad, fusibilidad y otras. También es el primer científico que separa a los minerales (sustancias homogéneas) de las rocas (agregados minerales).

En España las clasificaciones físico-morfológicas encuentran eco en la obra de Alvaro ALONSO BARBA y TOSCANO (1569-1662) *El Arte de los Metales* (1640), de gran influjo durante más de dos siglos.

En Europa de finales del siglo XVIII existían dos corrientes de pensamiento: los que pretendían la descripción del reino mineral en base a la observación de los caracteres externos y los que pensaban que la composición química de las sustancias debía ser la base de toda sistemática mineral.

Si hoy en día consideramos que la clasificación de los minerales está más cerca de la segunda teoría que de la primera, antiguamente no estaba tan claro. El progreso iniciado por la Química, desde que BOYLE, R. (1627-1697) publicase *El químico escéptico*, fue de gran importancia para la Mineralogía, pero la penetración de sus métodos e ideas sería bastante lenta.

La primera clasificación con un principio químico se la debemos a CRONSTDET, A. (1702-1765), autor de *Forsök til. Mineralogie eller Mineral Rikets Upställning* (1758) y que fue traducida al castellano, en 1783, por un miembro de la Real Sociedad Vascongada de Amigos del País, probablemente por MUNIBE, R. M., aunque no se llegaría a publicar. En esta obra la división de los minerales se basa en el quimismo de las sustancias, sin embargo también se sigue el criterio descriptivo basado en las propiedades físico-morfológicas. Llama la atención cómo dicho autor presta mucha atención a los métodos de análisis por soplete.

Otro sueco, BERGMAN, T. D. (1735-1784), seguiría la labor de CRONSTDET, A., organizando una nueva sistemática basada en la composición química y caracteres externos de los minerales, teniendo en cuenta su valor. Este autor considera las formas cristalinas como algo accidental y de escasa importancia en cuanto a la identificación del mineral. Entre sus obras en este campo cabe destacar el *Manuel du mineralogiste, sciographie du regne mineral d'après l'analyse chimique* (1772), traducida al francés por MONGEE en 1784. En *Meditations de la systematique fossi-*

lium natural propuso una clasificación de las familias según la calidad y cantidad de las materias primitivas, para lo cual elaboró una formulación sencilla, mediante las iniciales de las partes constitutivas, a fin de que se pudiese hacer una lectura rápida de la composición.

También hay que considerar la labor del químico irlandés KIRWAN, R. (1750-1812), el cual publica *Elements of Mineralogy*. Esta obra sería traducida, a partir de la versión alemana de CRELL, L., por JORDAN DE ASSO en 1784, creemos que sin llegar a publicarse. Asimismo es traducida a nuestra lengua, a partir de la versión inglesa de GIBELLIN, por CAMPUZANO, F., en 1789. Según MAFFEI, E., y RUA, R. (1871), dicho tratado «*figura como la primera obra de Mineralogía que apareció en nuestro idioma*. En la introducción el autor plantea la polémica existente entre las sistemáticas basadas en los caracteres físicos y las que se apoyan en la naturaleza química de los minerales, decantándose por la última. De todas formas su clasificación no sólo presenta una base química, sino que se apoya en el estudio de los caracteres exteriores, teniendo en cuenta la utilidad de las sustancias. Sostiene la clásica división en tierras y piedras, sales, sustancias inflamables y metales. En el apéndice final describe y recomienda el soplete, para análisis cualitativos de minerales.

También se suman a los defensores de las clasificaciones químicas el prestigioso abad HAÜY, R. J. (1801) y BERZELIUS, J. J. (1819), con la propuesta de una sistemática con base catiónica.

El lento avance de la Química hizo que muchos científicos permaneciesen dentro de la línea tradicional, acogiendo a clasificaciones basadas en los caracteres externos de los minerales. El botánico sueco LINNEO, C. (1707-1778) establece, en 1770, una sistemática físico-morfológica, señalando género y especie, igual que había hecho para el reino animal y vegetal.

En 1771, WERNER llega a Leipzig y pronto ingresa en la Sociedad de Historia Natural de esta ciudad. En dicho lugar conoció la obra del sueco GEHLER *De characteribus fossilium externis*, la cual le produjo gran influencia. Poco después, tratando de mejorarla, publica *Von der äusserlichen kennzeichen der fossilien* (1774). La calidad de este libro influyó en el hecho que WERNER fuera contratado como profesor de Mineralogía en la Escuela de Minas de Freiberg, en 1775.

WERNER defendía una sistemática físico-morfológica, aunque sin despreñar la composición química. Según QUADRA, R. DE LA (1803), este autor observa la parte constitutiva de los minerales en que influyen más su aspecto y propiedades colocándolos en el género a quien más es común su influencia. Para WERNER una cosa era situar un mineral dentro de una sistemática y otra era identificarlos. Según este autor: «*los minerales deben clasificarse y las especies separarse basándose en su composición química*». En definitiva lo que hacía es seguir la idea de

WALLERIUS, I., expresada en *De systematibus mineralogicis et systemate mineralogico rite condendo* (1768), donde se señala la necesidad de considerar tanto las propiedades físicas como las químicas en la descripción del mineral.

Una de las ideas fundamentales que sostenían los autores de sistemáticas físico-morfológicas era que si LINNEO y otros importantes naturalistas habían clasificado a los distintos componentes de los reinos animal y vegetal basándose en los caracteres externos, sin considerar las partes constitutivas, en el reino mineral no había por qué sostener otro criterio. A esto respondían los partidarios de las clasificaciones químicas que si se cogía una planta y se troceaba nadie podía asegurar que cualquiera de los fragmentos obtenidos correspondiese al vegetal elegido, en cambio trozos de minerales distintos pueden mostrar una combinación química semejante.

Según los defensores del sistema químico, con HAÜY, R. J., a la cabeza, no existía nada tan característico de una sustancia como su propia composición. Sin embargo, los partidarios de las clasificaciones físico-morfológicas, según recogemos de la obra de BRUNER, J. (1800), indicaban que el análisis químico encuentra a veces en distintos minerales partes constitutivas casi idénticas. Mientras que KARSTEN, D. L. G. (en la 3.ª edición de sus conocidas tablas, 1800), señalaba que BRUNER metía en la misma familia minerales tan dispares como el estaño fibroso, la malaquita fibrosa, el antimonio rojo, el metal plumoso y las flores de cobalto. Algunos años después, en 1819, el descubrimiento del isomorfismo y del polimorfismo por MITSCHELICH, E. (1794-1863) serviría de pauta a los defensores de las teorías basadas en las características exteriores.

De la controversia surgió una revisión del sistema químico. De esta forma BERZELIUS, J. J. (1779-1848), que en 1819 había propuesto una sistemática de tipo catiónico, propone una nueva clasificación de los minerales basada en la presencia de los grupos aniónicos, donde los silicatos aparecen como derivados del ácido silícico. Al mostrar los aniones una menor tendencia a la sustitución que los cationes, los distintos autores fueron considerando a los primeros como los elementos en los que se fundamentarían sus clasificaciones. Por citar algunos autores que trabajaron en esta línea tenemos a SOKOLOV (1831), DANA, J. D. (1837) o ROSE (1852).

El enfrentamiento entre los defensores de las clasificaciones químicas y las físico-morfológicas llevó a que algunos autores buscasen las conciliadoras posturas de síntesis. De esta forma surgieron intentos de correlación entre las propiedades y la composición de los minerales. Dentro de este contexto habría que señalar los trabajos de KUPFER (1826) y KENNGOTT (1825).

1.6. LA EVOLUCION DE LA CRISTALOGRAFIA HASTA 1800

Los condicionamientos fundamentales para la evolución de la Cristalografía hasta 1800, provienen sobre todo del insuficiente desarrollo de la Química, que sólo a partir de este año, con la publicación de Dalton, llega a adquirir un carácter de sistema científico. Otros condicionantes fueron también el escaso desarrollo de las técnicas instrumentales si se exceptúan los microscopios de Leewenhoek y Jansen y el goniómetro, y la falta de desarrollo de una Teoría Electromagnética, que sólo se desarrollaría en el XIX.

Las primeras informaciones documentales sobre la forma geométrica de los cristales, se encuentran en la monumental obra de S. ISIDORO DE HISPALIS (560-636), las *Etimologías*. En ella se hace notar la cristalización hexagonal del Cuarzo y la Esmeralda.

S. ALBERTO MAGNO (1193-1280), menciona el carácter octaédrico del Diamante en su *Natura Mineralium*.

La concepción atomística de la materia, propuesta originariamente por DEMOCRITO (470-360 a.n.E.), que sería resucitado en el siglo XVI por obra de G. BRUNO (1548-1600) y reformada y profundizada por GASSENDI (1592-1665), estará en la base de algunas de las concepciones cristalográficas del XVI y XVII.

Así, KEPLER (1571-1630) estudia el empaquetamiento de esferas para explicar la cristalización hexagonal de la nieve, descubriendo el empaquetamiento cúbico compacto y su relación con el hexagonal compacto.

HOOKE (1635-1705), contemporáneo de Newton y secretario de la Royal Society, amplía los estudios de Kepler sobre los empaquetamientos y muestra las diversas figuras que pueden generarse en su *Micrographia*.

HUYGENS (1629-1703), explica, con ayuda de su Teoría Ondulatoria de la Luz la doble refracción del espato de Islandia.

STENO, latinización de Stensen (1638-1686), médico danés que trabajó en Florencia, en *De Solidus intra Solidum Naturaliter Contento, Dissertationis Prodomus*, aparte de tratar otros aspectos geológicos, expone el descubrimiento de las inclusiones fluidas en los cristales, y la técnica de utilizar ejes de referencia para describir los cristales. Pero sobre todo, hace un descubrimiento fundamental: la constancia de los ángulos diedros de las caras cristalinas. GUGLIELMI en 1688, redescubrirá algunas de las principales aportaciones de Steno, un hecho aún relativamente frecuente en una época en que el saber científico y técnico no tenía medios de circulación general en Europa.

Casi cien años después, ROME L'ISLE, con un goniómetro inventado por su discípulo CARANGEOT, realiza múltiples medidas de los ángulos diedros, incluyendo la Ley de constancia de dichos ángulos en su *Cristallographie* de 1783.

El más importante cristalógrafo será el abate francés HAÜY (1743-1822), que publicará su *Essai d'une theorie sur l'estructure des cristaux* al año siguiente, 1784. Son varias las aportaciones de Haüy. En primer lugar enuncia la Ley de su nombre o de la racionalidad de los parámetros. Introduce, así mismo, el concepto de «forma primitiva», extraíble por exfoliación, desarrollando ideas de OLAF BERGMAN (1735-1784) que descubre que a partir del romboedro de calcita pueden explicarse todas las formas cristalinas de esta sustancia. También introduce de una forma sistemática la simetría y los ejes y establece seis «formas primitivas». Ya a comienzos del XIX, investigaría propiedades cristalográficas como la piro y piezoelectricidad de la turmalina, creando la Cristalofísica.

La primera vez que se empleó el término Cristalografía fue en 1723, tal y como puede apreciarse en la obra de CAPELLER *Prodromus crystallographie, de crystallis impropie sic dictis somentarum*. Posteriormente esta materia adquiere cuerpo de doctrina propio, independizándose de la Mineralogía.

En definitiva, hacia 1800 muchos de los elementos de la Cristalografía Geométrica habían sido descubiertos.

1.7. FACTORES CONDICIONANTES DE LA EVOLUCION DE LAS CIENCIAS GEOLOGICAS EN EL MUNDO HASTA 1800

De lo expuesto, pueden sacarse algunas conclusiones sobre los factores condicionantes del desarrollo de las Ciencias Geológicas hasta 1800, que se produjeron con algo más de un siglo de retraso respecto a la Mecánica. Para ordenar los factores podemos clasificarlos en dos grandes grupos: externos e internos a la propia ciencia.

Dentro de los *factores externos*, tenemos en primer lugar que analizar la necesidad que del conocimiento geológico tenía el aparato productivo, y muy especialmente la Minería. Esta era fundamentalmente metálica, de carácter filoniano o placeres. La minería del carbón sólo comenzó a extraer toneladas importantes en el Reino Unido a partir de 1750, gracias al vapor. En general, hasta esta época, gran parte de los yacimientos conocidos hacía siglos seguían explotándose, y los problemas de agotamiento eran pequeños en comparación con los que vendrían después debido al aumento rápido de los tonelajes producidos. Las necesidades mineras de conocimiento geológico, fueron con todo aumentando, y no es casual que la primera escuela geológica se creara en torno a las necesidades mineras en la Academia de Minas de Freiberg, o que los dos primeros tratados geológicos escritos por españoles, lo fueran por ingenieros geólogos en las colonias americanas y en torno bien a instituciones académicas como el Real Seminario de Minería de Nueva España para el caso de A. M. DEL RIO, o de la minería de Nueva Granada en el caso de J. J. DE ELHUYAR.



Figura 10.—Aspecto de los laboratorios de la Escuela de Minas de Freiberg, tomado de un tratado de Laboreo.

En cuanto a las posibilidades que los medios técnicos existentes ofrecían a la investigación geológica, había una doble limitación. De un lado la de las técnicas de muestreo, análisis y observación, muy limitadas. De otro, siendo necesaria la observación de muchos afloramientos en lugares distintos para formular hipótesis suficientemente válidas, debe constatar que el desarrollo de los medios y sistemas de transporte terrestre, permaneció hasta el ferrocarril público, en 1825, a un nivel no mucho más elevado que el medieval. Si WERNER hubiera visto Italia o Canarias como sus discípulos VON BUCH o HUMBOLDT quizá hubiera elaborado de otra forma sus teorías. El papel de los viajes largos no puede ser minimizado si se piensa en la importancia que tuvieron para LYELL o DARWIN. Este es un problema con el que no tuvieron que lidiar los fundadores de la Matemática, la Mecánica ni la Química.

Entre las condiciones limitantes externas, debe contarse también la influencia de la cosmogénesis bíblica. Esta influencia, que estuvo presente también en el desarrollo de la tesis heliocéntrica, retardó algo la Geología, pero no impidió su desarrollo al igual que el de la Geometría Celeste o la Mecánica. Su influencia limitante, presente tanto en el mundo católico como en el reformado, fue menor en éste. Probablemente la limitación mayor, pro-

venía del escaso tiempo, no más de 8.000 años, que daba al mundo; dada la lentitud de los procesos geológicos, el recurso a catástrofes como el Diluvio, era algo necesario para explicar formas o hechos como los fósiles marinos de las montañas o el propio relieve. Como hemos visto, sin embargo, el relato bíblico tenía elementos positivos en torno a los fósiles y a la admisión de una historia para la Tierra, frente al sistema aristotélico. Para la comprensión de la importancia que se daba al mantenimiento literal de la narración bíblica, ya desde un punto de vista social, debe pensarse, aparte del hecho de que la Iglesia era la principal organización junto al Estado, en que el cristianismo, en sociedades agrarias con pobres sistemas de transportes y comunicaciones y semiautárquicas, sin un verdadero mercado nacional, era el elemento central de cohesión social tras el idioma. Desde el punto de vista intelectual, por otra parte, la inexistencia de datos científicos no permitía más que una interpretación literal de la Biblia a los creyentes.

En cuanto a los *factores internos*, tenemos en primer lugar un gran factor limitante debido a la lentitud de los procesos geológicos, de forma similar a los procesos evolutivos del mundo orgánico, que junto a la idea de una Tierra con unos pocos miles de años, convertían la reflexión geológica en un acto de audacia y fe en el poder de la razón. Algo similar les sucedió a los astrónomos hasta el XIX con la idea existente de un pequeño Universo. Sin embargo, la visión constante del cambio del cielo, mucho más fácil que la de los procesos geológicos, fue un estímulo que favoreció el desarrollo científico a favor de la Geometría Celeste. Por otra parte, la experimentación era casi imposible, con lo cual la fuerza de los argumentos quedaba diluida. Igualmente, las posibilidades de observación, siquiera fuera indirecta, del interior de la Tierra, eran inexistentes. Añádase el retraso relativo de la Química o la inexistencia de la Química-Física por lo que hace a la Mineralogía y la Petrología, y el de la Biología por lo que hace a la Paleontología, y se tendrá un cuadro de serios obstáculos.

Todo esto se reflejó también en un proceso de institucionalización científica retrasado: sólo en el XIX se constituirán las primeras Sociedades Geológicas y los Institutos Geológicos y Geológico-Mineros. La Royal Society, dedicada sobre todo a problemas físicos, se había constituido en 1662, y la Academie des Sciences en 1666.

2. LA EVOLUCION DE LAS IDEAS GEOLOGICAS EN ESPAÑA HASTA 1800

2.1. LA EVOLUCION DEL AMBIENTE SOCIOECONOMICO, TECNICO Y CIENTIFICO

España entra en la Edad Moderna como la más importante potencia europea, gracias a la temprana constitución de un Estado Nacional, el contacto secular con la cultura más

avanzada de la Alta Edad Media, la islámica, la demografía, la pujanza económica, el descubrimiento de América y la constitución del mayor Imperio europeo desde Roma.

En el XVI, sin embargo, este panorama comenzará ya a cambiar debido a la crisis económica unida a la «revolución de los precios» (producida por la afluencia de metales preciosos de América) y la crisis lanera, y al tremendo costo de las guerras de religión en Europa con Carlos I de España y V de Alemania y Felipe II, que harán quebrar dos veces al Estado español en el momento que están llegando las riquezas de América. El XVII será un claro siglo de decadencia política-militar (que se concretará en la Paz de Westfalia) y económica. El XVIII, que se abre con el cambio de la dinastía de Habsburgo por la de Borbón, introduce elementos de renovación ilustrada en casi todos los órdenes, que se concretarán en una mejoría económica y técnica, en especial en el reinado de Carlos III. En el reinado de Carlos IV, volverá la tendencia decadente, que ya sin solución de continuidad acabará en la Guerra de la Independencia (1808-1814).

Técnicamente, España realizará aportaciones importantes en la Ingeniería Naval y Navegación, produciendo manuales de navegación que como el de MEDINA (XVI) se emplearán en todo el mundo hasta el siglo XVIII o el primer libro de Ingeniería Naval del mundo, la *Instrucción Náutica* de DIEGO GARCIA DE PALACIO, publicada en Nueva España (México) en 1587; en el XVIII la Armada española, gracias a los arsenales peninsulares y americanos, será la tercera del mundo. Otro campo con aportaciones fundamentales, será el de la Ingeniería Minero-Metalúrgica, impulsada por la minería de la plata y oro de América. Sucesivamente, se pondrán a punto técnicas de amalgamación en frío con el método de los patios de BARTOLOME MEDINA en 1555 y la amalgamación en caliente de ALONSO BARBA, párroco de Potosí en el XVII; este mismo técnico, publicará el *Arte de los Metales* que emplearán los metalúrgicos de todo el mundo hasta 1800. La Ingeniería Militar, será otro campo en que España hará importantes aportaciones. En 1765, JORGE JUAN (1713-1773), que había dirigido la expedición geodésica al Perú (1735-1744) y el Seminario de Nobles de Madrid creado en 1725, organizará la Escuela de Ingenieros de Marina en Cádiz. En 1777 se creará la Academia de Minas de Almadén, donde enseñaría STORR (...-1802), quince años después de la primera del mundo, la de Praga en 1762, trasladada a Schemnitz en 1770. En México, se fundará en 1792 la primera Escuela de Ingeniería de América que ha sobrevivido, el Real Seminario de Minería, por obra del ingeniero de minas español FAUSTO DE ELHUYAR (1755-1833), y JOVELLANOS, creará en 1794 en Gijón el Instituto Asturiano de Náutica y Mineralogía. AGUSTIN DE BETANCOURT fundó en 1791 el Cuerpo Facultativo de Caminos. En relación con la investigación minero-metalúrgica, ingenieros de minas españoles descubrirán dos nuevos metales: los hermanos Elhúyar, el volframio en 1783 y ANDRES MANUEL DEL RIO (1765-1849) el vanadio (denominado por él primero pancromo y después eritronio) en

1801. Previamente, Antonio de Ulloa había descubierto el platino en 1748, para el cual el francés FRANCISCO CHABANEAU (1754-1852), afincado en España, diseñaría unos primeros sistemas rentables de obtención. Todos ellos, seguían en definitiva la tradición de la escuela ensayista española, que ya en el XVI era la más importante del mundo y había producido las primeras monografías sobre el tema, como el *Quilatador de oro, plata y piedras* de JUAN DE ARFE en 1572.

A nivel científico, la decadencia económica y la censura de la Contrarreforma, producirán la marginación española de la Revolución Científica del XVII. A pesar del esfuerzo de los «novatores» como Cabriada, Mut, Tosca, Zaragoza y Caramuel, que desarrollan sus trabajos a fines del XVII y la primera mitad del XVIII para introducir la Nueva Ciencia del XVII y el propio impulso ilustrado, España no recuperará el nivel relativo del XVI nunca. Destacan las aportaciones del francés PROUST (1754-1826), director del Laboratorio de Química de Artillería en Segovia y de la Escuela de Química, creada en 1799, que descubrirá en España la Ley de Proporciones Definidas durante su trabajo en 1786. En Ciencias Naturales, a diferencia de las Físicas y Matemáticas, hay un nivel digno tras la creación del Jardín Botánico de Madrid en 1755, dirigido por el médico farmacéutico CASIMIRO GOMEZ ORTEGA (1740-1818) y después por el naturalista ANTONIO CAVANILLES (1745-1804). Desempeñan un importante papel las Expediciones Naturalistas. Aparte de la de Perú citada, tenemos la del padre MUTIS (1732-1808) en Nueva Granada (Colombia) de 1782 a 1808; la de Perú y Chile de los farmacéuticos-botánicos HIPOLITO RUIZ (1752-1816) y JOSE PAVON (1754-1840) de 1778 a 1787, en la que se descubrieron más de 500 especies nuevas y la del Río de la Plata (1781-1801) dirigida por el ingeniero militar FELIX DE AZARA (1746-1821), con 200 especies nuevas y observaciones que fueron de gran importancia para DARWIN. A nivel institucional, debe destacarse también la creación en 1771, a través de la donación de sus colecciones por PEDRO FRANCO DAVILA, natural de Guayaquil, del Real Gabinete de Historia Natural, y la instauración por Florida-Blanca en 1787 de los estudios de Ciencias Naturales en dicho Gabinete (donde el alemán HERRGEN ocuparía la cátedra de Oritognosia y traduciría la *Oritognosia* de WIEDEMANN), así como la salida del primer número de los *Anales de la Historia Natural* en 1799, que llegarían a ver la luz en un total de 31.

