

En este número:

- Observaciones sobre la geomorfología del batolito de Santa Olalla.
- Sobre el descubrimiento de fosfatos sedimentarios en el Precámbrico Superior de España.
- × Hidrogeología del acuífero de la Vega de Almuñécar (Granada).
- Consideraciones sobre algunos métodos geofísicos aplicables en la Faja pirítica.
- Análisis del sistema poroso en materiales graníticos.
- Génesis de las mineralizaciones de cobre en las capas rojas triásicas del Sector de Navas de San Juan (provincia de Jaén).

REVISTA BIMESTRAL DEL IGME FUNDADA EN 1874

T. XCIV, Tercer Fascículo. Mayo - Junio 1983

boletín geológico y minero

geología • minería • aguas subterráneas • estudios de minerales • mineralurgia



Tomo 94
Fascículo III
Mayo - Junio 1983

Boletín Geológico y Minero



Revista bimestral de geología económica, industrias extractivas y de su beneficio - fundada en 1874 - 4.ª serie

SUMARIO

Geología	F. DÍAZ DEL OLMO y M. GUTIÉRREZ ELORZA: Observaciones sobre la geomorfología del batolito de Santa Olalla	3
Minería	E. PERCONIG, F. VÁZQUEZ, F. VELANDO y F. LEYVA: Sobre el descubrimiento de fosfatos sedimentarios en el Precámbrico Superior de España	11
Aguas subterráneas	J. BENAVENTE HERRERA y R. FERNÁNDEZ-RUBIO: Hidrogeología del acuífero de la Vega de Almuñécar (Granada)	32
Geofísica	A. GRANDA SANZ: Consideraciones sobre algunos métodos geofísicos aplicables en la Faja pirítica	44
Geotecnia	J. ORDAZ, R. M. ESBERT y L. M. SUÁREZ DEL RÍO: Análisis del sistema poroso en materiales graníticos	60
Estudio de minerales y rocas	J. TORRES-RUIZ y J. FERNÁNDEZ: Génesis de las mineralizaciones de cobre en las capas rojas triásicas del sector de Navas de San Juan (provincia de Jaén)	68
Información	FERNANDO LÓPEZ VERA: Teodoro Ardemans, hidrogeólogo ilustrado de principios del siglo XVIII	83
	Noticias y Notas Bibliográficas	91

DIRECCION Y REDACCION

Ríos Rosas, n.º 23 - Madrid-3

Teléfono 441 70 67

ADMINISTRACION

Doctor Fleming, 7 - Madrid-16

Teléfono 250 02 03

IGME

INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA



SERVICIO DE PUBLICACIONES — MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGIA

El Instituto Geológico y Minero 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 Geológico y Minero de España.
Queda hecho el depósito que marca la Ley.

EXPLICACION DE LA PORTADA

Cristal de halita singenética en lutitas terciarias de la depresión de Lorca (Murcia).

S. Ordóñez, del Departamento de Petrología de la Facultad de Geológicas de la U.C.M.

ISSN 0366 - 0176

Depósito legal: M. 3.279 - 1958

Imprenta IDEAL - Chile, 27 - Teléf. 259 57 55 - Madrid-16

8 NOV. 1983

GEOLOGIA



Observaciones sobre la geomorfología del batolito de Santa Olalla del Cala (Huelva, Badajoz y Sevilla)

Por F. DIAZ DEL OLMO (1) y M. GUTIERREZ ELORZA (2)

RESUMEN

Se pone de manifiesto la presencia de una extensa superficie de erosión de posible edad neógena sobre la que destacan inselbergs de posición y relieves residuales alargados. Esta superficie va acompañada de una potente meteorización tropical húmeda. La incisión de la red fluvial produce la exhumación de inselbergs de resistencia y otras formas menores.

ABSTRACT

The presence of a large erosion surface of presumable Neogene age on which prominent elongated residual reliefs and inselberg of position may be observed, is here evidenced. This surface is affected by a strong humid tropical weathering. The dissection because of running water leads to the exhumation of inselbergs of durability as well as some other minor forms.