2.2. LA EVOLUCION DE LAS IDEAS GEOLOGICAS EN ESPAÑA HASTA 1800

Las primeras especulaciones geológicas de que tenemos noticia fueran hechas por una persona nacida en España, son las de SENECA, en el siglo I, que en *Cuestiones Naturales* dijo que los terremotos eran originados por aire subterráneo.

Habrà que esperar a S. ISIDORO DE HISPALIS, en el si-

glo VII, que toma nota de los fósiles, y, correctamente, les atribuye un origen orgánico, añadiendo que son testimonio del Diluvio.

La exploración naturalista del continente americano, produciría observaciones que serían un estímulo para la reflexión. FRANCISCO HERNANDEZ dirigió entre 1571 y 1577 la exploración de Nueva España (México), realizando la *Historia Natural de Nueva España*.

Destacamos también los nombres de ALVARADO, P. (1485-1541), que describe los volcanes guatemaltecos; ACOSTA, J. (1540-1600), que narra la *Historia Natural y Moral de Indias*, en 1590; OVIEDO Y VALDES, que publica la *Historia General y Natural de Indias*; COBO, B. (1596-1657), que realiza diversas observaciones sobre Nicaragua, Guatemala y México, en *Historia del Nuevo Mundo*; ANTI-LLON, I. (1778-1814), que tiene dos obras fundamentales: *Lecciones de Geografía Astronómica, Natural y Política*, 1804-1806, y *Elementos de Geografía Astronómica, Natural y Política de España y Portugal*, 1808, y ROJAS CLEMEN-TE, S. (1777-1827).

La reflexión geológica moderna en España, al igual que en el resto de Europa, estará fuertemente condicionada por la Biblia hasta 1750 y registra movimientos paralelos a los centroeuropeos. Una parte importante de la reflexión geológica hasta 1800, es realizada por sacerdotes y religiosos como se verá, reflejando actitudes distintas según las órdenes religiosas. Así, dominicos y jesuitas tienen una actitud condicionada por la supeditación de la razón a lo revelado y defienden la Escolástica, mientras que franciscanos y agustinos tratan de armonizar ambas, dando un amplio margen de autonomía a la razón. El cardenal Cisneros, p.e., franciscano, en una posición netamente moderna, apoya el nominalismo occamiano, uno de los soportes del positivismo frente al escolasticismo aristotélico.

En el siglo XVI, el descubrimiento de América planteó el problema de cómo había llegado la vida allí tras el Diluvio Universal, siendo que éste había exterminado a todos los seres vivos salvo los inquilinos del Arca de Noé. Este interrogante, llevó al padre JOSE DE ACOSTA (1540-1600) en su *Historia Natural y Moral de las Indias* (1590), a plantear la existencia de puentes de tierra con el Viejo Mundo que después habían desaparecido, lo cual llevaba a aceptar una historia geológica para el planeta.

En 1655 LA PEYRERE, planteó en torno a la Epístola de San Pablo, que indicaba que hasta la Ley Divina había pecado, que dándose ésta a Adán y siendo necesaria la existencia de hombres para que hubiera pecado, deberían haber existido algunos anteriores a Adán, los preadamitas. Las implicaciones teológicas de esta tesis, provocaron una rápida reacción de la Iglesia que llevó a prisión a su autor al año siguiente. En España, las implicaciones para el poblamiento de América, llevarán a Fr. BENITO GERONIMO FEIJOO Y MONTENEGRO (1676-1764), benedictino, aparte de a combatir las ideas preadamitas, a admitir, como probaban las conchas marinas en las montañas,

En relación con el problema del poblamiento americano, el jesuita F. J. CLAVIJERO (1731-1793), en su *Historia antigua de México* de 1781, expone que América y África habían estado unidas por tierra que se hundió, habiéndose producido la migración tras la confusión de las lenguas en Babel. En torno a este problema, el marino ANTONIO DE ULLOA Y DE LA TORRE (1716-1795), que con Jorge Juan dirigiría la expedición al Perú, pensaba que el poblamiento había sido por mar, tesis que en nuestros días sería defendida por Thor Heyerdal con su Kon-Tiki.

Todas las principales polémicas con trasfondo geológico, tendrían repercusión en España además de las citadas, así las relativas a las tesis de Burnett o Scheutzer, y las que desatarían las obras de Buffon o la Enciclopedia. Ello prueba que España no estaba aislada de lo que ocurría en Europa; en este sentido, la organización internacional de la Iglesia, fue uno de los mecanismos de vinculación al ambiente intelectual centroeuropeo, al menos en los temas polémicos, y la fuerte componente española de órdenes como las de los dominicos y jesuitas, fue un elemento favorable.

La aportación del franciscano Fr. J. TORRUBIA (1700-1768), con su *Aparato para la Historia Natural española* de 1754, marca quizá el punto de inflexión hacia una Geología científica en nuestro país, no tanto por su contenido como por la claridad de ideas sobre el método a seguir, priorizando la observación. Torrubbia diría en este sentido que su «Aparato está purgado en el Crysol de Bacon». Torrubbia conocía Filipinas y Nueva España, y acumuló datos durante treinta años antes de publicar el *Aparato*. Establece que los fósiles son restos orgánicos producidos en el Diluvio y describe e ilustra con ellos su obra. Un interesante ejemplo de su actitud, entre razón y fe, es la argumentación que hace en torno al Diluvio, argumentando que en cuarenta días, por muy intensamente que hubiera llovido, no podía haber caído tanta agua como para sumergir las más altas montañas, concluyendo como creyente que «El Diluvio se celebró con agua venida milagrosamente de las manos de Dios». Torrubbia admitía la erosión de las montañas y la sedimentación, aunque no el crecimiento de éstas, y rebatía argumentos de Feijoo sobre el crecimiento de las rocas.

ULLOA, en 1772, expone con claridad en sus *Noticias Americanas* el origen fluvial de los valles.

La obra del ingeniero de minas de oficio, irlandés, con preparación universitaria amplia en París, G. BOWLES (ca. 1720-1780), se sitúa plenamente en el campo científico. Había venido a España en 1752 recomendado por Antonio Ulloa, a quien había conocido en París, con objeto de mejorar las técnicas mineras, para lo cual estuvo en las minas de Almadén y Guadalcanal. Fruto de sus observaciones sistemáticas fue su *Introducción a la Historia Natural y Geografía Física de España* publicada en 1775 y que, según él, consta de «hechos y ratiocinios». En ella, en torno a problemas concretos, establece la acción del mar sobre las costas y los movimientos eustáticos; el

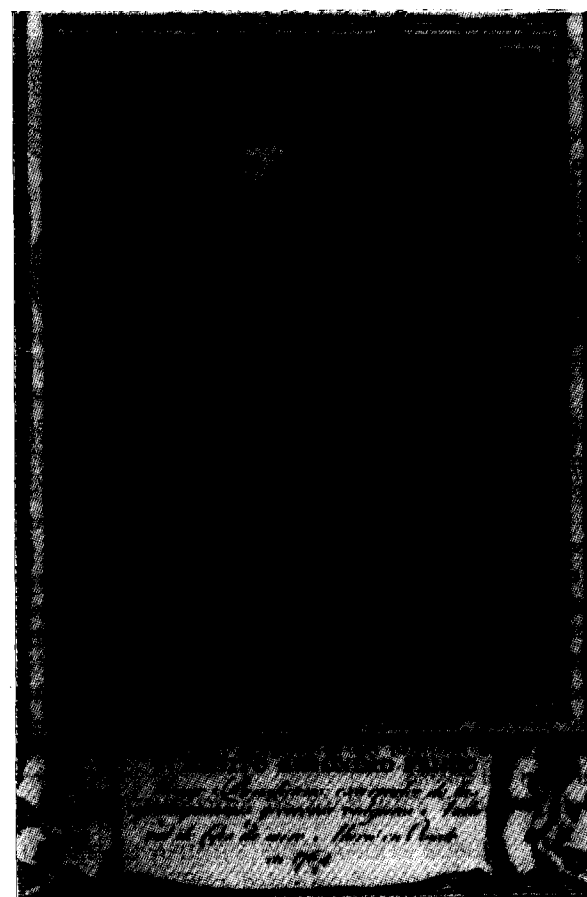


Figura 11.—El benedictino Feijoo (1676-1764) contribuyó poderosamente a la divulgación de algunas ideas geológicas.

que la tierra se eleva y se hunde dando paso a migraciones, y a que había montañas prediluvianas no creadas por Dios sino fruto del hecho de que «las piedras nacen y crecen». Estas tesis serían combatidas por SOTO y MARNE, franciscanos. Feijoo fue un poderoso divulgador en su *Teatro crítico universal* (1726-1740), de muchas ideas científicas de su época. También se daría cuenta de algunos procesos dinámicos en el litoral.

JOSE ANTONIO GONZALEZ DE SALAS (1588-1651), noble que editaría la primera Antología Poética de Quevedo y como éste perteneciente al círculo neostoico madrileño, en su edición de la Geografía de Pomponio Mela en 1644, expone la idea de que el Diluvio cambió completamente la configuración de la Tierra.

JOSE VICENTE DEL OLMO, en su *Nueva descripción del Orbe* de 1681, da cuenta de la erosión de las montañas, y anticipa la idea de la isostasia, que sería enunciada por Bouguer tras la expedición hispano-francesa al Perú en el XVIII, al señalar que las montañas se elevan para recuperarse del desgaste erosivo.



Figura 11.—El benedictino Feijóo (1676-1764) contribuyó poderosamente a la divulgación de algunas ideas geológicas.

que la tierra se eleva y se hunde dando paso a migraciones, y a que había montañas prediluvianas no creadas por Dios sino fruto del hecho de que «las piedras nacen y crecen». Estas tesis serían combatidas por SOTO y MARNE, franciscanos. Feijoo fue un poderoso divulgador en su *Teatro crítico universal* (1726-1740), de muchas ideas científicas de su época. También se daría cuenta de algunos procesos dinámicos en el litoral.

JOSE ANTONIO GONZALEZ DE SALAS (1588-1651), noble que editaría la primera Antología Poética de Quevedo y como éste perteneciente al círculo neoestoico madrileño, en su edición de la Geografía de Pomponio Mela en 1644, expone la idea de que el Diluvio cambió completamente la configuración de la Tierra.

JOSE VICENTE DEL OLMO, en su *Nueva descripción del Orbe* de 1681, da cuenta de la erosión de las montañas, y anticipa la idea de la isostasia, que sería enunciada por Bouguer tras la expedición hispano-francesa al Perú en el XVIII, al señalar que las montañas se elevan para recuperarse del desgaste erosivo.

En relación con el problema del poblamiento americano, el jesuita F. J. CLAVIJERO (1731-1793), en su *Historia antigua de México* de 1781, expone que América y África habían estado unidas por tierra que se hundió, habiéndose producido la migración tras la confusión de las lenguas en Babel. En torno a este problema, el marino ANTONIO DE ULLOA Y DE LA TORRE (1716-1795), que con Jorge Juan dirigiría la expedición al Perú, pensaba que el poblamiento había sido por mar, tesis que en nuestros días sería defendida por Thor Heyerdal con su Kon-Tiki.

Todas las principales polémicas con trasfondo geológico, tendrían repercusión en España además de las citadas, así las relativas a las tesis de Burnett o Scheutzer, y las que desatarían las obras de Buffon o la Enciclopedia. Ello prueba que España no estaba aislada de lo que ocurría en Europa; en este sentido, la organización internacional de la Iglesia, fue uno de los mecanismos de vinculación al ambiente intelectual centroeuropeo, al menos en los temas polémicos, y la fuerte componente española de órdenes como las de los dominicos y jesuitas, fue un elemento favorable.

La aportación del franciscano Fr. J. TORRUBIA (1700-1768), con su *Aparato para la Historia Natural española* de 1754, marca quizá el punto de inflexión hacia una Geología científica en nuestro país, no tanto por su contenido como por la claridad de ideas sobre el método a seguir, priorizando la observación. Torrubia diría en este sentido que su «Aparato está purgado en el Crysol de Bacon». Torrubia conocía Filipinas y Nueva España, y acumuló datos durante treinta años antes de publicar el *Aparato*. Establece que los fósiles son restos orgánicos producidos en el Diluvio y describe e ilustra con ellos su obra. Un interesante ejemplo de su actitud, entre razón y fe, es la argumentación que hace en torno al Diluvio, argumentando que en cuarenta días, por muy intensamente que hubiera llovido, no podía haber caído tanta agua como para sumergir las más altas montañas, concluyendo como creyente que «El Diluvio se celebró con agua venida milagrosamente de las manos de Dios». Torrubia admitía la erosión de las montañas y la sedimentación, aunque no el crecimiento de éstas, y rebatía argumentos de Feijoo sobre el crecimiento de las rocas.

ULLOA, en 1772, expone con claridad en sus *Noticias Americanas* el origen fluvial de los valles.

La obra del ingeniero de minas de oficio, irlandés, con preparación universitaria amplia en París, G. BOWLES (ca. 1720-1780), se sitúa plenamente en el campo científico. Había venido a España en 1752 recomendado por Antonio Ulloa, a quien había conocido en París, con objeto de mejorar las técnicas mineras, para lo cual estuvo en las minas de Almadén y Guadalcanal. Fruto de sus observaciones sistemáticas fue su *Introducción a la Historia Natural y Geografía Física de España* publicada en 1775 y que, según él, consta de «hechos y raciocinios». En ella, en torno a problemas concretos, establece la acción del mar sobre las costas y los movimientos eustáticos; el

origen de las fuentes y la relación entre la composición del agua subterránea y los terrenos que atraviesa; la dinámica fluvial (aunque no la sedimentación marina) y descubre el volcanismo apagado en España. Hombre que conocía Freiberg, Francia y los Alpes, asume la unidad geológica del mundo, comparando formaciones españolas y europeas y hablando de la homogeneidad de los procesos en todas las zonas. Estudia detenidamente la «descomposición» (meteorización) de las rocas. Reflexionando ante una montaña, dice: «La razón humana se pierde considerando el tiempo que ha sido menester para formar ésta y otras montañas», atisbando por tanto la inmensidad del tiempo geológico diez años antes que Hutton. Expone asimismo, la idea de ciclo geológico, aunque de forma incompleta. La obra de Bowles, aparte de ser la primera descripción física de España realmente científica en un sentido moderno, indica que no pocas de las ideas que hombres como Hutton exponían años más tarde, estaban ya en el ambiente y que éste estaba maduro para su aceptación.

El jesuita DEL BARCO (1709-1790) (SEQUEIROS, 1992), en su *Historia Natural de la Antigua California* (ca. 1780), recientemente publicada en España en 1989, expone unas ideas sobre los fósiles modernas y la tesis de que las costas marinas de California se han elevado cuestionando su origen diluviano por el poco tiempo que duró.

LOPEZ DE AYALA, literato y naturalista aficionado, expone en su *Historia de Gibraltar* de 1782, que el Estrecho se ensancha progresivamente, y por tanto habría tenido un comienzo, como el Mediterráneo, así como una teoría sobre las corrientes marítimas Atlántico-Mediterráneo.

El químico PROUST expone correctamente en un trabajo de 1791 la génesis de las terrazas fluviales, indicando que los cantos rodados de las mismas son el testimonio de que el río había corrido antes a esas cotas. Asimismo, avanza la audaz idea de que tanto el granito del Sistema Central como el mariánico, son afloramientos de un sustrato que subyace a toda la submeseta sur.

La obra geológica del padre A. J. DE CAVANILLES (1745-1804), es también plenamente científica. Cavanilles, que entre 1778 y 1789 había estudiado e investigado en Francia aprovechando su carácter de preceptor de los hijos del Duque del Infantado, fue director entre 1801 y 1804 del Jardín Botánico de Madrid. Al igual que Mutis, fue un botánico eminente, y era un hombre ilustrado, lo que no le impidió replicar en nombre de los ilustrados españoles a la injusta consideración de las según Nicolás Masson de Morviliers nulas aportaciones españolas a la cultura europea en los últimos siglos, que había expuesto en el artículo «España» de la *Nouvelle Encyclopédie* en 1782. Su aportación se contiene en la excelente obra *Observaciones sobre la Historia Natural, Geográfica, Agrícola, población y frutos del Reyno de Valencia* (1795-97). Cavanilles, cuyas ideas sobre la formación de las rocas son neptunistas, utiliza sistemáticamente los fósiles para identificar las rocas, haciendo algunas aportaciones en torno

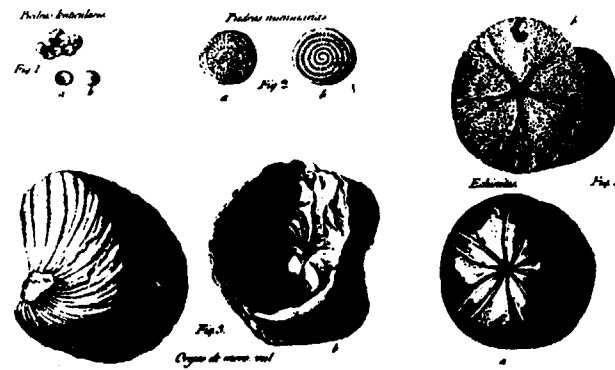


Figura 12.—Fósiles encontrados por Cavanilles (1745-1804). En *Observaciones sobre la Historia Natural, Geografía, Agricultura, población y frutos del Reyno de Valencia* (1795-1797).

a los nummulites, y comparando los hallados en Valencia con los de otros países; no alude al Diluvio en su obra. Explica correctamente la formación de travertinos, así como el ciclo erosión-transporte-sedimentación. También, como Bowles, atisba la inmensidad del tiempo geológico a partir de la lentitud de la erosión del relieve y la clara alteración del mismo.

2.3. FACTORES CONDICIONANTES DEL DESARROLLO DE LAS CIENCIAS GEOLOGICAS EN ESPAÑA HASTA 1800

Los factores que condicionaron en España el desarrollo de estas Ciencias, fueron similares a los del resto de Europa, tanto en lo que respecta a los externos como a los internos. Solamente caben algunas matizaciones diferenciales.

La primera es el papel que jugaron los territorios americanos, con su dimensión, su variedad natural y su importancia minera. Uno de sus efectos fue dotar de una visión amplia, no exclusivamente europeocéntrica a quienes dedicaron sus esfuerzos a este campo. En el XVIII, momento en que la evolución se está decantando hacia la Geología Científica, buena parte de los hombres que están abriendo este campo, de Ulloa a Del Río, de Elhúyar a Del Barco, conocen partes de América, e incluso algunos como Torrubia, Filipinas. No es de extrañar por tanto el correcto tratamiento de problemas como el de los fósiles y sus implicaciones, o el del ciclo erosión-sedimentación. Llama sin embargo la atención el no cuestionamiento del neptunismo cuando tanto en Nueva España como en Nueva Granada o en el Virreinato del Perú, había volcanismo activo. Quizá el sesgo minero, que en el caso de DEL RIO produciría lo que L. B. GUYTON DE MORVEAU (1737-1816) juzgaría como «la Mineralogía más notable de su tiempo en todas las lenguas», pueda explicar este hecho; en el

caso de Ulloa, el debate neptunismo-plutonismo es posterior a las observaciones y reflexiones de éste (1748 para la *Relación histórica del viaje* y 1772 para las *Noticias americanas*).

La segunda matización es el importante papel que desempeñarían los extranjeros, venidos a España gracias a la inteligente política ilustrada del XVIII. Bowles, Storr y Herrgen, hicieron aportaciones de gran importancia, en particular el ingeniero de minas irlandés Bowles, cuyo libro es el primero publicado en España plenamente científico por método y contenido. Esta característica se mantendrá ya a lo largo del desarrollo de las Ciencias Geológicas como una componente estructural, de Verneuil y Collomb en el XIX a Fallot en el XX.

Al terminar el siglo XVIII, puede afirmarse que las minorías ilustradas españolas que se interesan por estos temas, participan plenamente de las ideas científicas que sobre Ciencias Geológicas se dan en el resto de Europa, y que hay en embrión dos escuelas que persistirán en adelante; la más antigua, constituida en torno a los ingenieros de minas, que cien años más tarde, en 1889, dará a luz el primer Mapa Geológico Sistemático de España, y la constituida en torno a los naturalistas del Real Gabinete de Historia Natural.

3. LA ORYTHOLOGIA DE JUAN JOSE ELHUYAR

3.1. BREVES APUNTES BIOGRAFICOS SOBRE EL INGENIERO DE MINAS JUAN JOSE ELHUYAR (1754-1796)

El 15 de junio de 1754 nace en Logroño J. J. ELHUYAR. Poco más de un año después lo hace su hermano FAUSTO. Debido a esta corta diferencia de edad jugaron y estudiaron juntos, manteniendo una fuerte amistad que perduraría a través del tiempo.

Las biografías de Juan José son escasas, siendo mucho más numerosas las relativas a Fausto. Destacamos como más completas las de su descendiente el Dr. CAYCEDO, B. J. (1971), y LOPEZ DE AZCONA, J. M. (1983 y 1985). También aportan algunos datos: MAFFEI, E., y RUA DE FIGUEROA, R. (1871); MAFFEI, E. (1877); RYDEN, S. (1954), y otros. Nosotros recogeremos de ellas los datos de interés para este estudio, tales como son la formación, investigación y experiencia profesional.

Ambos hermanos inician su formación con los jesuitas, en la capital riojana, hasta la expulsión de éstos, por Real Decreto firmado por Carlos III en abril de 1767.

Desconocemos cómo prosigue su instrucción hasta el año de 1772 en que su padre les envía a París para que cursen estudios de medicina. Gracias al origen aquitano de sus ancestros disponían de un amplio dominio de la lengua francesa, por tanto los estudios no se vieron enturbiados por dificultades lingüísticas. Recordemos que la enseñanza

De la Orythologia.

La Orythologia subsumida en Mineralogía, es la Historia natural de las substancias inorgánicas de nro. Globo, del conocimiento de sus propiedades, sus interinas como externas, de su origen, lugares en que se hallan, y alteraciones que padecen. Divide en tres partes: la de saber en Orythoprosia, la de la Substancia, y Orythografía.

La Orythoprosia es el conocimiento de las fósiles y sus caracteres propios y denominaciones adecuadas en un órden natural.

La Substancia es el conocimiento de la estructura interior de nro. Globo, considerando d'órden en que se hallan las diversas materias y sus alteraciones.

La Orythografía es la descripción de las Montañas particulares á cada País, y los productos inorgánicos que en ellas se encuentran.

Por substancias inorgánicas entendemos los productos naturales que se extraen de las entrañas de la tierra, en los quales no se encuentran vasos, ni vasos que elaboren jugos, indico alguno de acción vital, ni facultad locomotiva: caracteres que la distinguen de los Animales, y Vegetales. Son tambien fósiles que se extraen subiendo en lo interior del Globo, y aunque otros palabras



Figura 13.—Orythologia, muy probablemente de J. J. ELHUYAR.

médica de la época se apoyaba en buena medida en los conocimientos de la incipiente Química, así como en las Ciencias Naturales, principalmente en la Botánica.

Según LOPEZ AZCONA, J. M. (1983), *Tuvieron la suerte de conocer en París al químico H. M. ROUELLE (1718-1779)*, el cual había sucedido en la docencia de esta materia a su hermano GUILLAUME FRANÇOIS, con motivo de su fallecimiento en 1770.

Guillaume es un científico de mayor talla que Hilarie Marie. Crea una importante escuela química, siendo maestro, entre otros, de Lavoisier. Asimismo determina que las sales son el resultado de la acción de los ácidos sobre las bases.

Fueron discípulos aventajados de Hilarie, colaborando con él en la confección de sus dos únicas obras conocidas:

Tableau de l'analyse chimique (1774) y Opuscules physiques et chymiques (1774). También recibieron lecciones del famoso médico y químico J. D'ARCET (o DAR CET) (1725-1779), Profesor del College Royal de Francia y ensayista metalúrgico. Este científico descubriría una aleación de baja temperatura entre el bismuto, plomo y estaño, la cual lleva su nombre.

Juan José regresa a España en diciembre de 1777, poco después lo hace su hermano Fausto. Ambos traerían una amplia formación científica. En 1778 pasan a Vergara, donde la Real Sociedad Bascongada de Amigos del País había creado el centro científico más importante de España, el Seminario Patriótico.

Por R. Cédula de 26 de marzo de 1778 se establecen Cátedras de Química, Mineralurgia y Metalurgia, siendo dotadas por el Rey con 30.000 reales anuales para sueldos del profesorado, así como con otras partidas para material fungible y mobiliario. D. Juan de Elhúyar padre, que era miembro de la Sociedad desde 1777, quería que sus hijos pasaran a ocupar labores docentes en el Real Seminario, resaltando de ellos su amplia formación en la capital francesa (al final sólo lograría esto para Fausto en 1783).

El Ministro de la Marina, el marqués González de Castejón, estaba interesado en conocer las nuevas técnicas de fabricación de cañones por vaciado en hueco, sobre todo las practicadas en Carron (Escocia). Tratando de recopilar información, a través de una persona de suficiente talla científica, se dirige a los responsables del único centro hispano donde se cursan estudios metalúrgicos con amplitud. Se solicita al fundador y primer Director del Seminario, X. M. DE MUNIBE E IDIAQUEZ, Conde de Peñafloreda (1723-1785), así como al Secretario perpetuo de la Sociedad, J. M. DE EGUIA, Marqués de Narros (1723-1803), una persona para llevar a cabo dicha misión.

El nombre propuesto es el de Juan José Elhúyar, pero hábilmente la Sociedad Bascongada de Amigos del País pediría compensaciones por dicha pérdida, proponiendo al Ministerio que se becara también a su hermano Fausto, para que le acompañara a lo largo de sus viajes y estudios. Pretendían incrementar la formación de este último en importantes Centros docentes europeos, así como en la parte práctica adquirida con motivo de la visita a minas y fábricas, ya que el fin perseguido era que éste fuera posteriormente contratado como Profesor del Seminario.

El hijo mayor del Conde de Peñafloreda, R. M. DE MUNIBE (1751-1774), había sido enviado por su padre a Europa para complementar su instrucción. Desde 1770 a 1773 recorre Francia, los Países Bajos, Alemania, Dinamarca, Suecia, Austria e Italia, para adquirir principalmente conocimientos de Mineralogía, Química, Minería y Metalurgia, así como otras materias consideradas básicas, para mediante su aplicación lograr el desarrollo de su patria chica. En el curso 72/73 estudia en la Escuela de Minas de Freiberg (y tal vez sea el primer español que lo hiciera), donde aún no había sido contratado el eminente Werner, pero en

78. 78

et le Calt n'avoit aucune ressemblance avec les metaux connus.

Acide tungustique

La pierre pesante est compose d'un acide particulier de terre calcaire, d'un peu de terre vitreable et d'1/2 pour cent de fer ou repare l'acide en faisant fondre dans un Creuset & partie de cette pierre avec l'alkali: on dissout le produit dans l'eau, et il reste une poudre blanche qui est Calcaire et que l'acide nitreux dissout en partie, ce qui reste est de la pierre pesante non de compose, et un peu de terre vitreable, on procedant. Comme ci demur jusqu'à l'entiere de son pinition, on obtient environ 2 pour cent de terre vitreable, et on n'est pas sur si elle ne produit de l'alkali, le fer est precipite de la dissolution acide par l'alkali phlogistique dont 6 parties contiennent 2 de fer, on precipite la terre calcaire par le moyen d'un alkali, et l'acide pesant de la dissolution alkali ne par l'acide vitriolique, cet acide est suppure

Figura 14.—Notas sobre el ácido tungstico en los Apuntes del curso impartido por Bergman.

ella ya daba sus clases de Química metalúrgica GELLER, C. Fruto de estos viajes hay que destacar el interés que Ramón María adquiere por la Mineralogía, traduciendo en 1773 la obra de Cronstedt.

Otro hijo de Peñafloreda, llamado Antonio María, también pasa, en 1775, a estudiar Química en París, para posteriormente trasladarse a Suecia, donde adquiere conocimientos metalúrgicos.

Suponemos que las experiencias de Ramón y de Antonio sirvieron de orientación en la planificación del viaje de los hermanos Elhúyar. Asimismo es probable que los hermanos Munibe, al menos Antonio, coincidieran con los Elhúyar en París, lo que pudo influir, por otro lado, en la elección de Juan José.

En 1778 parten los hermanos Elhúyar, vía París, hacia la fábrica de cañones de Manheim, en Alemania. Posteriormente se dirigen a la Escuela de Freiberg, matriculándose

en el curso 78/79. Allí fueron discípulos de WERNER, A. G.; REGHSTER, y GELLER, C. A finales de curso, Werner, en su informe anual señala como alumnos destacados a Juan José y a Fausto.

Los hermanos Elhúyar permanecieron en la Escuela de Minas sajona por espacio de tres cursos, dado el interés que despertaban en ellos las enseñanzas allí recibidas. En abril de 1781 abandonan Freiberg, pasando a visitar la Escuela Schmnitz, en Hungría.

Un hecho muy importante de este viaje es la visita que realizaron en Viena al metalurgo I. E. von BORN (1742-1791), el cual aún no había puesto en marcha el método de los toneles de amalgamación.

Posteriormente recorrieron las minas y fábricas de Estiria, Carintia, Carniola y Tirol.

En otoño, Juan José parte hacia Upsala, en Suecia, para asistir a las lecciones de T. O. BERGMAN (1735-1784), mientras que Fausto regresa a Vergara para hacerse cargo de las clases de Mineralogía, en el Real Seminario.

Juan José estuvo en Upsala durante un semestre del curso 81/82, alcanzando un notable nivel químico, sobre todo en lo relativo a análisis por vía húmeda, por precipitación química y mediante el empleo del soplete. Allí conoce a CH. A. H. GROSSART DE VIRLY, con quien traba una buena amistad. Ambos recorrerían Escandinavia juntos, reconociendo las minas de cobre de Falun, visitando al boticario C. W. SCHEELE (1742-1786), en Köping, las minas de plata de Krönsberg, etc. Recordemos que Scheele había obtenido, al igual que lo hiciera Juan José en los laboratorios de Bergman, el ácido tungsténico, sin llegar a poder aislar el metal en él contenido.

Estaba previsto que Juan José fuera a Inglaterra y así lo hizo en el verano de 1782. La visita fue rápida, pasando enseguida hacia España.

A su vuelta tuvo que presentar un amplio informe al Ministro González Castejón para dar cuenta del cumplimiento de la misión encomendada. Parece ser que éste no quedaría satisfecho, por considerar insuficiente la información obtenida sobre los nuevos métodos de fabricación de cañones.

Nada más llegar a Vergara, Juan José cuenta a Fausto sus experiencias en Suecia, comentándole el hecho de la obtención de un ácido, del cual comentaban Bergman y Scheele la posibilidad de extraer un nuevo metal. De acuerdo con esto, realizan diversos ensayos con muestras de wolframita (mineral que los alemanes llaman Wolfram o Wolfarth y cuyo nombre latino es Spuma Lupi o Lupis Jovis) procedente de las minas de estaño de Schlackenwalde, en Bohemia. Por fin, a principios de 1783, obtuvieron un nuevo metal, de peso específico elevado, al que bautizaron con el nombre de volframio.

En septiembre, presentaron una memoria sobre este acontecimiento a las Juntas Generales de la Real Sociedad

Bascongada de Amigos del País bajo el título *Análisis químico del Volfram, y examen de un nuevo metal, que entra en su composición*. Poco después, este trabajo es remitido a la Academia de Ciencias, Inscriptions et Belles Lettres de Toulouse (1784), a partir de este momento la noticia del nuevo descubrimiento inicia su andadura universal, siendo dicho hallazgo publicado en las principales lenguas europeas.

Al ser éste el único libro editado de Juan José, es conveniente detenerse en su análisis, sobre todo desde el punto de vista mineralógico que es el que suscita nuestro interés en este momento. Llama la atención el inicio de la obra con la descripción de la wolframita, siguiendo el método dado por Werner en su obra *Tratado de los caracteres externos de los fósiles*. Se aprecian asimismo citas a importantes oritognostas tal es el caso de Henckel, Cronstedt, Walleurius, Justi, Scopoli, Sage, Lehman y otros. También hay que reseñar su preocupación por la nomenclatura científica, inclinándose por adoptar el nequaje mineralógico de Cronstedt, que *en un mot, la Minéralogie, au lie d'un langage vague*.

Por R. O. de 22 de mayo de 1784, se dispone sean enviados al Reino de Nueva Granada dos operarios hábiles en la Mineralogía y en la Metalurgia, para activar la decadente minería argentífera del lugar, así como formar a sus habitantes con las técnicas precisas para que dicho plan se llevara a efecto. Estos son Juan José Elhúyar y su cuñado, médico y ex alumno de Freiberg, Angel Díaz. Todo había sido arreglado con anterioridad por el Conde de Peñafloreda, el cual había organizado una entrevista de Juan José con el Ministro de Indias Gálvez.

El 28 de junio de 1784 se embarcan, con libros y material científico, en el correo Nuestra Señora de la Popa, más conocido como «El Soriano» por su carga habitual de cecina y salazón procedente de dicha provincia. El 18 de septiembre llegan sin novedad a Cartagena de Indias. Solicitando en dicha ciudad la fabricación de los equipos mineralúrgicos necesarios para concentrar las menas a estudiar. El Virrey Antonio Caballero de Góngora ordena que se realicen en la Maestranza de Artillería.

En enero de 1785, ya con los equipos preparados, parten hacia la provincia de Mariquita, por tortuosos itinerarios. Siguen las órdenes del Virrey para que se desplacen a dicho lugar, reconociendo los criaderos y dando órdenes para el beneficio de los mismos, contando con la colaboración de MUTIS Y BOSSIO, J. C. (1732-1808), afincado por aquellas tierras.

Celestino Mutis es un gran botánico (admirado por C. Linneo, a quien enviaría gran cantidad de material científico), Profesor de Física y Matemáticas en la Universidad de Bogotá y autor de numerosos estudios sobre las distintas ramas de las Ciencias Naturales. En 1783 organiza, por encargo del Virrey Caballero, la Expedición Científica Botánica al Reino de Nueva Granada. Poco después, en 1784, le nombran miembro de la Academia de Estocolmo

y del Real Jardín Botánico de Madrid. Al año siguiente, Caballero le pide que ayude y asesore a los recién llegados.

Celestino se desplaza a Honda a dar la bienvenida a Juan José. En febrero de 1785 llegan los expedicionarios a Mariquita, estableciéndose a una jornada de las minas de plata del Real de Santa Ana.

En junio, tras inspeccionar el territorio, Juan José Elhúyar propone la puesta en marcha de las minas del Cristo y de San Juan, en el Real de Laxas, así como las de los Santos y de Santa Ana, en el Real del mismo nombre. Posteriormente, entre diciembre de 1785 y enero de 1786, sugiere la intensificación de las labores en las minas de Honda, así como la reducción de actividad en las de Laxas, antes citadas, por diversos problemas. Desde entonces son sucesivas sus visitas y reconocimiento de las distintas minas del territorio.

Desde la llegada a Mariquita, Juan José, Celestino, Angel Díaz y el Teniente Coronel Domingo Izquierdo, inician los ensayos para la obtención del metal de plata. En febrero Juan José se decanta por el recién creado método de los toneles de amalgamación, de su conocido I. von Born, del cual había recibido cumplida información a través de las cartas de su hermano Fausto.

Poco antes, en marzo de 1785, Born había realizado una demostración de su método, en la Casa de la Moneda de Viena, en presencia del Emperador. Este procedimiento metalúrgico había sido preparado y ensayado con anterioridad en Freiberg. En 1786 se publican dichos trabajos en la obra *Anquicken der gold und silberhältigen Erze, Roshteine, Swarzkupfer und Hüttenspeise*.

El 18 de julio de 1786, Fausto es nombrado Director General de la Minería de Nueva España y enviado a Centroeuropa para que se instruya en las nuevas técnicas de amalgamación. Con motivo de este viaje acude de nuevo a ver a Born en su taller de Glashütte, cerca de Schmnitz, donde se da cuenta de la necesidad de mejorar el método alemán mediante la adición de sal común y sosa. Fausto ya conocía este procedimiento de los toneles de amalgamación; recordemos la carta enviada a Juan José el 18 de abril de 1775: *El nuevo método de Born, en cuanto al fondo, es el que Alvaro Alonso Barba descubrió en 1609 y describe en su libro tercero, pero bien podrás imaginarte cuánto más perfecto será con la aplicación de los conocimientos actuales*. Al interesarse Juan José por el tema, va recibiendo nuevas cartas de Fausto, en 1786 y 1787, el cual acaba incluso enviándole un ejemplar del libro de Born.

Juan José se decide por instalar este método en la mina de Manta, descubierta en la misma veta que la de los Santos, en el Real de Santa Ana. Los problemas se multiplican, por ejemplo: no hay forma de conseguir calderas de cobre, debiendo construirse de madera. Por fin, se inician los ensayos en junio de 1788. Esta tal vez sea la

primera aplicación de los toneles de amalgamación de Born en América.

Posteriormente se decide la construcción de unos hornos de fundición. Tras vencer una serie de dificultades, en la molienda del mineral, el 30 de noviembre de 1791 se produce la primera plata fina procedente de estas minas.

La presencia de piritas en la mineralización, convirtiéndose en ácido sulfúrico durante el tratamiento posterior, generaron problemas en cuanto al rendimiento de la explotación. Juan José es denunciado por este hecho, en 1794, debiendo Mutis realizar un informe en su defensa. Según LOPEZ DE AZCONA (1983), *El Virrey Ezpeleta no estaba conforme con la explotación estatal de las Reales Minas, por parecer ruinosa para el erario*, comunicándole al Ministro de Indias la necesidad de su privatización.

En septiembre de 1796 muere Juan José, debido a un derrame cerebral. Poco después trataron de paralizar las labores de Santa Ana. De ella dijo Mutis: *La primera casa de amalgamación de Santa Ana prueba lo que un hombre de ingenio y dedicado al servicio del Gobierno es capaz de hacer, en medio de grandes obstáculos presentes en América*.

La labor de Juan José no se restringe sólo a la minería de la plata, al servicio del Estado. A continuación describiremos someramente alguna de estas actividades.

En 1774, FRANCISCO BENITO, de la Casa de la Moneda de la Ciudad de Santa Fe, mezcla platino y cobre elaborando una medalla real, según recogemos de los papeles de Mutis. Poco después, GUYTON DE MORVEAU, L. B. (1737-1816), y CHABANEAU, P. F., obtienen lingotes de platino. Este último envía lingotes al orfebre parisino E. Jeanety para que hiciese joyas a partir del nuevo metal. En 1785, el Gobierno estaba preocupado por el contrabando de oro aleado con platino, por ello se encomienda a Juan José la separación de ambos metales. Por este motivo, redacta unas normas de análisis, considerando tres casos: monedas, oro en polvo y lingotes. Al año siguiente le vemos como Director de las minas de platino de Ataniquitas, con el encargo de obtener metal puro y maleable.

Ese mismo año visita las minas de esmeraldas de Muzo, describiendo la geología del criadero y proponiendo mejoras para su laboreo.

Al año siguiente redacta, junto con Celestino Mutis, el *Plan razonado del establecimiento de un Cuerpo Militar de Ingenieros Mineralógicos en el Nuevo Reino de Granada*, similar al creado en México, pero que nunca llegaría a funcionar.

En 1789, muestra interés por la mina de Nuestra Señora del Rosario, de Sapo, en la jurisdicción de Ibagué, ensayando varias muestras aportadas por Mutis. Años después, en 1793, le vemos constituyendo una empresa, «Ugartes y D'Elhúyar», para la explotación de este yacimiento. En

esta industria tuvo numerosos problemas, siendo herido, con arma blanca, por el encargado de las labores de investigación que pretendía registrar la mina a su nombre. Asimismo falsas denuncias, causadas por esta actividad, hicieron que fuera confinado entre julio y noviembre de 1795.

En 1790, estudia muestras salinas de las minas de Zipaquira, beneficiadas por la Real Hacienda.

Asimismo, organiza con frecuencia expediciones geognósticas, como la realizada al Páramo de Ruiz en 1792.

Aparte de esta somera relación de actividades habría que considerar muchas otras de menor envergadura, que no recogemos por ser extensa su relación. En el relativamente corto periodo de tiempo que a Juan José le toca vivir en Sudamérica se aprecia un trabajo intenso. Así lo señala LOPEZ AZCONA, J. M. (1983): *Como Profesor de Mineralogía, lució Juan José sus brillantes dotes en Nueva Granada, logró elevados cargos administrativos y técnicos actuando profesionalmente en explotaciones mineras, alcanzando gran reputación y consideración*.

3.2. LA PRIMERA ORITOGNOSIA ESPAÑOLA

El primer tratado de Mineralogía escrito en España es el *Curso de Mineralogía y Geometría Subterránea*, compuesto en alemán por E. C. STORR (-1802) para el desarrollo de su labor docente en la recién creada Academia de Minas de Almadén. Según documentos del Fondo Histórico de Almadén (leg. 60), en 1779 se enviaron cuatro juegos de diccionarios, desde Madrid, para que J. E. Graef tradujese dicha obra al castellano. Parece ser que nunca se concluyó esta labor, por fallecimiento de Graef, y que incluso se extravió el texto manuscrito original.

El libro anterior, pese a haber sido confeccionado en España, no fue escrito por un autor nacional, ni estaba redactado en la lengua de Cervantes. La primera obra de Oritognosia elaborada en versión original en español es, sin duda, *Orythología*, aparecida entre los papeles del botánico gaditano MUTIS, C. (1732-1808) depositados en el Archivo del Real Jardín Botánico de Madrid (ver Div. III.6.1.22 y 23).

Esta obra consta de un documento completo, puesto en limpio, y de la última parte de una copia. La simple observación de sus caligrafías nos lleva a pensar que las partes denominadas arbitrariamente original y copia han sido confeccionadas por autores distintos. Según LOPEZ DE AZCONA, J. M. (1983), refiriéndose a J. J. Elhúyar, al que supone la paternidad de esta obra, señala: *No es extraña la permanencia inédita de sus trabajos, aunque con múltiples copias por escribientes, dado que la imprenta no se introdujo en Santa Fe hasta 1739 y durante las primeras décadas fue reducida su actividad*.

El autor, en una presentación, de 14 páginas, define la

Orythología o vulgarmente Mineralogía como la Historia Natural de las sustancias inorgánicas del Globo. Esto es, conocimiento de sus propiedades tanto externas como internas, su origen, lugares en que se hallan y alteraciones que padecen. Esta materia se divide en tres partes diferenciadas: Orythognosia, Física Subterránea y Orythografía (Div. III.6.1.22). Nosotros nos centraremos en el estudio de la primera parte (Div. III.6.1.23).

El extenso volumen de la Orythognosia, consta de 190 páginas y se inicia con la definición de esta ciencia, como *aquella parte de la Historia Natural de los fósiles que nos los hace conocer con denominaciones adecuadas y determinadas por caracteres propios, distribuyéndolos por un ordenamiento natural*.

Es curioso comprobar cómo del análisis detallado de esta definición se pueden extraer datos relativos al contexto general de la obra.

Vemos cómo los minerales aparecen bajo la denominación de fósiles. Se emplea esta palabra en su sentido aristotélico. Estos serían los cuerpos producidos en el interior de la tierra susceptibles de ser explotados o extraídos en canteras. No nos extraña, por ejemplo, que Fr. José de Torrubia en su obra, al igual que hacen otros autores de la época, describa como fósiles tanto a los restos paleontológicos como a los distintos minerales.

En esta definición también se expresa la constante preocupación de los mineralogistas de la escuela werneriana por la búsqueda de una terminología concisa. En aquella época los distintos autores acudían a los nombres locales de cada especie, lo que requería que en los sucesivos tratados apareciesen las múltiples denominaciones dadas a los minerales, por el resto de los científicos. En esta obra, por ejemplo, se indica: *El Sr. Werner dice que el Verde de Cobre es la Ordalische Malachite de C. Cronsdet. HERRGEN (1760-1816) recoge este sentir en la nota introductoria a la traducción de la Oritognosia de Wideman, donde plasma la necesidad de comunicar las observaciones y descubrimientos de esta ciencia: por medio de un idioma científico fijo, uniforme y análogo al que los sabios extranjeros han establecido, desde que se intruxo en las escuelas de Hungría y Alemania*. ELHUYAR, J. J., ya había manifestado la necesidad del empleo de una correcta nomenclatura, tal y como se apreciaba en la memoria que escribió con Fausto sobre el descubrimiento del wolframio.