1. SITUACION DEL AREA DE ESTUDIO

La zona de trabajo se encuentra dentro de Sierra Morena, más concretamente en la unión de los límites provinciales de Huelva, Sevilla y Badajoz, estando drenada por la Ribera del Cala. Topográficamente es un área aplanada en torno a los 500 m., pero enmarcada por relieves relativamente importantes de dirección NO-SE, entre los que destacan las Sierras del Viso (790 m.), San Roque (830 m.), etc. De clima mediterráneo continental, manifiesta un régimen pluviométrico con estacionalidad marcada y valores de precipitación anual de 898 mm. y temperaturas de 16,3° C (valores medios de 20 años para la estación de Santa Olalla).

Geológicamente se sitúa en la zona de Ossa-Morena, pero próxima al contacto de la zona surportuguesa (LOTZE, 1945).

(1) Departamento de Geografía. Universidad de Sevilla.

(2) Departamento de Geomorfología y Geotectónica. Universidad de Zaragoza.

2. GEOLOGIA DEL BATOLITO Y ZONAS ADYACENTES

El área de Santa Olalla del Cala forma parte del núcleo de una gran megaestructura hercínica, definida por ALIA (1963) como anticlinorio Olivenza-Monesterio. En la zona que nos ocupa aflora una potente serie de pizarras, grauwacas y cuarcitas de tonos gris oscuros de edad precámbrica (*Serie Negra* del autor últimamente citado). A ésta se superponen rocas porfiroides, areniscas arcóscicas y pizarras que culminan en una formación carbonatada, todas ellas del Cámbrico Inferior. En el área meridional se desarrolla una monótona serie de pizarras y grauwacas del Devónico Superior.

Todos estos materiales están afectados por una compleja tectónica polifásica de edad hercínica. Además, están intruidos por complejos plutónicos fundamentalmente post-tectónicos que metamorfizan fuertemente los conjuntos antes descritos. Entre éstos se encuentran el granito de Monesterio, el plutón del Arroyo de la Víbora y

el batolito de Santa Olalla del Cala, los cuales afloran en el área investigada.

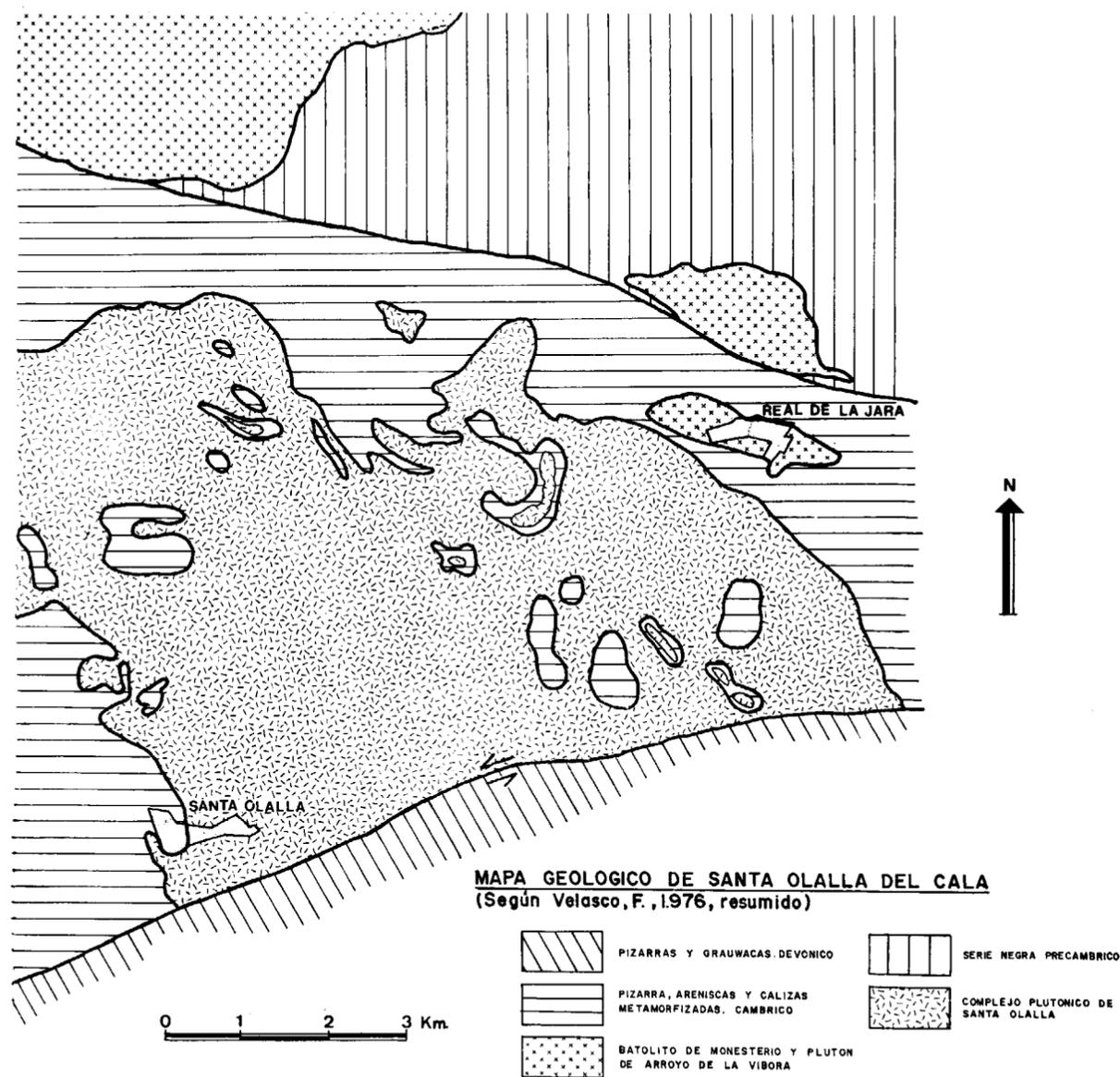
Esta zona ha sido objeto de numerosos estudios con fines muy diversos. Para un conocimiento más profundo de la geología de esta región remitimos al lector a los trabajos de BARD (1969), HERNÁNDEZ ENRILE (1971), VÁZQUEZ y FERNÁNDEZ (1976), VELASCO (1976), CASQUET (1980), etc.