Considera como caracteres propios: los que se observan sin emplear instrumentos que alteren su naturaleza, llamados exteriores o físicos, y los que sólo se descubren exponiéndolos a la acción de otros cuerpos que muda su estado natural, son los denominados internos o químicos. Aunque considera que éstos son más constantes que los primeros y por tanto dan mayor seguridad en un ordenamiento metódico, también es consciente que son más difíciles e incómodos de descubrir. Por todo ello opta por una clasificación físico-morfológica y no una clasificación con base química. En cada especie mineral se enumeran

de forma ordenada datos relativos a color, morfología, brillo, fractura, opacidad y otras propiedades tales como dureza, sabor, tacto, densidad, etc. Finaliza la descripción de cada variedad con otros datos de carácter complementario: variedades existentes, citas sobre yacimientos, aplicaciones e incluso enumeración de publicaciones específicas (por ejemplo: el *Tratado de los topacios de Schuekenstein*, del BARON DE BORN, el tratado sobre la piedra fusil, *Beschreibung von Stavensklint*, de ABILGHHORT, S., o la *Memoria sobre la leche de montaña* de SCHEFFERS).

Tras la definición de Orytognosia se establece una ordenación del reino mineral según cuatro clases, de acuerdo a los criterios tradicionales: Tierras y piedras, sustancias salinas, cuerpos metálicos y sustancias combustibles. Las clases se dividen en géneros y éstos se subdividen en familias y especies. Todas estas divisiones siguen las pautas wernerianas, según se va explicando sucesivamente a lo largo del manuscrito. Las referencias a Werner superan el centenar y no sólo se refieren a la estructura de la obra, sino también a aclaraciones sobre temas específicos, por ejemplo: *El Sr. Werner piensa que la mobilidad de Sajonia y la de Inglaterra no son de la misma naturaleza, pero careciendo de pruebas bien ciertas por ahora las coloca en la misma familia*. En total se definen alrededor de doscientas especies minerales.

En algunos casos se aportan datos relativos a la composición de ciertas sustancias, así, por ejemplo, el autor indica: *El cinabrio es una combinación del mercurio con el azufre*. Se sigue el criterio werneriano de considerar importantes los análisis cualitativos para identificar a las especies, pero no para clasificarlas. La ausencia de análisis cuantitativos y estudios petrográficos imposibilitarían la separación entre minerales y rocas, siendo asimismo muy difícil diferenciar especies de aspecto y propiedades similares.

De acuerdo con las carencias expuestas, el autor considera a trapps y basaltos incluidos dentro del género de tierras y piedras talcosas. En un apéndice a continuación indica que los productos volcánicos son una sustancia cuya naturaleza es poco o nada conocida, es muy difícil determinar el lugar propio que deben ellos ocupar en un ordenamiento metódico de los fósiles. En definitiva, se aprecia a lo largo de la obra el poco desarrollo de la ciencia, señalado con humildad por un escritor de gran formación.

Llama también la atención el escaso peso específico dado a la Cristalografía y la nomenclatura empleada en la descripción de los cristales. Así, cuando se describen los granatoedros se indica: *Todos los lienzos son en número de doce, son por lo común rombos iguales*. En la obra se señala el conocimiento de la versión alemana de la Cristalografía de ROME DE L'ISLE, sobre todo en la descripción cristalográfica del espato calizo, a la que dedica gran extensión. Para este fósil señala tres posibles hábitos cristalinos: *que son la pirámide hexaedra, el prisma hexaedro y la pirámide triedra*. En definitiva se describen formas geométricas pero no se habla de sistemas crista-

lográficos, ya que aún no se conocían las simetrías cristalinas.

Al carecer la obra de firma y fecha, lo primero que cabría pensar es atribuirle la paternidad de la misma a MUTIS, pero la mayor parte de los datos nos llevan a pensar que estamos ante un trabajo de J. J. DE ELHUYAR, además de la comparación de caligrafías con escritos originales de MUTIS y ELHUYAR.

En el Reino de Nueva Granada, ambos trabajaron codo a codo, estableciéndose entre ellos una gran amistad, por lo que algunos escritos de Elhúyar pudieron pasar a manos de Mutis, tal y como se comprueba en los papeles de este último, depositados en el Real Jardín Botánico.

La formación de Mutis, procedente de sus estudios en Madrid con Virgili, es eminentemente médica y botánica (como soporte a la Medicina), pese a sus inquietudes mineralógico-mineras le surgen, como empresario del ramo, le llevaron, según señala PELAYO (1992), a la lectura de algunas obras en estos temas: *A lo largo de cuatro años se documentó, según comentó el mismo, en disciplinas como la docimasia, la mineralogía y la metalurgia, estudiándolas en obras europeas que se habían llevado a Nueva Granada*. Pese a todo, pensamos que esta labor autodidacta no le pudo proporcionar una cultura profunda en este campo. La formación mineralógica de JUAN JOSE es mucho más relevante, ya que estudia con los grandes maestros de esta materia, siendo más probable que fuese el autor de la Orighología, ya que concuerda más con sus aficiones y porque estamos ante una obra muy elaborada. También parece lógico que MUTIS no se pusiese a escribir en un tema en el que no era experto, a la par que se codeaba a diario con ELHUYAR, que sí lo era. Recogemos un párrafo de una carta de Mutis a Elhúyar, conservada en el Real Jardín Botánico, que pensamos puede ser significativa al respecto: *Pasados los instantes que es necesario dar a los papeles, se enfriará vuestra merced para seguir en sus delicias mineralógicas, como yo lo hago con las de la flora*.

Según LOPEZ DE AZCONA, J. M. (1983): *Varias veces manifestó Juan José su idea de escribir una Oritognosia y se da la circunstancia de conservarse entre los papeles de Mutis un tratado de Orygthología que por la profundidad con que está escrito, las referencias a Werner y las continuas citas alemanas podría atribuirsele*.

En la obra se aprecia que el autor posee una sólida formación y amplios conocimientos del alemán, al darse numerosas citas de autores y obras escritas en esta lengua (SCOPOLI, BORN, HENKEL, etc.), así como por la persistencia de voces técnicas en este idioma. Asimismo emplea numerosas palabras francesas, sobre todo cuando quiere reforzar una cita, por ejemplo al manifestar que el cuarzo prasio posee color puerro bajo y luego entre paréntesis

añade «foncée». Otras veces le resulta más fácil acudir a la terminología francesa, así cuando describe las fosilizaciones de pescado en la piedra de cal, señala la presencia de «arrets». Etc.

También hemos comparado la escritura del supuesto original con las anotaciones del curso impartido por BERGMAN, así como con dos documentos firmados por D'Elhúyar, tomados de los papeles de MUTIS del Real Jardín Botánico: *Instrucción para el descubrimiento de las vetas de azogue* (Div. III.6.1.11) y *Ensayo de las diversas especies de mineral de la mina de Cupilicuacita* (Div. III.6.1.14), siendo muy posible que exista coincidencia grafológica. Posteriormente hemos observado la morfología de la escritura de MUTIS en un estudio *Sobre el total abandono de los conocimientos de las ciencias útiles en este Nuevo Mundo* (Div. III.6.1.4.) comprobando diferencias entre las letras d y g, así como una notable coincidencia en la rara caligrafía de la letra P. De todas formas la comparación entre escrituras, por persona no experta en el tema, no nos confirma datos en ningún sentido, pero tampoco se opone a nada de lo expresado con anterioridad.

Por otro lado, gracias a las distintas citas bibliográficas y a una particular referencia en el texto, que citamos a continuación, podemos determinar de forma aproximada la fecha de escritura de la obra: *El Sr. Werner coloca este fósil (Mina de oro especular) entre las minas de oro, porque él contiene por quintal, según los ensayos de Scopoli, diez marcos de una aleación de oro y plata, cuyos dos tercios son de oro y un cuarto de plata*.

El contiene, además de eso, antimonio, hierro, plomo y azufre. Se debe su conocimiento a Scopoli, que fue el primero que lo publicó hará unos veinte años.

G. A. SCOPOLI es un naturalista que estudia, a mediados del siglo XVII, los minerales mercuriales de Idria, los de oro de Transilvania, etc. Publica varias obras, destacando *Enleitung zur kenntniss und Gebrauch der fossilien*. Este libro es citado en el único documento impreso que nos deja Juan José, y que fue escrito en colaboración con su hermano Fausto. En la Cátedra de Mineralogía de la Escuela de Minas de Madrid se dispone de la versión francesa de esta obra, se trata de la *Mémoire sur la nature du Volfram, a celle d'une nouveau métal qui entre dans sa composition*, remitido a la Real Academia de Toulouse en 1784 y publicado al año siguiente.

Todos los datos apuntan hacia J. J. Elhúyar como autor de esta obra, por su profunda formación en la escuela mineralógica alemana y por sus conocimientos lingüísticos. Las fechas comprobadas de algunas de las obras citadas no están en contra de esta hipótesis. Pensamos que este incunable tiene grandes posibilidades de haberse confeccionado en los primeros años de la década de los noventa.

4. LA ORITOGNOSIA DE ANDRES MANUEL DEL RIO

4.1. ANDRES MANUEL DEL RIO Y FERNANDEZ (1764-1849), INGENIERO DE ALMADEN, FREIBERG Y «SCHMNITZ»

Los principales apuntes biográficos sobre este autor se los debemos a J. M. LOPEZ DE AZCONA, publicados con motivo del bicentenario de su nacimiento. Sin embargo los primeros datos sobre Del Río se recogen en los *Apuntes para una biblioteca española* (1871), de MAFFEI, E., y RUA, R. Asimismo son importantes las reseñas biográficas de los autores mejicanos IZQUIERDO, J. J.; RAMIREZ, S., y ARNAIZ y FREG, A.; PRIETO, C.; BARGALLO, M.; VELAZQUEZ DE LEON, J., y otros. Pocos datos hemos podido añadir a tan importantes estudios, procurando centrar los análisis en la formación y producción científica de D. Andrés.

Andrés Manuel del Río y Fernández nace en Madrid, el día 11 de septiembre de 1764.

Estudia latín (lengua que aún por aquellas fechas se empleaba en buena parte de las obras científicas) y griego, en el Real Colegio de San Isidro. De allí pasa a cursar el bachillerato en la Universidad de Alcalá de Henares, que en aquella época mostraba gran actividad científica, aprendiendo teología y literatura, así como ciencias. Su maestro D. José Solano le selecciona para la disertación de fin del curso 80/81, centrada en el tema de la Física (parece ser que fue la primera en esta materia). Obtuvo el título a los 16 años, alcanzando el premio de «concursante más aprovechado».

Tratando que prosiguiese los estudios, el profesor Solano realiza gestiones ante el Ministro Diego Gardoqui. Fruto de éstas, se promulga la R. O. de 13 de junio de 1782, dada por Carlos III, por la que se nombra a Del Río alumno cadete de la recién creada Academia de Minas de Almadén, asignándosele un sueldo de 16 reales diarios.

En Almadén inicia el curso 1782/83, aprendiendo Geometría Subterránea y Mineralogía, bajo la tutela del alemán Störr. Es el octavo alumno que se matricula en la Academia y el segundo que sale a complementar sus estudios fuera. Compartiría aulas con Carlos Buxó, Francisco Carlos de la Garza, Pedro Palacios Ximan, Andrés José Rodríguez y Pedro Subiela.

Según MAFFEI, E. (1877): *Parece que Störr enseñaba el levantamiento de planos subterráneos por el método práctico usado en Hannover, empleando la toesa de aquel país, a cuya medida estaban ajustadas unas tablas, en las cuales se calculaba, aproximadamente, la resolución de triángulos. También explicaba rompimientos pero no abarca por completo la Geometría Subterránea. Además enseñaba entibación, excavación e investigación de los criaderos*.

No le toca buena época a Del Río en Almadén, ya que parece ser que Störr tenía bastante desatendida la enseñanza, pero pronto fue destituido. El 17 de septiembre

de 1783, J. M. HOPPENSACK (.....-1815) sería nombrado por el Ministro de Indias José Gálvez Director y Delineador de las Minas, con la condición de enseñar Geometría Subterránea y Minería Práctica. Rápidamente reorganizaría la docencia, imponiendo un rígido horario. Según MAFFEI, E. (1877): *Hoppensack adelantó la enseñanza de la Geometría Subterránea, usando toda clase de medidas y aplicando las tablas de logaritmos para la resolución de los problemas de esta clase.*

En este año, también se envía a Almadén, como visitador de las minas, al joven canario A. DE BETANCOURT Y MOLINA (1758-1824), con el encargo dado por Floridablanca de evaluar el estado de las labores. Con tal fin, al poco tiempo, realiza la *Memoria de las Reales Minas de Almadén*. En 1784 se dispone que pase a París para complementar su formación minera, aunque allí orientaría sus estudios hacia la ingeniería de caminos, matriculándose en la *École de Ponts et Chaussées*.

Por R. O. de 8 de noviembre de 1872 Andrés José Rodríguez abandona Almadén para completar sus conocimientos en Madrid. Año y pico después, Del Río le sigue los pasos, pero su estancia en la capital no dura mucho. La brillantez académica de este alumno hace que el Ministro Gardoqui, por R. O. de 2 de julio de 1784, le remita pensionado a formarse en el extranjero. Se piensa que los estudios a realizar se deben centrar en las ciencias exactas, físicas y naturales, teniendo en cuenta sus aplicaciones prácticas.

Pronto llega a París, donde suponemos coincidiría con Betancourt en alguna ocasión. Recibe lecciones de Química con J. D'ARCET (1725-1801), en el Colegio Real de Francia. Este autor estaba especializado en el comportamiento de los minerales ante el fuego. Con él investiga, entre otros temas, la composición de los materiales de la porcelana, ya que tiene el encargo de instalar una industria de este tipo en la Península. Aquí es donde Del Río recibe las primeras nociones analíticas.

En esta ciudad también se dedica al estudio de la Medicina y de la Historia Natural. Suponemos que en este último caso, la docencia se orientaría de acuerdo con los principios establecidos por el Conde de BUFFON (1707-1778), los cuales tuvieron gran impacto en la sociedad científica francesa. No se sabe la fecha con exactitud, pero entre 1785 y 1805 CLAVIJO FAJARDO, J. (1726-1806) tradujo la obra de BUFFON al castellano.

Asimismo es probable que Del Río llegara a conocer el recién publicado *Essai de Cristallographie* de J. B. ROME DE L'ISLE (1736-1790) y que tuviera la oportunidad de tener entre sus manos el goniómetro creado en 1780 por el discípulo del anterior A. CARANGEOT (1742-1806). Con este instrumento siempre le vemos en la mayor parte de sus retratos. Según AMOROS, J. L. (1964), años después, en 1795, ya ejerciendo su labor profesional, encarga a Francia uno de estos instrumentos y *todavía en 1805 no había*

conseguido un modelo europeo, resolviendo construirse uno de gran precisión.

En 1788 se traslada a la Escuela de Minas de Freiberg, en Sajonia, quedando inscrito formalmente como alumno del curso 88/89 con el número 333.

Suponemos que en Almadén adquiriría conocimientos de la lengua alemana a través de sus maestros Störr y Hoppensack, lo que le valdría para sus estudios en Freiberg. Allí conocería las obras de Werner, Kern, Foster, Charpentier, Gellerte y otros, ampliando sus conocimientos de Mineralogía, Laboreo y Metalurgia. Tuvo como compañeros a SAUSURE, H. B.; BUCH, L.; DOLOMIEU, D.; VON HUMBOLDT, A., y WEABER, todos los cuales llegaron a ser grandes científicos.

Por aquellas fechas Werner defendía el desarrollo del método inductivo basado en la observación de la Naturaleza en diversos puntos, para luego ordenar los cono-



Figura 15.—La Escuela de Ingeniería de Minas de Almadén, fundada en 1777 por Carlos III.

de 1783, J. M. HOPPENSACK (.....-1815) sería nombrado por el Ministro de Indias José Gálvez Director y Delineador de las Minas, con la condición de enseñar Geometría Subterránea y Minería Práctica. Rápidamente reorganizaría la docencia, imponiendo un rígido horario. Según MAFFEI, E. (1877): *Hoppensack adelantó la enseñanza de la Geometría Subterránea, usando toda clase de medidas y aplicando las tablas de logaritmos para la resolución de los problemas de esta clase.*

En este año, también se envía a Almadén, como visitador de las minas, al joven canario A. DE BETANCOURT Y MOLINA (1758-1824), con el encargo dado por Floridablanca de evaluar el estado de las labores. Con tal fin, al poco tiempo, realiza la *Memoria de las Reales Minas de Almadén*. En 1784 se dispone que pase a París para complementar su formación minera, aunque allí orientaría sus estudios hacia la ingeniería de caminos, matriculándose en la *École de Ponts et Chaussées*.

Por R. O. de 8 de noviembre de 1872 Andrés José Rodríguez abandona Almadén para completar sus conocimientos en Madrid. Año y pico después, Del Río le sigue los pasos, pero su estancia en la capital no dura mucho. La brillantez académica de este alumno hace que el Ministro Gardoqui, por R. O. de 2 de julio de 1784, le remita pensionado a formarse en el extranjero. Se piensa que los estudios a realizar se deben centrar en las ciencias exactas, físicas y naturales, teniendo en cuenta sus aplicaciones prácticas.

Pronto llega a París, donde suponemos coincidiría con Betancourt en alguna ocasión. Recibe lecciones de Química con J. D'ARCET (1725-1801), en el Colegio Real de Francia. Este autor estaba especializado en el comportamiento de los minerales ante el fuego. Con él investiga, entre otros temas, la composición de los materiales de la porcelana, ya que tiene el encargo de instalar una industria de este tipo en la Península. Aquí es donde Del Río recibe las primeras nociones analíticas.

En esta ciudad también se dedica al estudio de la Medicina y de la Historia Natural. Suponemos que en este último caso, la docencia se orientaría de acuerdo con los principios establecidos por el Conde de BUFFON (1707-1778), los cuales tuvieron gran impacto en la sociedad científica francesa. No se sabe la fecha con exactitud, pero entre 1785 y 1805 CLAVIJO FAJARDO, J. (1726-1806) tradujo la obra de BUFFON al castellano.

Asimismo es probable que Del Río llegara a conocer el recién publicado *Essai de Cristallographie* de J. B. ROME DE L'ISLE (1736-1790) y que tuviera la oportunidad de tener entre sus manos el goniómetro creado en 1780 por el discípulo del anterior A. CARANGEOT (1742-1806). Con este instrumento siempre le vemos en la mayor parte de sus retratos. Según AMOROS, J. L. (1964), años después, en 1795, ya ejerciendo su labor profesional, encarga a Francia uno de estos instrumentos y *todavía en 1805 no había*

conseguido un modelo europeo, resolviendo construirse uno de gran precisión.

En 1788 se traslada a la Escuela de Minas de Freiberg, en Sajonia, quedando inscrito formalmente como alumno del curso 88/89 con el número 333.

Suponemos que en Almadén adquiriría conocimientos de la lengua alemana a través de sus maestros Störr y Hoppensack, lo que le valdría para sus estudios en Freiberg. Allí conocería las obras de Werner, Kern, Foster, Charpentier, Gellerte y otros, ampliando sus conocimientos de Mineralogía, Laboreo y Metalurgia. Tuvo como compañeros a SAUSURE, H. B.; BUCH, L.; DOLOMIEU, D.; VON HUMBOLDT, A., y WEABER, todos los cuales llegaron a ser grandes científicos.

Por aquellas fechas Werner defendía el desarrollo del método inductivo basado en la observación de la Naturaleza en diversos puntos, para luego ordenar los cono-



Figura 15.—La Escuela de Ingeniería de Minas de Almadén, fundada en 1777 por Carlos III.

cimientos y de esta forma poder obtener los principios que la gobiernan. En esto se aplicaron los alumnos H. B. DE SAUSSURE (1740-1799), en los Alpes, y D. DE GRATET DE DOLOMIEU (1750-1801), en los Pirineos y en los volcanes de Italia, por lo que según DAÛISSON, J. F. (1802), fueron definidos por su profesor como los primeros geognostas observadores.

El maestro Werner, en su informe sobre las actividades lectivas del curso, destaca como alumno a Del Río, al igual que años antes lo hubiera hecho con los hermanos Elhúyar.

Fausto, que por esas fechas estaba encargado de reorganizar la minería de los virreinos americanos, solicita al Rey la formación metalúrgica, en la Escuela de Minas de Schmnitz (Hungría), de algunos alumnos brillantes, para posteriormente destinarlos al Nuevo Mundo. Conseguido el real permiso, pasan a esta localidad Torres, Recarte y Del Río. Parece ser que al menos este último no se matricula, acudiendo a las clases de oyente.

En Schmnitz estudian Geometría Subterránea con Lempi y conocieron la obra de Delius. Asimismo tomaron lecciones de Química Analítica y Metalurgia con el mineralogista Ruprecht.

En el verano de 1790, el Marqués del Llano, embajador de España en Viena, propondría a A. von Ruprecht, por entonces Director de la Escuela de Schmnitz, que pasase a dirigir las minas y Academia de Almadén, pero parece ser que esto no llegó a cuajar.

A. M. del Río coincide en Schmnitz con el español L. Linder y se vuelve a encontrar con A. Humboldt, con el que acabaría labrando una gran amistad.

Desde Schmnitz retorna a París para asistir a las clases del sabio A.-L. LAVOISIER (1743-1794), en el Laboratorio del Arsenal. A este autor, discípulo de G. F. ROUELLE (1703-1770), y de J. E. GUETARD (1715-1786), se le considera como el padre de la Química moderna, al haber definido a la materia por su capacidad de ser pesada, así como por enunciar la ley de conservación de la masa y de los elementos. Asimismo describe los procesos de oxidación de los metales con el aire, de acuerdo a sus experiencias con el estaño en 1774, y con el mercurio en 1777. También determina la composición del aire, del agua y del gas carbónico. Establece que la combustión no dependía del «flogisto», sino del oxígeno, enfrentándose en ello a químicos de la talla de Priestley, Scheelle y Cavendish. Desde 1768 trabajaba para la Hacienda Pública (Ferme Général du Royaume), lo que junto a su condición de diputado suplente en los Estados Generales le llevaría a que la Convención le condenara a muerte, siendo guillotinado en 1794.