En la figura 1 se presenta un mapa geológico del área, tomado de la cartografía de la Tesis Doctoral de VELASCO (1976), en el cual se ha re-

sumido una gran parte de la información que allí existe.

El granito de Monesterio, situado al N del área de estudio, está constituido por adamellitas y granodioritas con facies cataclásticas (VÁZQUEZ y FERNÁNDEZ, 1976). El plutón del Arroyo de la Víbora, al NE, está formado por granitos a los que acompaña un cortejo filoniano básico (CASQUET, 1980).

El batolito de Santa Olalla, denominado por este último autor Complejo Plutónico de Santa Olalla (C. P. S. O.), está constituido por una am-



plia variedad de rocas: tonalitas, dioritas, acumulados piroxénicos, charnoquitas, dioritoides, diques y pitones ácidos, etc. Dominan esencialmente las tonalitas de grano medio. Como se observa en el mapa geológico, presenta numerosos cuerpos internos de diferente composición, entre los que destacan por su interés morfológico estructuras en *roof pendant* de calizas (Cerros del Almendro y Baterías, entre otros).

El metamorfismo de contacto es muy complejo, dada la variedad de rocas y procesos en juego, y ha sido estudiado minuciosamente por CASQUET (1980).

3. APLANAMIENTOS Y ALTERACIONES

Como hemos señalado, la zona de estudio forma parte del conjunto hercínico peninsular. Se trata, por tanto, de un área de zócalo que ha estado emergida desde las últimas etapas de la orogenia hercínica hasta la actualidad. Por consiguiente ha estado sometida durante este largo período a la acción de los procesos de la dinámica externa. Como consecuencia y al igual que otras regiones del Macizo Hespérico, se caracteriza por el desarrollo de extensas superficies de aplanamiento que están incididas por la red fluvial cuaternaria en mayor o menor grado.

En el área investigada se reconoce una extensa superficie de erosión, que en muchos sectores aparece degradada. Se desarrolla a una altura en torno a los 500 m. Sobre la misma destacan numerosos relieves residuales, bien de estructuras alargadas en dirección hercínica, o relieves aislados con morfología de inselbergs. Los primeros están constituidos en toda la región por las formaciones carbonatadas del Cámbrico Inferior (Sierra del Viso), o por conjuntos cristalinos como el de la Sierra Padrona y Sierra de San Roque, al E y N del área de estudio, respectivamente. Los segundos se describirán detalladamente con posterioridad.

Esta superficie de erosión adquiere un desarrollo importante en todo el S de la provincia de Badajoz. En el pueblo de Bienvenida enrasa con el techo de una formación de calizas y margocalizas con niveles de arcillas de coloraciones rosadas. Este conjunto, sin duda de facies lacustre,

se encuentra enmarcado en el Terciario de Tierra de Barros. No existen dataciones paleontológicas en este último, pero por similitudes de facies con otras cuencas terciarias españolas, estimamos que puede asignársele una edad neógena.

Hacia el S la extensión de esta superficie también es considerable, pero aparece afectada por una tectónica de fractura que produce el escalonamiento de la misma hacia el valle del Guadalquivir (DÍAZ DEL OLMO, 1982).

Esta superficie de erosión se desarrolla en toda la Meseta y SOLÉ SABARIS (1978) la denomina «Superficie de Erosión Fundamental».

El problema de la existencia de varias superficies de aplanamiento en la Meseta, junto con el de la datación de las mismas, ha sido y es motivo de discrepancia, tal como se refleja en la lectura de los distintos trabajos efectuados en esta amplia área (SCHWENZNER, 1937; FEIO, 1952; BIROT y SOLÉ, 1954 a y b; RIBEIRO, 1955; GLADFELTER, 1971; VAUDOUR, 1979; GARZÓN, PEDRAZA, UBANELL, 1982; PÉREZ GONZÁLEZ, 1982, etc.). En la región de estudio no identificamos más que una superficie de erosión de desarrollo regional, y la datación de la misma está en relación con el techo de la formación carbonatada de Bienvenida, tal como hemos indicado anteriormente.

Sobre esta superficie de erosión se desarrollan perfiles de alteración que se manifiestan con una mayor potencia sobre los plutones graníticos. En las trincheras de la carretera de Santa Olalla a Monesterio, y concretamente en el Km. 387,500 (Foto 1), se observa un perfil de alteración de unos 15 m. de potencia, elaborado en el batolito de Monesterio, en el que se reconocen estructuras de meteorización esferoidal y una zonación de la meteorización. Se diferencian las zonas 2 (regolitos sin estructuras), 3 (saprolito que conserva estructuras de la roca), y tránsito a 4 (regolito con bloques redondeados) de OLLIER (1969). Esta disposición nos indica que todavía deben existir varios metros más de alteritas en profundidad. En este punto es donde hemos encontrado la mayor potencia de alteración del área.

En el Macizo Hespérico también han sido citadas alteraciones (CHAPUT, 1971; GUTIÉRREZ ELORZA y RODRÍGUEZ VIDAL, 1978; VAUDOUR, 1979; MOLINA y BLANCO, 1980, etc.). Surge nuevamente la problemática de su datación, dado que se encuentran fosilizadas por materiales que varían en edad

desde el Triásico hasta el Pliocuaternario. Esto lleva a discernir sobre la existencia de una o más etapas de alteración bajo clima tropical húmedo. Entendemos que todavía no existen datos suficientes como para precisar la cronología de las mismas.