Poco le dura la estancia a Del Río en París, aunque suponemos aprovecharía el tiempo, complementando su formación química, que luego dio tantos frutos. En 1791, debido a las turbulencias revolucionarias presentes, tuvo que huir

a Inglaterra disfrazado de aguador. En este país recorre diversas empresas mineras y metalúrgicas, principalmente en la zona de Cornwall. Dada su preparación se le propone trabajar en estas tierras, a lo que rehúsa.

4.2. EL REAL SEMINARIO DE MINERÍA DE MEXICO

En 1774, J. L. LASSAGA (.....-1786), industrial del ramo de la minería, y J. VELAZQUEZ (1732-1786), Catedrático de la Real y Pontificia Universidad, solicitan que se les permita fundar en México un Seminario o Colegio Metálico. En las Reales Ordenanzas de Minería de 1783 se vuelve a recoger la necesidad de crear dicho Centro. Tres años después fallecen estos eminentes mineros, con pocos días de diferencia, sin ver fructificada su idea.

Antes de su muerte, habían comunicado al Ministro de Indias J. GALVEZ (1729-1786) que se llevase a cabo la propuesta de CAVANILLES Y CENTI, A. J. (1745-1804), en la que se pedía la comisión de los hermanos Elhúyar para la mejora y beneficio de los minerales americanos. Así, por R. O. de 18 de julio de 1786 se designa a Fausto Elhúyar para cubrir el puesto de Director General de Minería de Nueva España, así como de su Tribunal General (en funcionamiento desde el 11 de agosto de 1777) y el de Profesor de Mineralogía, del pensado pero no creado Real Seminario.

Tras cumplir su periplo formativo europeo y organizar la expedición mineralógica sajona, Fausto abandona la Península, rumbo a México, el 15 de junio de 1788, llegando al puerto de Veracruz el 4 de agosto. Antes de partir ya barruntaba la puesta en marcha del Seminario de Minería, el hecho es que propone a un alumno de la primera promoción de Almadén, A. J. RODRIGUEZ (1756-1803), como Profesor de Matemáticas. Esta solicitud es posteriormente renovada desde México, llegando su nombramiento el 5 de marzo de 1790.

En septiembre toma Fausto posesión de su cargo, proponiendo al Real Tribunal de Minería, entre otras medidas, el *Plan del Colegio de Minería*, de fecha 12 de enero de 1789. En este proyecto se detallan los planes de estudio y demás necesidades para la creación de un centro escolar. La carrera mostraba una duración de seis años, cuatro teóricos, con prácticas en los tres últimos meses del tercer y cuarto cursos, y dos prácticos, que se desarrollarían en alguno de los reales establecimientos mineros próximos a la capital. Al final, tras superar las pruebas correspondientes, el Tribunal Superior de la Minería expediría el título. Todos los datos relativos a las asignaturas y demás información de tipo docente se pueden consultar en la obra de IZQUIERDO, J. J. (1953).

El Real Tribunal ya había adquirido, en 1778, un edificio en la calle Guatemala, junto al Hospicio de San Nicolás, por 31.000 pesos, pensando en su uso como Centro docente. En este lugar Fausto manda instalar poco después

unos hornos para ensayos metalúrgicos, ya que creía en un modelo de enseñanza eminentemente práctico y de aplicación.

Los preparativos para organizar el Seminario fueron intensos, existiendo numerosa documentación al respecto. Sin embargo las gestiones transcurrieron con lentitud, debido al esquema político burocrático y a las malas comunicaciones. La docencia se iniciaría, por fin, el 1 de enero de 1792.

Tras el fichaje de A. J. Rodríguez prosiguieron las contrataciones de profesorado, así por R. O. de 19 de diciembre de 1791 se nombra Profesor de Física a F. A. BATALLER (.....1800), el cual impartía su docencia en el Real Colegio de San Isidro de Madrid. De igual forma, en 1792, bajo el influjo de Fausto Elhúyar, se designa a Del Río como Profesor de Química. Según LOPEZ AZCONA, J. M. (1964): *Renuncia Del Río a la Cátedra de Química por considerar que estaba mejor preparado para la de Mineralogía, recayendo la resolución de acuerdo con sus deseos, según le comunica Gardoqui en febrero de 1793. El puesto de Profesor de Química sería para F. CORDON (1792), siendo sustituido posteriormente por el compañero de Del Río en Schminitz LUIS LINDER.*

Los locales adquiridos inicialmente para albergar las aulas y laboratorios del Real Seminario de Minería no cumplían las condiciones necesarias para tal fin. En 1791 hay una propuesta de Fausto para la adquisición de un solar y construcción posterior del edificio académico en la calle de Santa Teresa, esquina a Segunda del Indio Triste. Sin embargo se acabaría eligiendo otro emplazamiento, comprándose por 30.000 pesos un solar en la calle San Andrés. Las obras se iniciaron en 1797, según planos del arquitecto Manuel Tolsá. Dichas labores no finalizarían hasta 1813, aunque el traslado de profesores y alumnos fue algo anterior.

Una vez contratado como Profesor de Mineralogía para el Real Seminario de Minería de México, Del Río inicia el viaje hacia América con su criado el 2 de agosto de 1794, llegando al puerto de Veracruz el 20 de octubre. El 14 de noviembre recoge su instrumental científico, preparado con cuidado durante largo tiempo antes de la partida hacia Nueva España. Poco después, el 18 de diciembre, llega a la capital, aunque no inicia su labor docente hasta abril de 1795.

4.3. LOS ELEMENTOS DE ORITOGNOSIA. LA PENETRACION DE LAS PRIMERAS IDEAS WERNERIANAS EN ESPAÑA

Las primeras ideas wernerianas recogidas por un español parece ser que corresponden a Fausto Elhúyar. En 1786 este autor pasó a Francia, deteniéndose en Dijón, en la casa de L. B. GUYTON DE MORVEAU (1737-1816), con quien le unía una cierta amistad. Comentando la idea que

Werner no tenía intención de publicar una segunda edición de su obra, y ante las indicaciones de Guyton de Morveau para que esto se llevara a cabo necesariamente, Fausto le prometió que le enviaría todo el material manuscrito posible de las lecciones dadas por Werner después de la publicación de su libro, en 1774. Elhúyar estuvo en Centroeuropa, visitando Freiberg en octubre de 1786, y a su vuelta cumpliendo el compromiso adquirido, le remitió unos apuntes manuscritos, los cuales contenían una serie de correcciones y reseñas. Guyton de Morveau reorganizó el material constituyendo la obra *Traité des caractères extérieurs des fossiles*, publicada en Dijón en 1790. Este autor también traduciría del latín al francés la obra de BERGMAN, T. (1778) *Elementos físico-químicos del análisis general de las aguas.*

De igual forma, en base a apuntes manuscritos similares, correspondientes a su estancia en Freiberg, Juan José Elhúyar pudo escribir, a principios de los años noventa, la *Orythología*, comentada con anterioridad.

Asimismo, Andrés Manuel del Río, antes de partir hacia América, es requerido por FOUCROY, M. A. T. (1755-1809), para colaborar en el *Diario de los nuevos descubrimientos de todas las ciencias físicas, que tienen relación con las diferentes partes del arte de curar*. En 1793 aparece en el tercer tomo de esta obra un artículo bajo el título *De la importancia de las señales exteriores para conocer los fósiles*, donde se recogen los conocimientos relativos a este tema recopilados por el autor durante su estancia en Freiberg.

Posteriormente, en México, durante febrero de 1795, Fausto Elhúyar redacta un informe sobre la importancia de las teorías wernerianas, señalando la conveniencia que Del Río se dedicase a la traducción alemán-castellano de la obra de Werner. Como consecuencia de ello, Del Río, disponiendo de una gran información, fruto de sus amplios estudios, decide confeccionar unos completos apuntes para el desarrollo de sus funciones docentes. De esta forma escribiría *Elementos de Oritognosia o del conocimiento de los fósiles, dispuestos según los principios de A. G. Werner para el uso del Real Seminario de Minería de México* (1795). Los primeros ejemplares salieron a la venta en enero de 1796. Recordemos que Humboldt dijo de esta obra que era la mejor publicación mineralógica de la literatura española. Asimismo Guyton de Morveau señaló que era *la mineralogía más notable de su tiempo en todas las lenguas.*

Empieza el texto situando el estado de los conocimientos mineralógicos, con la polémica abierta entre los defensores del sistema químico (Henckel, Pott, Justi, Cronstedt y Bergman) y los del sistema característico (Linneo, Cartheuser, Gehler y Walch). Según Del Río, para clasificar los fósiles era preciso recurrir a los principios químicos, mientras que para conocer los que ya estaban clasificados bastaban sus caracteres exteriores. Como diría WIDEN-

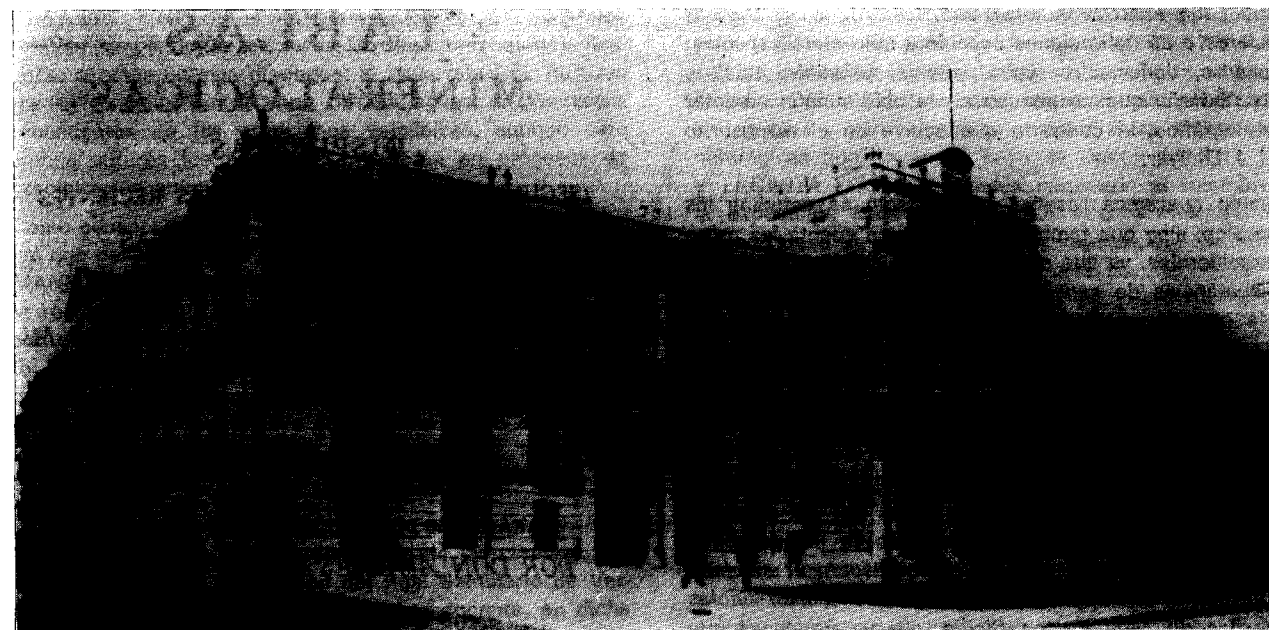


Figura 16.—El Real Seminario de Minería de México, la más antigua Escuela de Ingeniería existente de América, fundada por el ingeniero de minas español Fausto Elhúyar en 1789, iniciándose la docencia en 1792.

MANN (1797): *La química debe mirarse como el supremo tribunal, autorizado para revisar nuestras clasificaciones.*

De todas formas, pese a los avances de la Química, había un criterio para mantener las clasificaciones basadas en los caracteres exteriores, ya que los defensores de éstas consideraban que para comunicar el conocimiento de un nuevo fósil bastaba con dar su composición, pero esto no servía para describirlo, para eso hacían falta datos relativos a su hábito y propiedades observables.

En esta obra se sigue una clasificación de los minerales según clases, familias, géneros, especies y variedades, añadiendo a veces secciones entre las familias y los géneros. Las clases consideradas son cuatro, según el esquema clásico de tierras, sales, sustancias combustibles y metales.

Esta clasificación, que hasta no hacía mucho se basaba en los caracteres externos, empezó a considerarse como de base química. Así tenemos que las distintas clases se definen de la forma siguiente: Las tierras serían sustancias que no muestran afinidad por el oxígeno (o arxicayo, como le llamaba Del Río siguiendo la terminología de Juan de Arejula). Las sales serían los compuestos de una sustancia simple oxigenada (arxicayada) con una base simple. Las sustancias combustibles serían las que tienen más o menos facilidad de quemarse, combinándose con el oxígeno, y sin mostrar aspecto metálico. Y por último, los metales se caracterizarían por su afinidad con el oxígeno,

así como por su aspecto metálico. Los géneros y especies se organizarían en función de la calidad y cantidad de sus partes constitutivas.

Según Del Río, no hay otro criterio de clasificación posible, ya que las sistemáticas basadas en los caracteres exteriores han traído consigo que se juntasen muchos fósiles que eran esencialmente distintos, a la par que se separaban algunos del mismo género porque mostraban apariencias dispares.

La diferencia de la *Oritognosia* de DEL RIO respecto de las obras de WERNER y de J. J. ELHUYAR es que esquematiza el conjunto de propiedades observables en cuadros de fácil lectura, así como añade una lista ordenada del léxico científico usado en las tables. A continuación pasa a describir las especies de acuerdo con las propiedades antes expuestas: color, disposición de sus partículas, aspecto, untuosidad, temple, pesadez, olor y sabor. También enuncia la etimología de los fósiles, mostrando una cierta preocupación por las denominaciones empleadas, las cuales deberían ser *conformes al genio de la lengua.*

Llama la atención el poco desarrollo cristalográfico de la obra. Se emplea un concepto de *figura* (contorno de los fósiles) que supera al de cristal, y en el que se engloban los términos actuales de cristalización, hábito y fósil. Precisamente a los fósiles (en lenguaje de hoy en día) les llama *figuras extrañas* y no serían otra cosa que individuos o restos de los mismos, del reino animal o vegetal, con-



Figura 16.—El Real Seminario de Minería de México, la más antigua Escuela de Ingeniería existente de América, fundada por el ingeniero de minas español Fausto Elhúyar en 1789, iniciándose la docencia en 1792.

MANN (1797): *La química debe mirarse como el supremo tribunal, autorizado para revisar nuestras clasificaciones.*

De todas formas, pese a los avances de la Química, había un criterio para mantener las clasificaciones basadas en los caracteres exteriores, ya que los defensores de éstas consideraban que para comunicar el conocimiento de un nuevo fósil bastaba con dar su composición, pero esto no servía para describirlo, para eso hacían falta datos relativos a su hábito y propiedades observables.

En esta obra se sigue una clasificación de los minerales según clases, familias, géneros, especies y variedades, añadiendo a veces secciones entre las familias y los géneros. Las clases consideradas son cuatro, según el esquema clásico de tierras, sales, sustancias combustibles y metales.

Esta clasificación, que hasta no hacía mucho se basaba en los caracteres externos, empezó a considerarse como de base química. Así tenemos que las distintas clases se definen de la forma siguiente: Las tierras serían sustancias que no muestran afinidad por el oxígeno (o arxicayo, como le llamaba Del Río siguiendo la terminología de Juan de Arejula). Las sales serían los compuestos de una sustancia simple oxigenada (arxicayada) con una base simple. Las sustancias combustibles serían las que tienen más o menos facilidad de quemarse, combinándose con el oxígeno, y sin mostrar aspecto metálico. Y por último, los metales se caracterizarían por su afinidad con el oxígeno,

así como por su aspecto metálico. Los géneros y especies se organizarían en función de la calidad y cantidad de sus partes constitutivas.

Según Del Río, no hay otro criterio de clasificación posible, ya que las sistemáticas basadas en los caracteres exteriores han traído consigo que se juntasen muchos fósiles que eran esencialmente distintos, a la par que se separaban algunos del mismo género porque mostraban apariencias dispares.

La diferencia de la *Oritognosia* de DEL RIO respecto de las obras de WERNER y de J. J. ELHUYAR es que esquematiza el conjunto de propiedades observables en cuadros de fácil lectura, así como añade una lista ordenada del léxico científico usado en las tables. A continuación pasa a describir las especies de acuerdo con las propiedades antes expuestas: color, disposición de sus partículas, aspecto, untuosidad, temple, pesadez, olor y sabor. También enuncia la etimología de los fósiles, mostrando una cierta preocupación por las denominaciones empleadas, las cuales deberían ser *conformes al genio de la lengua*.

Llama la atención el poco desarrollo cristalográfico de la obra. Se emplea un concepto de *figura* (contorno de los fósiles) que supera al de cristal, y en el que se engloban los términos actuales de cristalización, hábito y fósil. Precisamente a los fósiles (en lenguaje de hoy en día) les llama *figuras extrañas* y no serían otra cosa que individuos o restos de los mismos, del reino animal o vegetal, con-

vertidos en sustancias minerales. Dentro de las *figuras regulares* o cristalizaciones considera sólo siete especies: icosaedro, dodecaedro, cubo, prisma, pirámide, tabla y lente. Extraña que no se use en la obra ningún carácter cristalográfico, al contrario que ocurre en el manuscrito de J. J. Elhúyar.

También queremos reseñar que no sólo se estudian los minerales, sino que también se tienen en cuenta las rocas monominerales, ya que en este tratado sólo se consideran las sustancias de *sencillez mecánica*, dejando las partes de la corteza resultantes de mezclas de fósiles para la Geognosia. Pese a ello incluye al basalto, las lavas y la piedra pómez en la clase de las tierras y las piedras, familia de la alúmina.

Respecto al origen del basalto, considera una génesis neptunista. J. L. GIRAUD SOULAVIE (1725-1813) había encontrado agua en el interior de estas rocas (tal vez generada por la descomposición de las zeolitas), por lo que según DEL RIO: *En vista de esto ya nadie disputa si se debe su formación al fuego o al agua, y más cuando en las montañas de Neptuno, en Sicilia, alterna en capas con caliza compacta.*

Por otro lado, da por supuesto que las lavas y la piedra pómez tienen un origen volcánico. Pero DEL RIO cambia posteriormente de criterio, ya que en *Descripción de una piedra perlada*, artículo publicado en el tomo VI, núm. 18, de los *Anales de Ciencias Naturales* (1803), tras aportar diversos argumentos sobre el origen sedimentario de las piedras perladas y espumosas, indica: *Si a pesar de lo dicho, los que tienen ocasión de examinar volcanes, me convencieron de que la pómez es volcánica, cederé con gusto, pues lo que me interesa es la verdad.*

Asimismo mantiene la idea werneriana del origen por precipitación de las sustancias útiles, indicando que las rocas volcánicas *no interesan al minero, sino todas las demás que deben su origen al agua.*

A finales del XVIII, en 1778, otro discípulo de Werner, llamado CHRISTIAN HERRGEN (1760-1816), viene a la Península contratado como profesor del Real Seminario de Vergara. El 15 de octubre de 1796 pasa al Gabinete de Historia Natural como recolector de minerales, a propuesta de su Director José Clavijo Fajardo, sustituyendo a Juan de Palafox Rovira. Estando en este destino, en 1797, traduce del inglés la *Oritognosia* de WIDENMANN, J. F. G., obra basada en las teorías de su maestro.

Según pone de manifiesto en el aviso del traductor, DEL RIO se le adelantaría en la publicación de la primera *Oritognosia* editada en castellano: *Mi traducción estaba ya adelantada cuando supe que D. Andrés del Río que había estudiado la Mineralogía bajo la dirección de Werner en Freiberg... había conocido como yo, que en este país faltaba un cuerpo sistemático de doctrina para servir de base a la enseñanza de esta ciencia. El primer tomo*

TABLAS MINERALOGICAS DISPUESTAS

SEGUN LOS DESCUBRIMIENTOS MAS RECIENTES
É ILUSTRADAS CON NOTAS
POR D. L. G. KARSTEN

Consejero de Minas del Rey de Prusia, Profesor de Mineralogía, e Inspector del Real Gabinete, Socio y Correspondiente de muchas Academias.

TERCERA EDICION ALEMANA DE 1800

TRADUCIDA AL CASTELLANO

PARA EL USO DEL REAL SEMINARIO DE MINERÍA

POR DON ANDRES MANUEL DEL RIO.



CON SUPERIOR PERMISO.

Impresas en México: por Don Mariann Joseph de Zúñiga y Ontiveros, calle del Espíritu Santo Año de 1804.

Figura 17.—Tablas mineralógicas de Karsten, traducidas por DEL RIO.

que publicó a este fin pocos años ha, en América, me hizo ver que animados ambos de un mismo celo, seguimos los mismos principios mineralógicos

Esta obra se parece a la DEL RIO en la organización por tablas, escaso desarrollo de la cristalografía (hay una lámina donde se representan las, para el autor, ocho distintas formas cristalinas, bajo la denominación de *figuras primitivas*) y por la división de los fósiles en cuatro clases. Se diferencia en el poco interés que le produce la Química, ya que *la mayor parte de los fósiles no se han examinado todavía con exactitud; y aún a la análisis química más rigurosa se ha ocultado todavía una u otra de las partes constitutivas.* Para este profesor, al igual que pensaba Werner, un sistema mineralógico basado sólo en la química o en los caracteres exteriores quedaría bastante descabado. DEL RIO, sin embargo, se deja llevar algo más por el sistema químico, sin menospreciar las clasificaciones basadas en los caracteres exteriores.

Este autor mete en el mismo paquete a los minerales (fósiles simples) y a las rocas (fósiles compuestos). Respecto a estas últimas distingue, al igual que DEL RIO, las rocas formadas en el seno de las aguas de las rocas procedentes de las erupciones volcánicas, aunque para ambos autores los basaltos se generan en procesos de precipitación química.

Como consecuencia de las actividades de HERRGEN, entre las que pensamos está la traducción de la obra de WIDENMANN, se le nombra Profesor de Mineralogía, en 1789, en la recién creada Escuela de Mineralogía de Indias (junto con el Laboratorio Químico Metalúrgico). Ya en este puesto, traduciría las *Memorias sobre los progresos y utilidad del estudio mineralógico* (1797) del barón SCHÜTZ (publicadas en 1801) y el *Ensayo del sistema nuevo de Mineralogía* (1800), de BRUNNER, J. (publicado en 1804). Asimismo son frecuentes sus artículos en los *Anales de Ciencias Naturales* (1799-1804).