4. MODELADO DEL BATOLITO DE SANTA OLALLA

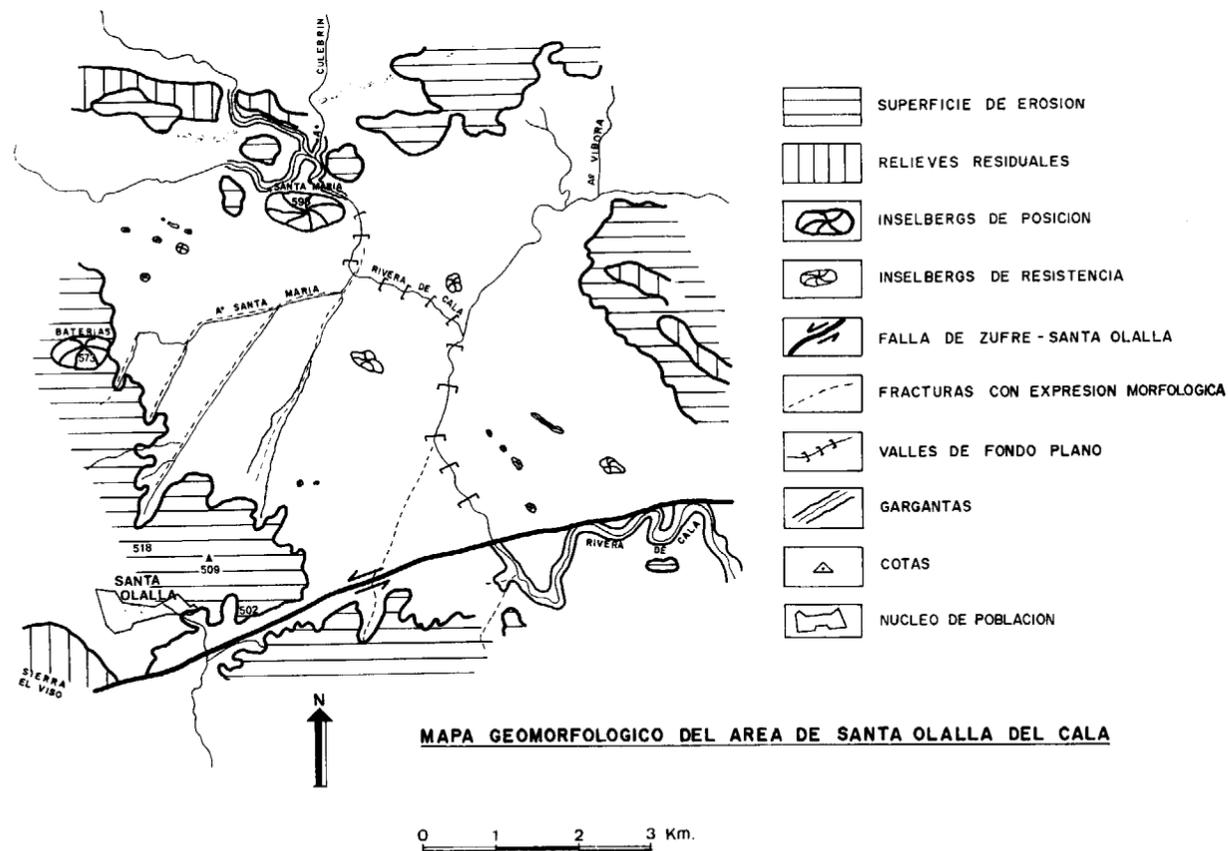
a) Formas mayores

En el batolito de Santa Olalla se distingue en sus márgenes restos de la superficie de erosión anteriormente señalada, relieves residuales alargados constituidos por la formación carbonatada del Cámbrico Inferior, y una morfología de *inselbergs de posición* (BIROT, 1960; TWIDALE, 1982 b) (Cerros Santa María y Baterías, fig. 2). Además, al NE del Cerro de Santa María se vislumbra con

dificultad, debido a su elevado estado de degradación, una superficie encajada en la de desarrollo regional que ha quedado protegida entre este cerro y los relieves residuales de la prolongación septentrional de la Sierra Padrona.

Por otro lado, la mayor parte de la superficie del batolito aparece incidida por la Ribera de Cala y su red de afluentes, que muerden la superficie de erosión existente en los bordes. La Ribera de Cala presenta tramos encajados con morfología en gargantas tanto en los alrededores del Cerro de Santa María como al S de la falla de desgarre de Zufre-Santa Olalla, donde se encaja fuertemente en los materiales devónicos. El resto de su travesía por el batolito presenta una morfología en valle de fondo plano en la que se observan con relativa frecuencia pilancones. La red de afluentes se alinea netamente a favor de las fracturas existentes en el batolito.

Anteriormente hemos indicado que sobre la superficie de erosión, que se desarrolla a una al-



tura en torno a los 500 m., destacan dos relieves residuales con morfología de *inselbergs*. Tales relieves están constituidos por calizas metamorfizadas, con disposición en *roof pendant* en el caso de las Baterías. Se trata por consiguiente de montes-islas que han resistido a los largos procesos de erosión que han dado lugar a la formación de la superficie de erosión.