En esta época hay un gran desarrollo de las ciencias, iniciando a partir de la creación del Real Seminario de Vergara, en 1773. Para desarrollar la labor docente, en dicha Institución, se contrataría a PROUST, L. (1755-1826), como profesor de Química, y a CHABANEAU, F. (1754-1852), como profesor de Física. Este último vino a España en junio de 1777. Poco después, en 1790, se nombra Director de la Escuela de Mineralogía de Indias al sacerdote DONATO GARCIA FERNANDEZ y se contrata como profesor de la misma a CHABANEAU. Dicho autor edita ese mismo año los *Elementos de Ciencias Naturales*, obra de la que sólo se llegaría a publicar un tomo. En ella se habla de los caracteres atribuibles al principio térreo y de las sustancias que aparecen mezcladas o combinadas con las tierras. Seguidamente se pasa a describir los fósiles, los cuales se dividen en dos clases: combustibles e incombustibles. Termina el tomo con otras ideas cosmogónicas y de elementos de Física.

4.4. LADOR DOCENTE, INVESTIGADORA Y TECNICA DE ANDRES MANUEL DEL RIO, EL DESCUBRIDOR DEL WOLFRAMIO

La labor docente de ANDRES MANUEL DEL RIO, era de tres horas semanales, quedando el resto del tiempo para preparar las colecciones, organizar el laboratorio, desarrollar la investigación, confeccionar sus publicaciones e incluso actuar de cara a la industria privada en diversos temas de ingeniería.

Según indica LOPEZ DE AZCONA, J. M. (1964), cuando DEL RIO llega al Real Seminario de la Minería de México *le agrada ver los hornos semiindustriales y las instalaciones metalúrgicas en sus patios, pero al penetrar en las aulas se encuentra con una carencia casi absoluta de material de laboratorio, instalado en una destaralada cochera, y buenas muestras de minerales, principalmente argentíferas y plumbíferas.*

Poco a poco el Centro se fue dotando de equipamientos y los gabinetes se poblaron de muestras. En 1790 Fausto solicita una colección de minerales a España, la cual nunca llegaría. DEL RIO tiene que empezar sus prácticas de Oritognosia y para ello debe recurrir a las muestras mineralógicas que un amigo suyo, el Doctor MARTIN SESE Y LACASTA (1751-1808), había comprado al miembro de la expedición Mineralogista FEDERICO SONNESCHMIDT. Cuando Sesé se plantea volver a España, Del Río solicita al Seminario la compra de la colección por 500 pesos. Este autor considera que el único medio para conocer los cuerpos era la observación, llegando a indicar en su *Oritognosia* (1795) que *quien quiera leer las descripciones de la obra sin tener delante los fósiles correspondientes, sacará tan poco fruto como de un tratado de Geometría sin figuras.* DEL RIO siempre pensó en crear una gran colección que le serviría de introducción para la confección de una *Geografía mineral del Reyno.*

Organizadas las clases teóricas y prácticas, así como el libro de texto, los alumnos van superando los objetivos propuestos por el maestro. A finales de curso los discípulos próximos a graduarse deben participar en unas disertaciones, similares a las que se desarrollaban en los tiempos en que Del Río era estudiante de la Universidad Complutense. El profesor pronuncia una lección magistral y los alumnos seleccionados mantienen un coloquio. La primera de estas sesiones se realizaría en noviembre de 1796, luego se sucedieron otras, más o menos periódicamente. En los contenidos de los temas elegidos, tal y como podemos comprobar en la *Gaceta de México* y en los *Anales de Ciencias Naturales*, se refleja una clara influencia werneriana. Recogemos a continuación los títulos de algunas de estas conferencias: *Relaciones existentes entre la composición de un mineral y las materias que en un criadero le sirven de acompañantes, Los volcanes, impugnación de la teoría dominante sobre el origen volcánico de algunas rocas, Discurso sobre los volcanes, Discurso de las vetas, etc.*, observando que coinciden casi siempre con materiales claves en la formación minera que se impartía en la Escuela de Freiberg y cómo nuestro autor se decanta, en muchos casos, por las tesis neptunistas. Lo expuesto en estas charlas es de suma importancia para conocer el pensamiento científico de Del Río.

En 1801, en el laboratorio del Centro, descubre Del Río el elemento número 23, el vanadio. Le habían traído un ejemplar de vanadinita de la mina de la Purísima, en Zimapán, encontrando que poseía el 80,72 por 100 de óxido amarillo de plomo y el 14,86 por 100 de un óxido desconocido, también tenía algo de arsénico y óxido de hierro. A esta nueva parte constitutiva la llamaría *pancromo*, por la universalidad de los coloridos en sus productos. Aunque con posterioridad cambiaría esta denominación por la de *eritronio*, ya que las sales de dicho elemento se ponen rojas al fuego y mediante el ataque ácido.

El 26 de septiembre de 1802 comunica el hallazgo a

Cabanilles, el cual informa a Ramón de la Quadra. Este aprovecha la publicación de un artículo en los *Anales de Ciencias Naturales*, t. VI, núm. 16 (1803), con el título *Tabla comparativa de todas las sustancias metálicas, para poderlas distinguir fácilmente, por medio de sus caracteres exteriores, en caso de que presenten cierta semejanza en su fisonomía*. En esta obra se enumeran las peculiaridades de 24 géneros metálicos, en donde se indica que el pancromo es una nueva sustancia mineral anunciada por D. Manuel del Río.

En 1803 llega a México su amigo y compañero de estudios en Sajonia y Hungría ALEJANDRO von HUMBOLDT (1769-1859). Enseguida quedaría prendado de las actividades del Real Seminario de la Minería y así lo reconoce en el *Ensayo político del Reyno de Nueva España* (1841). En esta obra indica que es el Centro científico más importante de toda Hispanoamérica. Asimismo describe las peculiaridades de la Institución: *La Escuela de Minas tiene un laboratorio químico, una colección geológica clasi-*

ficada según el sistema de Werner y un gabinete de Física, en el cual se hallan preciosos instrumentos de SESE RAMSDEN (1735-1800), ADAMS RENOUS y LOUIS BERTHOUD y modelos ejecutados en México con la mayor exactitud y con las mejores maderas del país.

El barón von HUMBOLDT, tras realizar estudios, de 1787 a 1789, en las Universidades de Franfort y Göttingen, pasa a cursar la carrera de ingeniero de minas en Freiberg y en Schmnitz. En 1796, decide organizar una serie de viajes por Europa con su antiguo compañero de clase, el barón de Buch. Poco después, en 1797, opta por trasladarse a España. Por el camino, en la pensión de París que le cobija, conoce al botánico AIME BONPLAND (1773-1858), con quien trabaría amistad por tener las mismas ideas políticas, las mismas tendencias científicas y la misma ansia de viajar. Ambos se dirigieron a la Península Ibérica, visitando la Meseta Central, Andalucía y las Islas Canarias. En 1799, a través del embajador de Sajonia, Philippe Von Forrell, conocen al Ministro Mariano Luis de Urquijo, al que cuentan su interés por organizar una expedición científica a las Américas. Este les presenta al Rey, Carlos IV, el cual les da toda clase de facilidades. Partieron de La Coruña, el 5 de junio, a bordo de la fragata «Pizarro» y tras tortuoso viaje llegaron a Cumaná, en Venezuela. Recorrieron todo este país visitando las Bocas del Orinoco, la ciudad de Caracas, donde se entrevistaron con Mutis, los Llanos, el Chimborazo y otros lugares. Llegarían a México en 1803, en cuyo territorio permanecieron hasta 1804. Fruto de estos viajes, donde se recogen las medidas y observaciones sistemáticas de las distintas manifestaciones de la Naturaleza, son los 30 volúmenes del *Viaje a las regiones equinociales del Nuevo Continente, realizado de 1799 a 1804* (1805-1832). El método de trabajo basado en la observación y toma de datos en distintas estaciones, comparando valores y contenidos, es una norma, como ya hemos visto, de los discípulos de Werner. Fruto de estas aplicaciones, hoy en día se considera a Humboldt como el padre de la Climatología, la Oceanografía y la Geobotánica.

Respecto al método científico inductivo, DEL RIO y demás alumnos de Freiberg lo consideran de necesaria aplicación. Para este autor, tal y como indica en el *Discurso de las vetas* (1800), es necesario observar la Naturaleza, indicando que *Tanto importa conocer las excepciones como las reglas generales, y hay excepciones que examinadas con todas sus circunstancias llegarán a ser generales, quitándoles la contradicción aparente que ahora se nota, porque la naturaleza no se contradice jamás.*

En México, DEL RIO expone con presteza a Humboldt el hallazgo del pancromo. Este enviaría el 25 de julio de 1803, muestras del mineral de Zimapán al Instituto Nacional de Francia, para su análisis. Asimismo adjunta una carta señalando el descubrimiento, por parte de su compañero, de *una sustancia metálica muy diferente al cromo y al uranio, de la cual ya hemos hablado al ciudadano Cha-*

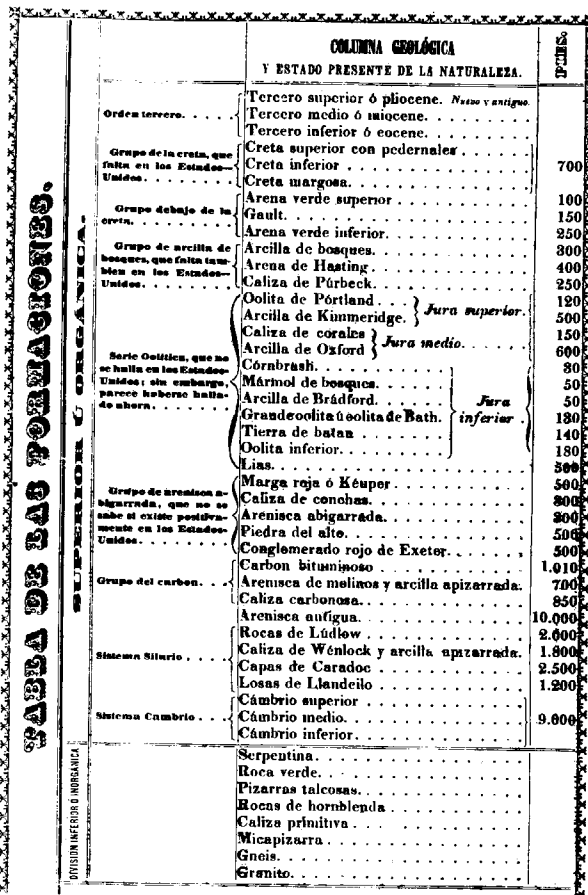


Figura 18.—Columna litocronoestratigráfica (Andrés Manuel del Río, 1841).

pal (1). Pero parece ser que el arca en que se remiten las muestras se pierde en un temporal.

En 1804, DEL RIO publica el hallazgo del pancromo en su traducción, con añadidos, de las tablas Karsten.

Al año siguiente, Humboldt vuelve a París, llevando al químico COLLET-DESCOTILS, H. V. (1773-1818), una nueva muestra de Zimapán. Pero los análisis dan negativos, señalando éste que el mineral era un subcromato de plomo.

En 1830 el sueco Nils Gabriel Sefeström redescubre en las minas de hierro de Taberg el mismo elemento, denominándolo vanadio, en honor a Vanadis que era una antigua divinidad escandinava. Este hecho hizo que DEL RIO, por entonces exiliado en Philadelphia, EE. UU., con motivo de la expulsión de los españoles tras la revolución mexicana, se enfadase con Humboldt, a quien consideraba que no mostró el interés suficiente por sus experimentos.

De 1805 a 1829, Humboldt estuvo en París, preparando sus obras y organizando nuevas excursiones. Fue a la Isla de Elba, al Vesubio y a otros lugares de Italia, con L. Buch y con Gaylussac, con quien había enunciado, en 1805, la ley volumétrica de las combinaciones químicas de los gases (de esta excursión y de las anteriores se conservan donaciones de minerales en el Museo Nacional de Ciencias Naturales). También visita Alemania con el astrónomo ARAGO, D. F. J. (1785-1853) (este autor solicitaría, en 1843, a MEULIN, T., la traducción al francés de los *Principles of Geology* de LYELL, CH. (1797-1875). En 1929 recibe el encargo dado por Nicolás II de Rusia de realizar una expedición a los Urales, Zuhagaria y el Mar Caspio, hacia donde parte con ROSE, G., y EHREMBERG. A la vuelta de su excursión asiática conoce el hallazgo de SEFSTRÖM, N. G., y rápidamente escribe a BERZELIUS, J. J. y a WOECHLER, enviándoles a cada uno un fragmento del mineral que le había dado DEL RIO.

Berzelius reconoció el mineral de Zimapán como auténtica vena de vanadio, señalando que el descubrimiento de dicho elemento correspondía a DEL RIO. Posteriormente este autor se retractaría y pediría disculpa pública por todo lo dicho sobre Humboldt.

Aparte del hallazgo del eritronio o vanadio, hay que considerar el descubrimiento de nueve especies minerales nuevas. Dos de ellas la chovelita y la valencianita, fueron bautizadas en honor de sus alumnos Casimiro Chovel y Vicente Valencia, ajusticiados en 1810 con motivo de la revuelta del cura Hidalgo en Zacatecas.

La actividad docente e investigadora ocupaba buena parte del tiempo de DEL RIO, sin embargo aún le quedaban horas para el desarrollo de trabajos técnicos. Según LOPEZ DE AZCONA, J. M. (1964): *Las actividades más destacadas como ingeniero fueron: desagüe de las Minas del Real del Monte y Morán, fundación de la ferretería de Coal-*

(1) CHAPTAL, J. A. (Nojalet, 1756-París, 1832).

coman, los informes sobre las vetas de cinabrio de Guanajuato, la Dirección de la Casa de la Moneda, el estudio del criadero de hierro de Atlixco, el informe de la fábrica de porcelana de Puebla.

5. LA MINERALOGIA ESPAÑOLA EN LA PRIMERA MITAD DEL SIGLO XIX. PERSISTENCIA DE LA POLEMICA ENTRE PLUTONISTAS Y NEPTUNISTAS

De las numerosas publicaciones de DEL RIO sólo nos hemos centrado en el análisis de las más importantes, ya que de esta labor se pueden extraer numerosos datos sobre los cambios acontecidos en el pensamiento científico mineralógico.

Este autor, en 1804, traduce la tercera edición (de 1800) de las *Tablas mineralógicas dispuestas según los descubrimientos más recientes e ilustrados con notas* (1798), de KARSTEN, D. L. G.

Tenemos dos tablas, la primera (hasta la página 73) comprende la clasificación de los minerales y la segunda se centra en las rocas. Al final aparece un apéndice con los nuevos minerales descritos por el abad HAÜY, R.-J. (1743-1878).

En las tablas, los minerales aparecen descritos según columnas, en las que se señalan las clases, familias, géneros, especies, criaderos americanos y análisis químico. KARSTEN, en vez de señalar yacimientos, consideraba en dicha columna los nombres de los autores que habían realizado el análisis de cada una de las especies fósiles. En la parte inferior de cada hoja se añaden las notas aclaratorias pertinentes.

Se aprecia entonces cómo el ordenamiento de los minerales se articula según la parte constitutiva o dominante (sistemática química), desechando una clasificación basada en la parte característica (sistemática físico-morfológica), que según indica DEL RIO: *No podía en el día servir más que de inducir a error.*

En este abandono de la sistemática werneriana (que sabemos sólo fue parcial, ya que seguía con la descripción de los caracteres externos) pensamos que el hecho de principal influencia es la lectura, por parte de DEL RIO, del *Traité de Mineralogie* (1801), de HAÜY. Este último, exfoliando minerales, pudo observar cómo los ángulos que formaban los cruceros permanecían constantes en cada especie mineral, lo que le llevaría a la conclusión que éstas estarían constituidas por diminutas unidades, a las que puso el nombre de *moléculas integrantes*. La adición o apilamiento regular de estas moléculas nos permitiría obtener las distintas morfologías cristalinas de cada especie mineral. Para DEL RIO la forma y situación de las moléculas integrantes, así como la composición química de las mismas, condicionaría la figura de los minerales. En definitiva nos está dando una idea avanzada, los caracte-

terres externas son un reflejo de la constitución y composición interna de los minerales. Como diría el autor: *¿Qué más se requiere para que tengamos en la Oritognosia géneros tan constantes como en la Zoología o en la Botánica?*

El otro factor que pensamos vino a influir en el cambio de mentalidad de DEL RIO es sin duda el impulso acontecido en los conocimientos químicos, durante los últimos años: avanzaron las técnicas analíticas, se descubrieron nuevos elementos, así como nuevos minerales, y se revisaron los datos antiguos, comprobando la calidad de los mismos. En estos campos es fundamental recordar la edición de la obra de KLAPROTH, M. H. (1743-1817) *Beitrâgen zur chemischen kenntniss der Mineralkorper*, en dos tomos (1795-1797). Como señala KARSTEN, D. L. G. (1797): *Con la reforma de Werner precedió todavía mucho tiempo un conocimiento exacto de los fósiles al examen de sus partes constitutivas. La penetración de este gran hombre descubrió en ellos el principio característico, del que se hicieron varias aplicaciones útiles. Pero ahora que pasados veinte años la Química Analítica da muchos y muy seguros datos a la Oritognosia, debe ésta recibirlos con conocimiento y aprovecharse de ellos, corregir por los mismos la idea de las partes características y aun si fuera necesario renunciarla, más bien que anteponer a hechos fixos e innegables un auxilio vacilante y dudoso, a que se apeló en tiempo de necesidad.*

En la parte geognóstica vino a colaborar Humboldt, apareciendo las modificaciones introducidas en el texto, por el barón, en letra bastardilla.

No quisiéramos acabar el comentario de esta obra sin señalar que en ella no se emplean los vocablos mina, mine o minerai para designar a los metales o a las menas metálicas, tal y como se hace en otras publicaciones oritognósticas. Aquí se usa la palabra metal, tal y como aparece en los trabajos de BARBA, GAMBOA y otros grandes científicos hispanos. Según DEL RIO, esto se debe a que *nuestros mineros sin disputa tienen más derecho que todos los extranjeros.*

En el siglo XIX, DEL RIO se acoge a la sistemática química de BERZELIUS, J. J., siguiendo con las ordenadas descripciones wernerianas de las especies. Así, en 1831, publica en Philadelphia los *Elementos de Oritognosia o del conocimiento de los fósiles, según el sistema de Berzelio y según los principios de Abraham Góttob Werner, con la sinonimia inglesa, alemana y francesa*. Poco después, tras volver (en 1835) de su exilio norteamericano, publica en México los *Elementos de Oritognosia o sea Mineralogía o del conocimiento de los fósiles, según el sistema del barón Berzelio y según los principios de Abraham Góttob Werner. Para uso del Real Seminario de la Minería*. Llama la atención la equiparación de Oritognosia y Mineralogía, recordemos que no hacía mucho la segunda era una parte de la primera.

Con la independencia de las colonias, muchos de nuestros

científicos mineros retornan a Europa. Uno de ellos es Fausto Elhúyar, el cual participaría activamente en la reorganización de la minería española, incluido su docencia (tal y como se aprecia en el R. D. de 4 de julio de 1825). Las Cátedras de Almadén quedaron bajo la supervisión del Director General de Minas, puesto para el que había sido designado Fausto. Con la nueva estructura docente y las progresivas mejoras que se fueron introduciendo se poblaron las aulas, siendo esta la época en que la Academia daría sus más brillantes frutos.

Los alumnos más aventajados eran remitidos a Freiberg para complementar su formación. En 1828 se decide el pase a la Escuela de Minas sajona de GOMEZ PARDO, L., y SAINZ DE BARANDA, I. De igual forma, al año siguiente se seleccionan con idéntico destino a AMAR DE LA TORRE, R., y BAUZA, F., así como al ingeniero ayudante de caminos EZQUERRA DEL BAYO, J. De este grupo de élite salieron los encargados de reorganizar el Cuerpo de Ingenieros de Minas (1833), la Escuela Especial de Minas (1835) y algunos de nuestros mejores ingenieros-geólogos del siglo XIX.



Figura 19.—Joaquín Ezquerro del Bayo (1793-1859), ingeniero de minas-geólogo, autor del primer Mapa Geológico de Síntesis de España en 1850, y del primer tratado de Laboreo de Minas en 1839.

teres externos son un reflejo de la constitución y composición interna de los minerales. Como diría el autor: *¿Qué más se requiere para que tengamos en la Oritognosia géneros tan constantes como en la Zoología o en la Botánica?*

El otro factor que pensamos vino a influir en el cambio de mentalidad de DEL RIO es sin duda el impulso acontecido en los conocimientos químicos, durante los últimos años: avanzaron las técnicas analíticas, se descubrieron nuevos elementos, así como nuevos minerales, y se revisaron los datos antiguos, comprobando la calidad de los mismos. En estos campos es fundamental recordar la edición de la obra de KLAPROTH, M. H. (1743-1817) *Beitrâgen zur chemischen kenntniss der Mineralkorper*, en dos tomos (1795-1797). Como señala KARSTEN, D. L. G. (1797): *Con la reforma de Werner precedió todavía mucho tiempo un conocimiento exacto de los fósiles al examen de sus partes constitutivas. La penetración de este gran hombre descubrió en ellos el principio característico, del que se hicieron varias aplicaciones útiles. Pero ahora que pasados veinte años la Química Analítica da muchos y muy seguros datos a la Oritognosia, debe ésta recibirlos con conocimiento y aprovecharse de ellos, corregir por los mismos la idea de las partes características y aun si fuera necesario renunciarla, más bien que anteponer a hechos fixos e innegables un auxilio vacilante y dudoso, a que se apeló en tiempo de necesidad.*

En la parte geognóstica vino a colaborar Humboldt, apreciando las modificaciones introducidas en el texto, por el barón, en letra bastardilla.

No quisiéramos acabar el comentario de esta obra sin señalar que en ella no se emplean los vocablos mina, mine o mineraí para designar a los metales o a las menas metálicas, tal y como se hace en otras publicaciones oritognósticas. Aquí se usa la palabra metal, tal y como aparece en los trabajos de BARBA, GAMBOA y otros grandes científicos hispanos. Según DEL RIO, esto se debe a que *nuestros mineros sin disputa tienen más derecho que todos los extranjeros.*

En el siglo XIX, DEL RIO se acoge a la sistemática química de BERZELIUS, J. J., siguiendo con las ordenadas descripciones wernerianas de las especies. Así, en 1831, publica en Philadelphia los *Elementos de Oritognosia o del conocimiento de los fósiles, según el sistema de Bercelio y según los principios de Abraham Góttob Werner, con la sinonimia inglesa, alemana y francesa*. Poco después, tras volver (en 1835) de su exilio norteamericano, publica en México los *Elementos de Oritognosia o sea Mineralogía o del conocimiento de los fósiles, según el sistema del barón Bercelio y según los principios de Abraham Góttob Werner. Para uso del Real Seminario de la Minería*. Llama la atención la equiparación de Oritognosia y Mineralogía, recordemos que no hacía mucho la segunda era una parte de la primera.

Con la independencia de las colonias, muchos de nuestros

científicos mineros retornan a Europa. Uno de ellos es Fausto Elhúyar, el cual participaría activamente en la reorganización de la minería española, incluido su docencia (tal y como se aprecia en el R. D. de 4 de julio de 1825). Las Cátedras de Almadén quedaron bajo la supervisión del Director General de Minas, puesto para el que había sido designado Fausto. Con la nueva estructura docente y las progresivas mejoras que se fueron introduciendo se poblaron las aulas, siendo esta la época en que la Academia daría sus más brillantes frutos.

Los alumnos más aventajados eran remitidos a Freiberg para complementar su formación. En 1828 se decide el pase a la Escuela de Minas sajona de GOMEZ PARDO, L., y SAINZ DE BARANDA, I. De igual forma, al año siguiente se seleccionan con idéntico destino a AMAR DE LA TORRE, R., y BAUZA, F., así como al ingeniero ayudante de caminos EZQUERRA DEL BAYO, J. De este grupo de élite salieron los encargados de reorganizar el Cuerpo de Ingenieros de Minas (1833), la Escuela Especial de Minas (1835) y algunos de nuestros mejores ingenieros-geólogos del siglo XIX.



Figura 19.—Joaquín Ezquerra del Bayo (1793-1859), ingeniero de minas-geólogo, autor del primer Mapa Geológico de Síntesis de España en 1850, y del primer tratado de Laboreo de Minas en 1839.

En 1834 la Dirección General de Minas y la Junta Consultiva del Cuerpo deciden el traslado de las enseñanzas mineras desde Almadén a Madrid. Poco después, por Real Decreto, de 23 de abril de 1835, firmado por el Ministro del Interior MEDRANO, D., se manda que se haga efectivo el acuerdo anterior. La Escuela se inauguraría el 7 de enero de 1836.

El día 3 de mayo de 1835 se nombra a los tres profesores de la Escuela: AMAR DE LA TORRE, R., de Mineralogía, Geognosia y Prácticas de Campo; EZQUERRA DEL BAYO, J., de Mecánica Aplicada y Laboreo, y GOMEZ PARDO, L., de Docimasia y Metalurgia. La carrera consta de cinco años, cursándose los dos últimos en establecimientos mineros.

En 1790 el geólogo escocés Sir JAMES HALL (1761-1832) (de igual nombre que el americano padre de la teoría del geosinclinal) observa cómo una masa de vidrio que había sido enfriada lentamente llega a cristalizar. Posteriormente comprueba cómo un fragmento de vidrio desvitrificado y vuelto a fundir tras un enfriamiento rápido volvería a dar vidrio. HALL había acudido al Vesubio, formando parte de la expedición de DOLOMIEU, D. G. (1750-1801), y conocía el carácter vítreo de las lavas. Conjugando esta experiencia con la anterior, se dedicaría a realizar ensayos de fusión y solidificación de rocas volcánicas.

Estas investigaciones animaron a otros científicos. Así, poco después, MITSCHERLICH, E. (1794-1863) llega a formar cristales de feldespato y de mica, fundiendo los elementos componentes.

También KARSTEN, en 1834, encontraría cristales de feldespatos, bien conformados, en las paredes de un horno de la región de Hartz, en que se fundía una mena de cobre de ganga pizarrosa.

Con estos y otros casos se apuntalaron las teorías de los defensores de un origen ígneo de las rocas cristalinas, las cuales se habrían formado debido al calor reinante en el interior de la tierra. Muchos autores, en sus tratados, sólo consideraban los procesos mecánicos de erosión-transporte-sedimentación para describir la formación de las capas de los terrenos estratificados. La situación era tal que DEL RIO llega a señalar en el *Manual de Geología. Extracto de la Lethaea Geognóstica de Bronn, con los animales y vegetales perdidos, ó que no existen, más característicos de cada roca y con algunas aplicaciones a los criaderos de esta República* (1841): *Antes era absoluto Neptuno, ahora quiere ser Vulcano, más ya no es tiempo de absolutismos ni en ciencias ni en gobiernos.*

Llama la atención en la obra antes mencionada el uso de la palabra Geología. Parece ser que la paternidad de este término se la debemos a SAUSSURE, H. B., según se aprecia en *Voyage dans les Alpes* (1779-1796). Poco después LYELL, CH. (1797-1849) escribe los *Principles of Geology* (1830-1834), obra considerada como el primer tratado universal sobre esta ciencia. Ese mismo año nace

la primera Cátedra de Geología, en la Universidad parisina de la Sorbona, siendo cubierta por PREVOST, C.

En España, bajo la influencia de la obra de LYELL, algunos autores empiezan a emplear la palabra Geología, entendida ésta como la ciencia dedicada al estudio de la tierra. Por ejemplo, EZQUERRA DEL BAYO, J. (1793-1859), en su obra *Geognosia. Sobre los terrenos terciarios de España* (1937) señala que *En mis viajes por el extranjero como pensionado del Gobierno, he tomado alguna afición al estudio de la geognosia y la geología...*

Mientras que en Europa, sobre todo en Francia e Inglaterra, geología y geognosia, a principios del siglo XIX, alcanzaban el mismo significado. Para algunos autores, tal es el caso de AMAR DE LA TORRE, R. (1802-1874), según deducimos de sus apuntes manuscritos de *Geognosia* (1845), que se conservan en la Biblioteca de Geología de la Escuela, ambos términos son cosas distintas: Geognosia significa «conocimiento de la tierra» y Geología «doctrina o teoría acerca de la tierra», por lo tanto el primer término corresponde a lo conocido, a lo actual, mientras que el segundo se refiere a lo hipotético, a los acontecimientos del pasado. De todas formas, las palabras geognosia y geología empiezan pronto a diferenciarse, quedando la primera (como ciencia dedicada al estudio de las rocas) englobada en la segunda. Es curioso señalar cómo EZQUERRA DEL BAYO escribe poco después *Elementos de laboreo de minas, precedidos de algunas nociones sobre geognosia y la descripción de varios criaderos de mineras, tanto de España como de otros sitios de Europa* (1839) y cómo, en 1851, cambia el título anterior por el de *Elementos de laboreo de minas, precedidos de algunas nociones sobre geología, con aplicación al mejor conocimiento de los terrenos que pueden ser objeto de investigaciones mineras.*

Según MAFFEI, E., y RUA DE FIGUEROA, R. (1871), la primera obra original de Geología General en tierras hispanas se la debemos al militar e ingeniero de Minas LUJAN Y MIGUEL ROMERO, F. de (1793-1857); son las *Lecciones de Geología* (1841) impartidas en la Sociedad de Instrucción Pública. Como ya mencionamos, ese mismo año se edita el *Manual de Geología* de DEL RIO.

Por aquellas fechas DEL RIO contaba con la edad de 77 años, siendo muy difícil que cambiara ya sus postulados de toda la vida, acoplando los nuevos conocimientos a sus ideas.

WERNER suponía que el granito procedía de la precipitación química en el seno de un líquido de carácter ácido, cuyo poder de disolución era mayor que el del agua. Desde Munich, FUCHS demuestra a través de sus experimentos que para llevar a cabo la cristalización no hace falta que las sustancias estén disueltas, sino que este proceso se puede producir a partir de una masa pastosa. DEL RIO se acoge a lo expuesto por este último autor, desechando las tesis vulcanistas: *...nadie ha formado por el fuego una mezcla parecida al granito, ni será tácil por lo infusible*

del cuarzo y lo fusible del feldespato y la mica, tan revueltos unos con otros que no se puede dudar de su origen secundario, además que ni en el granito, ni en las otras rocas (de su grupo) se ha visto nada de vidrioso, como debía esperarse del fuego. Asimismo se manifiesta en contra de la fusión inicial de los materiales de la tierra ya que: No pueden existir juntos la siliza y el carbonato de cal, sin que se pierda su ácido, lo mismo digo de los silicatos aluminosos, como feldespato, mica, etc. Supuesto esto, si todo se fundió junto, yo preguntaría si conforme a las leyes químicas pudo existir el carbonato de cal sin convertirse en silicato, y entonces apenas habría quedado un átomo de cuarzo ni de caliza en el reino mineral; mas como éstos abundan y escasea el silicato de cal... se sigue que no pudo haber estado fundida la caliza, sino que adquirió la estructura cristalina por otro medio, y cual si no fué que por el agua?

Para DEL RIO, en el paso del estado pastoso a cristales de forma regular se produce un gran desprendimiento de calor y si la cristalización se desarrolla de forma rápida se puede llegar a la rusementación (fusión), lo que podría ser la causa de los volcanes. También considera como posible causa de la génesis de estos últimos a la acción de masas eléctricas de fuego bajadas del cielo.

En cambio LUJAN considera una génesis ígnea para las primeras rocas de la tierra, desde la perspectiva del ingeniero de minas CORDIER, P. L. A. (1777-1861), autor de la *Clasificación metódica de las rocas* (1830), dada en el curso de Geología del Jardín Botánico de París. Debido al enfriamiento de la superficie se formarían los distintos minerales de la corteza. El ataque de los agentes exteriores generaría las masas de sedimentos. El poder calorífico del interior de la tierra sería la causa de la formación de los volcanes, cuyas manifestaciones cortan al resto de los terrenos. En definitiva recoge la idea dada por BUCH que: *un volcán es un canal aún permanente, o la comunicación entre el interior y el exterior de la tierra.*

De todas formas, para todos los autores de la época las primeras rocas que se formaron fueron los granitos y similares, depositándose con posterioridad las rocas estratificadas.

LUJAN opta por una clasificación de los terrenos muy parecida a la elaborada por WERNER.

- Terreno volcánico o plutónico (cortante del resto).
- Terreno Cuaternario (o de formación actual).
- Terrenos Terciarios (que van desde la creta al diluvium).
- Terrenos Secundarios (desde la arenisca roja antigua hasta la creta).
 - a) Cretáceo.
 - b) Jurásico.
 - c) Lías (Muriatífero).
 - d) Arenisca Nueva Roja.
 - e) Carbonífero.
 - f) Arenisca Vieja Roja.

- Terrenos de Transición (o Grupo de la Grauwacka).
- Terrenos primitivos o ígneos (formados antes de la estratificación y carentes de restos orgánicos).

- a) Hojosos.
- b) Cristalinos.

DEL RIO, en cambio, no adopta la sistemática werneriana para clasificar los terrenos. Se deja influir y está al día en cuanto a las más recientes aportaciones de los autores europeos, tal y como recogemos a continuación:

- A) División superior u orgánica.

— Orden tercero.

- a) Tercero superior o Plioceno.
- b) Tercero medio o Mioceno.
- c) Tercero inferior o Eoceno.

— Grupo de la creta.

— Grupo debajo de la creta.

- a) Arena verde superior.
- b) Gault.
- c) Arena verde inferior.

— Grupo de la arcilla de los bosques

- a) Arcilla de los bosques.
- b) Arena de Hasting.
- c) Caliza de Púrbeck.

— Serie oolítica.

- | | | |
|-----------------------------|---|--------------------|
| a) Oolita de Portland. | } | Jurásico Superior. |
| b) Arcilla de Kimmeridge | | |
| c) Caliza de corales. | } | Jurásico Medio. |
| d) Arcilla de Oxford. | | |
| e) Córnbash. | } | Jurásico Inferior. |
| f) Mármol de los bosques. | | |
| b) Arcilla de Bradford. | | |
| h) Oolita grande o de Bath. | | |
| i) Tierra de Batán. | | |
| j) Oolita inferior. | | |
| k) Lías. | | |

— Grupo de arenisca abigarrada.

- a) Marga roja o Keuper.
- b) Caliza de conchas.
- c) Arenisca abigarrada.
- d) Piedra del alto.
- e) Conglomerado rojo de Exeter.

— Grupo del carbón.

—

Arenisca antigua.

— Sistema Silurio.

- a) Rocas de Lúdlow.
- b) Caliza de Wénlock y arcilla apizarrada.

- c) Capas de Caradoc.
- d) Losas de Llandeilo.

— Sistema Cambrio.

B) División inferior u inorgánica.

Pensamos que en esta obra se emplean por primera vez en territorio hispano la denominación de algunos Sistemas: Silurio y Cambrio.

En 1847, EZQUERRA DEL BAYO, en su traducción de los *Elementos de Geología* de LYELL (1844), emplearía los términos Cambriano y Siluriano, apoyándose en su corrección lingüística (equivalente, p. e., a la del término «castellano», también gentilicio que da nombre al propio idioma) y la deseable universalidad del lenguaje científico (de Cambrian y Silurian).

Respecto al origen de las montañas, las ideas de la época eran bastante confusas. Hasta 1859 no tenemos las primeras aportaciones sobre la teoría del geosinclinal, organizadas por HALL, J.; DANA, J. D., y HAUGH, E.

Anteriormente, HUMBOLDT suponía en su *Ensayo geognóstico sobre la situación de las rocas* y en sus obras americanas, sin una experiencia precisa, que las capas seguían la misma dirección en todas las localidades. Otro discípulo de WERNER, SAUSSURE, se dedica a medir direcciones e inclinaciones de las capas, tratando de establecer relaciones entre los plegamientos y las revoluciones que los causaron. Un compañero de los anteriores, el barón de BUCH, relaciona la elevación de las montañas con el volcanismo. Estas últimas ideas son recogidas por EZQUERRA DEL BAYO en la *Geognosia* de sus *Elementos de Labores de Minas* (1839), y en otras de sus obras, al considerar que las montañas se forman debido a las presiones provocadas por la inyección de las masas ígneas, mientras que el hueco dejado en la surgencia de éstas puede generar terremotos y hundimientos. Sin embargo hasta los estudios de ELIE DE BEAUMONT no se señala que al menos parte de las montañas se generan por fenómenos de aplastamiento.

LYELL, LUJAN, DEL RIO y demás autores de la época recogen las aportaciones de BEAUMONT en contra del paralelismo de las montañas. LUJAN, por ejemplo, señala que hay muchas direcciones en las capas de la tierra, las cuales habría que poner en relación con otros tantos levantamientos o hundimientos de montañas. Sin embargo, tal y como se puede apreciar, persiste en la idea de BUCH que la acumulación de sustancias volcánicas es la causa del levantamiento de las montañas.

LUJAN también adopta las teorías de BEAUMONT, E., y SEDGWICK, A., por las cuales en la tierra se observan seis grandes conmociones o trastornos de las capas existentes.

A mediados del siglo XIX, pese al respeto que se tenía a la obra de WERNER, ya nadie sustentaba sus ideas. En

1845, en su *Geognosia*, AMAR DE LA TORRE se decanta por la escuela plutonista, por ser la que más ha prevalecido conforme al estudio de la Física y de la Química. Según este autor: *Abraham Teófilo Werner fue el 1.º que enseñó a observar la composición y construcción del edificio terrestre y descubrió las relaciones recíprocas de las masas que lo componen... Desgraciadamente las teorías que presentó Werner para explicar los fenómenos que con tanta sagacidad había observado, no están conformes con el estado actual de la ciencia.* Dos años después, en 1847, EZQUERRA DEL BAYO tradujo al castellano los *Elements of Geology* (1844), de LYELL, Ch., y no los *Principles of Geology*, como suele citarse. La gran difusión de esta obra, tal vez supuso el fin de la influencia werneriana en los ingenieros y naturalistas españoles.

El *Manual de Geología* de DEL RIO prácticamente no llegó a España, siendo según MAFFEI, E., y RUA DE FIGUEROA, R. (1871), muy difícil de encontrar (pese a que había un ejemplar en la Escuela Especial de Minas, que no sabemos en qué fecha fue adquirido). Las *Lecciones de Geología* de LUJAN suponemos que tampoco gozaron de gran difusión. En 1845, AMAR DE LA TORRE, al dar la bibliografía geognóstica para el curso y para cuando termine éste, señala que *en español no hay ninguna obra.* A partir de mediados de siglo esta situación cambiaría paulatinamente.

Tras la resaca plutonista vino la normalidad y se empezó a admitir la precipitación química como posible causa en la formación de algunas rocas. CASIANO DE PRADO (1797-1866), en la *Descripción física y geológica de la provincia de Madrid* (1864), considera que en la génesis del granito interviene el fuego y posiblemente el agua.

SOLE SABARIS, L., escribió en 1981: *Todavía está por descifrar la influencia de la escuela de Werner en la Geología española.* Esperamos con este artículo haber contribuido en algo a ello.

AGRADECIMIENTO

Damos las gracias a las personas, enumeradas a continuación, que nos han facilitado ayuda en la investigación bibliográfica necesaria para la preparación de este artículo: Dña. Pilar San Pío (Jardín Botánico); D. Antonio Cansco, D. Julián Vega, D. David Gil y D. Trinidad Torres (E.T.S.I. Minas), así como al Excmo. Sr. D. Juan Manuel López de Azcona (Dr. Ingeniero de Minas).

BIBLIOGRAFIA

ALIA, M. (1990): *Aspectos históricos de la Geotectónica.* In *Historia de la Geología.* Real Acad. de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Madrid.

ALONSO BARBA, A. (1640): *El arte de los metales, en el que se enseña el verdadero beneficio del oro y la plata por azogue, el modo de fundirlos y cómo se han de refinar y apartar unos de otros.* (ed. de 1770). Imp. de la Viuda de Manuel Fdez.

AMAR DE LA TORRE, E. (1845): *Geognosia.* Lecciones manuscritas de Geognosia explicadas en la Escuela Especial de Ingenieros de Minas. Madrid (inéd.).

AMOROS, J. L. (1964): *Notas sobre la historia de la Cristalografía y la Mineralogía V. La Mineralogía española en 1800: La «Oritognosia» de Andrés del Río.* Bol. Soc. Esp. Hist. Nat. (Geol.), 62, 199-220.

ARNAIZ Y FREG, A. (1962): *Don Andrés del Río, descubridor del eritronio (vanadio).* Min. y Metalurg., 21, 63-100.

AYALA, F. J. (1986): *Tecnología y Sociedad en la Primera Revolución Industrial.* Industria Minera. Madrid.

BARGALLO, M. (1955): *La Minería y la Metalurgia en la América española durante la época colonial.* Ed. Fondo de Cultura Económica. México.

BAUER, G. (AGRICOLA) (1546): *De natura fossilium.* Trad. al inglés por BANDY, M. C., y BANDY, J. L., en 1955. Geol. Paper, 63. Ed. Geol. Soc. of America. Nueva York.

BAUER, G. (AGRICOLA) (1556). *De Re Metallica.* Basileae. Trad. al inglés por HOWER, H. C., y HOWER, L. H. Ed. Dover. Nueva York.

BERGMAN, T. D. (...): *Manuel du mineralogiste sciagrafie du regne mineral d'après l'analyse chimique.* Trad. al francés por MONGEE en 1792. París.

BERGMAN, T. D. (...): *Meditations de la sistemátique fossilium natural.*

BERZELIUS, J. J. (1819): *Nouveau système de Mineralogie.* París.

BOWLES, W. (1775): *Introducción a la Historia Natural y a la Geografía Física de España.* Imp. Real. Madrid.

BRUNNER, J. (1800): *Ensayo de un sistema nuevo de Mineralogía.* Leipsic. Trad. al español por HERRGEN, C., An. de Cienc. Nat. (1804): t. VII, 21, 219-322. Madrid.

BUCH, L. von (1809): *On volcanos and Craters of Elevation.* Edinburgh New Phil. Jour, vol. XXI, p. 206, U. K.

BUFFON (Conde de) (1749-1788): *Histoire Naturelle général et particulière.* 36 tomos. París. Trad. al español por CLAVIJO Y FAJARDO, J., entre 1749 y 1805. Madrid.

BURNET, T. (1681): *Telluris theoria sacra...* London.

CANSECO, A. (1989): *Comentarios a varios textos de la biblioteca histórica.* Ed. E.T.S.I. Minas. Madrid.

CAPEL, H. (1985): *La física sagrada.* Ed. del Serbal. Barcelona.

CAYCEDO, B. (1971): *J. D'Elhúyar y el siglo XVIII neogranadino.* Bogotá.

CORDIER, P. L. (1830): *Clasificación metódica de las rocas.* Curso de Geología del Jardín Botánico. París.

CRONSTDET, A. (1758). *Forsok til. eller Mineral Rikets Upställning.*

CHABANEAU, F. (1790): *Elementos de Ciencias Naturales.* T. I. Madrid.

CHARPENTIER (1778): *Mineral Geographie der Chursächsischen Lande.* Leipzig.

DEL BARCO, M. (Edic. 1989): *Historia Natural de la Antigua California.* Crónica de América, 53. Historia-16. Madrid. 317 pp.

DEL RIO, A. M. (1795): *Elementos de Oritognosia o del conocimiento de los fósiles, dispuestos según los principios de A. G. Werner, para el uso del Real Seminario de la Minería de México.* Imp. Zúñiga y Ontiveros. México.

DEL RIO, A. M. (1799): *Discurso sobre los volcanes.* An. Cienc. Nat. (1800), t. II, 6, 335-348. Madrid.

DEL RIO, A. M. (1802-1804): *Discurso sobre las vetas.* A. Cienc. Nat. (1802), t. V, 13, 25-37 y (1804), t. VII, 19, 30-48. Madrid.

DEL RIO, A. M. (1803): *Descripción de una Piedra perlada.* An. Cienc. Nat., t. VI, 18, 363-367.

DEL RIO, A. M. (1831): *Elementos de Oritognosia o del conocimiento de los fósiles según el sistema de Berzelio, y según los principios de Abraham Góttob Werner, con la sinonimia inglesa, alemana y francesa.* Imp. J. F. Hurtel. Philadelphia.

DEL RIO, A. M. (1841): *Manual de Geología, extracto de la Lethaea Geognóstica de Bronn, con los animales y vegetales perdidos o que no existen más característicos de cada roca y con algunas aplicaciones a los criaderos de esta República.* Imp. I. Cumplido, México.

DEL RIO, A. M. (1845): *Elementos de Oritognosia o sea Mineralogía o del conocimiento de los fósiles, según el sistema del barón Berzelio y según los principios de Abraham Góttob Werner. Para uso del Seminario Nacional de la Minería.* Imp. I. Cumplido. México.

DOLOMIEU, D. (1781): *Voyage aux isles Lipari.* París.

DOLOMIEU, D. (1791): *Mémoire sur les pierres composées et sur les roches, Observations sur la physique, sur l'histoire naturelle et sur les arts.* Vol. 39, pp. 374-407.

ELHUYAR, F., y ELHUYAR, J. J. (1785): *Mémoire sur la nature du Volfram, a c'elle d'une nouveau métal qui entre dans sa composition.* R. Ac. Sc., Inscript. et Bell. Art. de Toulouse.

ELHUYAR, J. J. (comienzos de los 90 en el s. XVIII): *Orythología.* Nueva Granada. Papeles de MUTIS, C., Archiv. R. Jardín Botánico. Div. III.6.1.23. Madrid. Muy probable.

EZQUERRA DEL BAYO, J. (1837): *Geognosia. Sobre las formaciones terciarias del Centro de España.* Periódico: El Español, 619-622, del 9 al 16 de julio de 1837. Madrid.

EZQUERRA DEL BAYO, J. (1839): *Elementos de laboreo de minas, precedidos de algunas nociones sobre geognosia y la descripción de varios criaderos minerales, tanto en España como en otros reinos de Europa.* Imp. Salvador Albert. Madrid.

EZQUERRA DEL BAYO, J. (1851): *Elementos de laboreo de minas, con algunas nociones sobre geología, con aplicación al mejor conocimiento de los terrenos que pueden ser objeto de las investigaciones mineras.* Imp. de la Viuda de Antonio Yenesa. Madrid.

FAUL, H., y FAUL, C. (1983): *It began with a stone. A History of Geology.* Wiley and Sons. USA.

FEIJOO, B. J. (1733). *Teatro Critico Universal.* T. IV, Imp. Joaquín Ibarra.

FERBER (1789): *Briefe Mineralogischen Junnhaltens an der Freiherrn von Rackniz.* Berlín.

FOUCROY, M. A. T. (1793): *Diario de los nuevos descubrimientos de todas las ciencias físicas, que tienen relación con las diferentes partes del arte de curar.* V. III. Imp. de Sancha. Madrid.

GERHARD, C. (1773): *Beyträge zur Chemie und Geshichte des Mineral-Reichs.* Berlín.

GUETTARD, J.-E. (1751): *Mémoire et carte minéralogique sur la nature et la situation des terrains qui traversent la France et l'Angleterre.* Mém. Acad. Roy. Sci. Paris (1746), pp. 363-392.

GMELIN (1780): *Grundis der Mineralogie.* Göttingen.

GUYTON DE MORVEAU, L. B. (1790). *Traité des caractères extérieurs des fossiles.* Dijon.

HALL, Sir J. (1800): *Experiments upon Whinstone and Lava.* Nicholson's Jour. Nat. Phil. Chem. Arts, vol. 4, pp. 8-18, 56-65.

HALLAM, A. (1983): *Great Geological Controversies.* Oxford Univ. Press. U. K. Trad. en Labor.

HARKER, A. (1909): *The Natural History of igneous rocks.* Ed. McMillan. Nueva York.

HAÜY, R. J. (1784): *Essai d'une théorie sur l'estructure des cristaux.* París.

HAÜY, R. J. (1801): *Traité de Mineralogie.* 5 vols. París. Reed. por Ed. Culture et Civilisation en 1968. Bruselas.

HENCKEL, J. F. (...): *Kies Historie.* Leipzig.

HOYOS, M., A. (1990): *Historia de la Mineralogía.* In *Historia de la Geología.* Real Acad. de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Madrid.

HUMBOLDT, A. VON (1805-1832): *Viaje a las regiones equinociales del Nuevo Continente, realizado de 1799 a 1804.* 5 vols. Imp. Casa Rosa (ed. 1826). París.

HUMBOLDT, A. VON (1841): *Ensayo político del Reino de Nueva España.* 2 vols. Trad. al español por OLIVE, P. M., en 1818. Imptas. Núñez e Ibarra.

HUTTON, J. (1788): *Theory of the Earth; or an Investigation of the Laws Observable in the Composition, Dissolution, and Restoration of Land upon the Globe.* Trans. Royal Soc. Edinburgh. Vol. 1, pp. 209-304.

HUTTON, J. (1799): *Theory of the Earth with proofs and illustrations.* 2 vols. Reed. Ed. Engelman & Co. en 1959. Londres.

IZQUIERDO, J. J. (1958): *La primera casa de las ciencias en México. El Real Seminario de la Minería (1792-1811).* Ed. Ciencia. México.

KARSTEN, D. L. G. (1792): *Dersen Vorede zur Tabelarischen Übersicht der Mineralogich ein fachen Fosilien.* Trad. al español de la 3.ª ed. por DEL RIO, A. M., en 1800. México.

KLAPROTH (1795-1797): *Beiträgen zur kenntniss der Mineralcorper.* 2 vols.

KIRWAN, R. (1784): *Elements of Mineralogy.* Londres.

KIRWAN, R. (1783): *Examination of the Supposed Igneous Origin of Stony Substances.* Trans. Royal Irish Acad., vol. 5, pp. 51-81.

KIRCHER, R. (1665): *Mundus Subterraneus.*

LABORDE, M. (1975): *La minería en los Anales de Ciencias Naturales (1799-1804).* Est. Geol., V. XXXI, 815-830. Dic. 75.

LEIBNIZ, G. (1680). *Petrogea.*

LINNAEUS, C. (1768): *Systema natural.* Holminae.

LOPEZ DE AZCONA, J. M. (1964): *Biografía de Andrés Manuel del Río y Fernández (1764-1849).* Bol. Inf. Inst. Ing. Civiles de España. Año XII, 71, 60-71.

LOPEZ DE AZCONA, J. M. (1964): *Biografía de D. Andrés Manuel del Río y Fernández.* Bol. Inf. Cons. Sup. de Col. de Ing. de Minas, año VII, 64, 9-10.

LOPEZ DE AZCONA, J. M. (1975): *La enseñanza de la minería en el mundo hispánico.* Not. Hist., 199 pp. Madrid.

LOPEZ DE AZCONA, J. M. (1979): *La enseñanza de la minería en el mundo hispánico. Notas históricas.* Madrid.

LOPEZ DE AZCONA, J. M. (1983): *Los hermanos Elhúyar, descubridores del wolframio, 1782-83.* Ed. Fción. Gómez Pardo. Madrid.

LOPEZ DE AZCONA, J. M. (1985): *Semblanza de los hermanos Elhúyar.* Bicentenario del descubrimiento del wolframio por los hermanos Elhúyar, 1783-1793, 8-30. Madrid.

LOPEZ DE AZCONA, J. M. (1990): *La Minería Hispana. Datos históricos.* In *Historia de la Geología.* Real Acad. de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Madrid.

LOPEZ DE AZCONA, J. M.; GONZALEZ CASASNOVAS, I., y RUIZ DE CASTAÑEDA, E. (1992): *Minería Iberoamericana. Repertorio bibliográfico y biográfico.* 4 vols. Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid.

LOPEZ DE AZCONA, J. M., y MESEGUER PARDO, J. (1961): *Contribución a la historia de la Geología y Minería españolas.* Not. y Com. del I.G.M.E. Madrid.

LYELL, CH. (1830-1834): *Principles of Geology.* Londres. Trad. al francés por MEULIN, T., en 1843. París.

LYELL, CH (1844): *Elementos de Geología.* Trad. al español por EZQUERRA DEL BAYO, J., en 1847. Imp. de Antonio Yenesa. Madrid.

MAFFEI, E. (1877): *Centenario de la Escuela de Minas de España 1777-1787.* Ed. Esc. de Minas. Madrid.

MAFFEI, E., y RUA DE FIGUEROA, R. (1871): *Apuntes para una biblioteca española*. Reed. en 1970, VI Congr. Int. de Minería, Cát. de S. Isidro. León.

MITSCHERLICH, A. (1896): *Gesammelte schriften von Eilhard Mitscherlich*. Berlín.

MONREAL, M., y UGARTE, M. O. (1991): *La enseñanza en la Escuela de Minas de Almadén*. Simp. Agustín de Bantancourt, 14 pp. Zaragoza.

PEDRINACI, E. (1992): *El concepto de tiempo geológico: una perspectiva histórica*. III Congr. Geol. de España. Salamanca.

PELAYO, F. (1992): *Ensayos sobre los métodos de beneficio de amalgamación y fundición realizados por Juan José Elhúyar y José Celestino Mutis en Nueva Granada*. In *La Minería en Nueva Granada. Notas históricas. 1500-1810*. Publ. espec. del Bol. Geol. y Minero. Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid.

PLAYFAIR, J. (1802): *Illustrations of the Huttonian Theory of the Earth*. Cadell & Davies. Edinburgh, U. K.

PRADO, C. (1864): *Descripción física y geológica de la provincia de Madrid*. Madrid.

PRIETO, C. (1968): *La minería en el Nuevo Mundo*. (3.ª ed. de 1977). Ed. Bicentenario de la Escuela de Minas. Rev. de Occidente. Madrid.

PUCHE, O., y MATA, J. M. (1992): *La enseñanza de la Mineralogía y Petrología, con especial atención a las Escuelas de Minas*. Ind. Minera, 315, 21-37.

QUADRA, R. DE LA (1803): *Tabla comparativa de todas las sustancias metálicas, para poderlas distinguir fácilmente por medio de sus caracteres exteriores, en caso que presenten cierta semejanza en su fisonomía*. An. Cienc. Nat., t. VI, 16, 1-46. Madrid.

RAMIREZ, S. (1890). *Datos para la historia del Colegio de la Minería*. México.

RAMIREZ, S. (1890): *Biografía del Sr. D. Andrés Manuel del Río*. Bol. Soc. Mexicana de Geol. y Estad.

RAMIREZ, M.ª D.; LOPEZ, P., y DIEGUEZ, C. (1992): *El Real Gabinete de Historia Natural (1771-1815). Una visión ilustrada*. Museo Nac. de Ciencias Nat. Madrid.

ROME DE L'ISLE, J. B. L. (1772): *Cristallographie ou description des formes propres a tous les corps du régime minéral*. 4 vols. París.

ROMEU DE ARMAS (1989): *La Real Escuela de Mineralogía de Madrid (1789-1808)*. Ind. Minera, 287, 7-18. Marzo 89.

ROUELLE, H. M. (1774): *Tableau de l'analyse Chimique*. París.

ROUELLE, H. M. (1774): *Opuscules physiques et chimiques*. París.

RYDEN, S. (1954): *D. Juan José Elhúyar en Suecia y el descubrimiento del tungsteno*. Ed. Insula. Madrid.

SAN PEDRO QUEREJETA, S. (1964): *Algunos comentarios acerca de la personalidad del investigador D. Manuel Andrés del Río*. Bol. Inf. Cons. Sup. de Col. de Ing. de Minas. Año VII, 64, 4-6.

SAUSSURE, H. B. (1779-1796): *Voyage dans les Alpes*. París.

SCOPOLI (...): *Enleitung zur kenntniss und Gebruch der fossilien*.

SCHÄFFERS (1757): *Kalkartiges Bergmetal*. Leipzig.

SCHOUZER, J. J. (1732): *Physique Sacrée, ou Histoire Naturelle de la Bible*. Ed. Schen, K. P., y Mortier, P. Amsterdam.

SCHÜTZ, BARON DE (1797): *Memorias sobre el progreso y utilidad del sistema mineralógico*. Trad. al español por HERRGEN, C., en 180...., An. de Cienc. Nat., t. III, 209-230. Madrid.

SEQUEIROS, L. (1992): *Las ideas sobre los fósiles del jesuita Del Barco*. III Congr. Geol. de España. Salamanca.

SOLE SABARIS, L. (1975): *Los primeros geólogos catalanes*. Est. Geol., t. XXI, 831-836.

SOLE SABARIS, L. (1981): *Raíces de la Geología española*. Mundo Científico, 9, v. I, 1018-1032.

STENO, N. (1669): *De solido intra solidvm naturaliter contento dissertationis prodromus*. Florence.

STORR, C. (1777): *Curso de Mineralogía y Geometría Subterránea*. Almadén. (ined. y extraviado).

STRZODKA y WACHTLER (1979): *La fundación de la Academia de Minas de Freiberg en el año 1765*. II Centenario de la Escuela de Minas de Madrid, 143-152. Ed. E.T.S.I. Minas. Madrid.

TEOFRASTO DE EFESO (...): *The lapidabus*.

TORRUBIA, J. (1754): *Aparato para la Historia Natural de España*. Imp. Herederos de D. Agustín Godejuela y Sierra. Madrid.

WALLERIUS, I. (1768): *De systematibus mineralogicis et systemate mineralogico rite condensado*. Holmiae.

WERNER, A. G. (1774): *Von der äusserlichen kennzeichen der fossilien*. Leipzig Crusius.

WERNER, A. G. (1787): *Breve descripción y clasificación de las diversas rocas*. Dresde.

WERNER, A. G. (1797): *Nouvelle théorie de la formation des filons*. Trad. al francés por Dabuisson en 1802. París.

WIDENMANN, J. F. G. (...): *Oritognosia*. Trad. al castellano por Herrgen, C., en 1797. Madrid.

Noticias

Nuevas publicaciones del ITGE

Dentro de la Serie Ingeniería Geoambiental, han aparecido en los últimos meses tres nuevas publicaciones que se encuentran a disposición del público en el despacho de ventas del Organismo.

Evaluación y Corrección de Impactos Ambientales

Se trata de un volumen gran formato 29,5 × 21 cm, 331 pp., profusamente ilustrado y formado por diversos especialistas en los distintos temas tratados. La obra se estructura de la siguiente forma:

Presentación.

I. CONCEPTOS BASICOS DE MEDIO AMBIENTE.

Conceptos básicos de Ecología. M.ª Nieves Hidalgo Castro.

Dinámica de los ecosistemas naturales. Angel Jaramillo Gómez.

II. IDENTIFICACION Y EVALUACION DE IMPACTOS AMBIENTALES.

Concepto de impacto ambiental y su evaluación. José Luis Sanz Contreras.

Identificación y evaluación de impacto ambiental sobre la GEA. Daniel Barettino Fraile.

Los proyectos de ingeniería y la corrección de impactos ambientales. Carlos López Jimeno.

Estudios de impacto ambiental y participación social. Tomás Rodríguez Villasante.

Identificación y evaluación de impactos ambientales sobre la flora y la fauna. Domingo Gómez Orea y Teresa Villarino Valdivieso.

Bases cartográficas para la evaluación de impactos ambientales. Ernesto Gallego Valcarce y María Bascones Alvira.

Los peligros naturales en las evaluaciones de impacto ambiental en obras civiles. Francisco Javier Ayala Carcedo.

La evaluación de impacto ambiental desde una óptica ecologista. Santiago Martín Barajas.

Evaluación y cuantificación de impactos sobre el patrimonio histórico y arqueológico. Hortensia Larrén Izquierdo.

III. LEGISLACION AMBIENTAL

Administración ambiental en la CEE. Estado y Comunidades Autónomas en relación con las evaluaciones de impacto ambiental. Fernando Fuentes Bodelón.

IV. TECNICAS GENERALES DE CORRECCION Y RESTAURACION.

Restauración ecológica. Luis Ramón Otero del Peral.

Restauración paisajística. Paloma Fernández Fernández.

Depuración de efluentes gaseosos. Juan Francisco Llamas Borrajo.

Depuración de efluentes líquidos. Juan Francisco Llamas Borrajo.

Tratamiento y eliminación de residuos tóxicos y peligrosos. Antonio Sánchez Trujillano.

Ruidos. Francisco Cadarso González.

V. PROBLEMAS ESPECIFICOS DE PROYECTOS SOMETIDOS A EVALUACION DE IMPACTO AMBIENTAL.

Industrias químicas, petroquímicas y siderúrgicas. José María Puig Mediavilla.

Problemas específicos de industrias sometidas a evalua-

ción de impacto ambiental: Minería a cielo abierto. Lucas Vadillo Fernández.

Problemas específicos de proyectos sometidos a evaluación de impacto ambiental: vías de transporte. Rosa María Matas López y Pedro Pérez del Campo.

Problemas específicos de proyectos sometidos a evaluación de impacto ambiental: grandes presas, puertos y obras en el litoral. Máximo Hernández Ruiz.

Almacenamiento y eliminación de residuos tóxicos y peligrosos. Antonio Sánchez Trujillano.

Impacto ambiental en proyectos agrícolas. Problemas específicos. Miguel Donézar Díez de Ulzurrun.

Impacto ambiental por centrales térmicas. Alberto Carbaño José.

Problemas específicos de las evaluaciones de impacto ambiental de centrales nucleares: enfoque ecológico. Agustina Sterling Carmona.

Residuos radiactivos. Agustina Sterling Carmona.

Los Peligros Naturales en España, 1991

Es el Informe Anual, que sigue a los de 1989 y 1990, correspondiente a 1991. Cuenta con 60 páginas a todo color, en formato 15 x 21 cm, y recoge los datos estadísticos y geográficos de forma global. Se estructura como sigue:

- Presentación.
- Resumen.
- Abstract.
- Los peligros naturales.
 - Meteorología y peligros naturales en España en 1991.
 - Temporales marítimos.
 - Aludes y temporales de nieve.
 - Inundaciones.
 - Sequía.
 - Movimientos del terreno.

Tormentas, incendios naturales y plagas forestales. Terremotos.

- Daños.
 - Víctimas.
 - Pérdidas económicas.
- Ayudas y actuaciones para mitigación de daños.
 - Actuaciones legislativas y organizativas.
 - Actividades formativas.
 - Actuaciones en salvamento marítimo.
 - Inversiones para prevención y corrección de avenidas e incendios forestales.
- Apéndice 1: Distribución geográfica y temporal de víctimas mortales en 1991.
- Apéndice 2: Desastres naturales históricos en España.

Natural Disasters in the World, 1991

Los «Desastres Naturales en el Mundo, 1991» es también el Informe Anual, que sigue al de 1990, correspondiente a 1991. Cuenta con 64 páginas a todo color, en formato 15 x 21 cm, y constituye el único informe global, con abundantes datos estadísticos y geográficos, producido por una institución científico-técnica. La obra se desarrolla según los siguientes apartados:

- Presentation.
- Abstract.
- The Disasters.
 - Cyclones, Hurricanes, Typhoons and Tropical Storms, Floods.
 - Earthquakes.
 - Cold and Heat Waves: Droughts.
 - Sea and Air Accidents Under Adverse Weather Conditions.
 - Volcanic Eruptions.
 - Mass Movements.
 - Storms and Tornadoes.

- The Losses.
 - Human Losses.
 - Economic Losses.
- Actions for Prevention and Mitigation.
 - International Organization and Disasters, 1991.
 - Technology, Science and Reduction of Natural Disasters, 1991.
- Appendix
 - Appendix I: Deads and Missing by Country.
 - Appendix II: Historical Data About Natural Disasters in the World.

Como puede verse por el Índice, se han contemplado todos los Desastres Naturales violentos como los Terremotos, Erupciones volcánicas, Inundaciones, Movimientos de ladera, etc., analizándose las pérdidas económicas y las víctimas; así mismo, las principales Acciones de Mitigación.

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.

Toda la correspondencia referente a las publicaciones deberá dirigirse a:

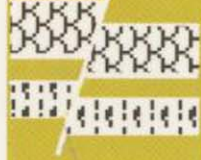
Leopoldo Aparicio Ladrón de Guevara
Instituto Tecnológico Geominero de España
Ríos Rosas, 23. 28003-Madrid

Instituto Tecnológico GeoMinero de España

Finalidad:

Investigación, Desarrollo Tecnológico y Asistencia técnica en Geología, Minería y Disciplinas conexas

GEOLOGIA Y GEOFISICA



MAPA GEOLOGICO NACIONAL (MAGNA)
ESTUDIOS GEOLOGICOS Y CARTOGRAFIA TEMATICA
GEOFISICA Y GEOLOGIA DEL SUBSUELO
GEOLOGIA MARINA (FONDOS MARINOS)
TELEDETECCION APLICADA

RECURSOS MINERALES



METALOGENIA Y CARTOGRAFIA METALOGENETICA
GEOQUIMICA BASICA Y APLICADA
YACIMIENTOS MINERALES
EVALUACION DE RESERVAS E INVENTARIO DE RECURSOS

AGUAS SUBTERRANEAS



CARTOGRAFIA HIDROGEOLOGICA
PROTECCION DE RECURSOS HIDROGEOLOGICOS
EVALUACION Y CONTROL DE ACUIFEROS SUBTERRANEOS
RECURSOS GEOTERMICOS

LABORATORIOS Y ENSAYOS



ANALISIS QUIMICOS Y MINERALOGICOS
ENSAYOS MINERALURGICOS Y GEOTECNICOS
CARACTERIZACION DE ROCAS MINERALES INDUSTRIALES
SONDEOS DE INVESTIGACION HIDROGEOLOGICA Y MINERA
ENSAYOS DE BOMBEO

INFORMACION, DOCUMENTACION Y BANCO DE DATOS



FONDOS DOCUMENTALES Y BASES DE DATOS
SISTEMAS DE INFORMACION Y COMUNICACIONES
CATASTRO MINERO
PUBLICACIONES

INGENIERIA GEOAMBIENTAL



RIESGOS GEOLOGICOS
RESTAURACION DEL MEDIO AMBIENTE MINERO
GEOTECNIA Y GEOLOGIA APLICADA A LA INGENIERIA
MEDIO AMBIENTE Y ORDENACION DEL TERRITORIO

DESARROLLO MINERO



PROCESOS Y TECNOLOGIAS
SEGURIDAD MINERA
NORMATIVA
ESTUDIOS DE ECONOMIA MINERA

MUSEO GEOMINERO

Sede Central:

c/ Ríos Rosas, 23. 28003 MADRID
Tel.: 441 65 00 – Fax: 442 62 16

Centro de Laboratorios:

c/ La Calera, 1 28760 TRES CANTOS (MADRID)
Tel.: 803 22 00



Instituto Tecnológico
GeoMinero de España

MINISTERIO DE INDUSTRIA, COMERCIO Y TURISMO
SECRETARIA GENERAL DE LA ENERGIA Y RECURSOS MINERALES