Por debajo de la superficie de erosión y debido a la incisión de la red sobre el manto de alteración, se ha producido la exhumación de la *superficie basal de meteorización* (BÜDEL, 1957), y ha traído consigo la aparición de numerosos y pequeños *inselbergs de resistencia*, que en algunos casos se presentan alineados en dirección NO (fig. 2).

Se diferencian, de acuerdo con THOMAS (1974), dos tipos de *inselbergs*: *bornhardt* o *inselbergs en domo* e *inselbergs de bloques*. Tanto unos como otros presentan tamaños comprendidos entre metros y decenas de metros. Los *bornhardt* (Foto 2) están controlados por lajamiento. En ocasiones tienen formas alargadas (lomo de ballena). Creemos que muchos de ellos pueden constituir formas embrionarias de *inselbergs* de mayor tamaño existentes en profundidad y todavía no exhumados por la denudación fluvial del regolito. Los *inselbergs de bloques* presentan aspectos diversos. Por un lado pueden estar coronados por *tors* redondeados, y por otro, pueden presentar formas del tipo *castle kopje*. En estos *inselbergs* se reconocen formas del tipo de rocas partidas (*split rocks* y *parted blocks*, de TWIDALE, 1982 a) (Foto 3). La mayoría de las fracturas observadas son verticales y del tipo planar, y en ocasiones presentan bloques superpuestos a la roca partida. También aparecen corredores o pasadizos de hasta 4 m. de anchura que resultan de la separación de los bloques divididos. La génesis de estas formas parece estar asociada a la penetración de agua en diaclasas secundarias, que ejercen una meteorización importante, produciendo la rotura del bloque. Con posterioridad se moviliza uno de los bloques a favor de la vertiente por acción de la gravedad. También la separación del bloque puede estar generada en parte por el paso del bloque superpuesto. En este área no podemos aducir procesos de crioclastia para la generación de estas formas.

b) Micromodelado

Los procesos de meteorización química que afectan a este complejo plutónico dan lugar a un conjunto de rugosidades en la superficie de la roca, las cuales se originan por alteración diferencial fundamentalmente entre los feldespatos y el cuarzo, quedando este último en resalte; tal proceso da lugar al denominado *pitting* por TWIDALE y BOURNE (1976). Otras de las formas más frecuentes existentes en el batolito es la *meteorización esferoidal* (OLLIER, 1971). Se trata de un conjunto de capas concéntricas, de espesor uniforme, alrededor de un núcleo no meteorizado de roca que lo separan del grus o lem granítico. Por otra parte, y ligado a los procesos de meteorización esferoidal, aparecen frecuentes descamaciones sobre la superficie de los afloramientos rocosos en los que se observa una liberación de láminas o conchas (*flaking*).

Otra micromorfología menos frecuente es el agrietamiento poligonal (*polygonal cracking* de TWIDALE, 1982 a) (Foto 4). Se trata de un sistema de fracturas someras que se estrechan en profundidad. Forman celdillas alargadas de bordes irregulares. Este agrietamiento termina en fracturas subparalelas a la superficie de afloramiento. Las encontramos en caras extraplomadas de bloques. Se interpretan como originadas en una primera etapa de desarrollo de estructuras en capas de cebolla, produciéndose en un segundo período una concentración de sales resultantes de la meteorización, expansión tangencial y agrietamiento de las capas.

Otro modelado poco frecuente son los bolos en forma de hongo (*flared boulder*, TWIDALE, 1982 a), y concavidades en las vertientes (Foto 3), ambos relacionados genéticamente entre sí. El origen de esta morfología va ligada a la intensa meteorización subsuperficial existente en la zona de contacto de la roca fresca emergida y las alteritas, ya que es un área en la que vierten las aguas que discurren por el granito aflorante, penetrando en el contacto del regolito y produciéndose un intenso ataque químico. Con posterioridad se lleva a cabo la exhumación de estas formas.

Finalmente, sobre muchas de las superficies desnudas de los granitos aparecen pequeñas depresiones cerradas del tipo *gnammas* (TWIDALE y CORBIN, 1963). Se diferencian tres variedades. La primera corresponde a formas alargadas a favor

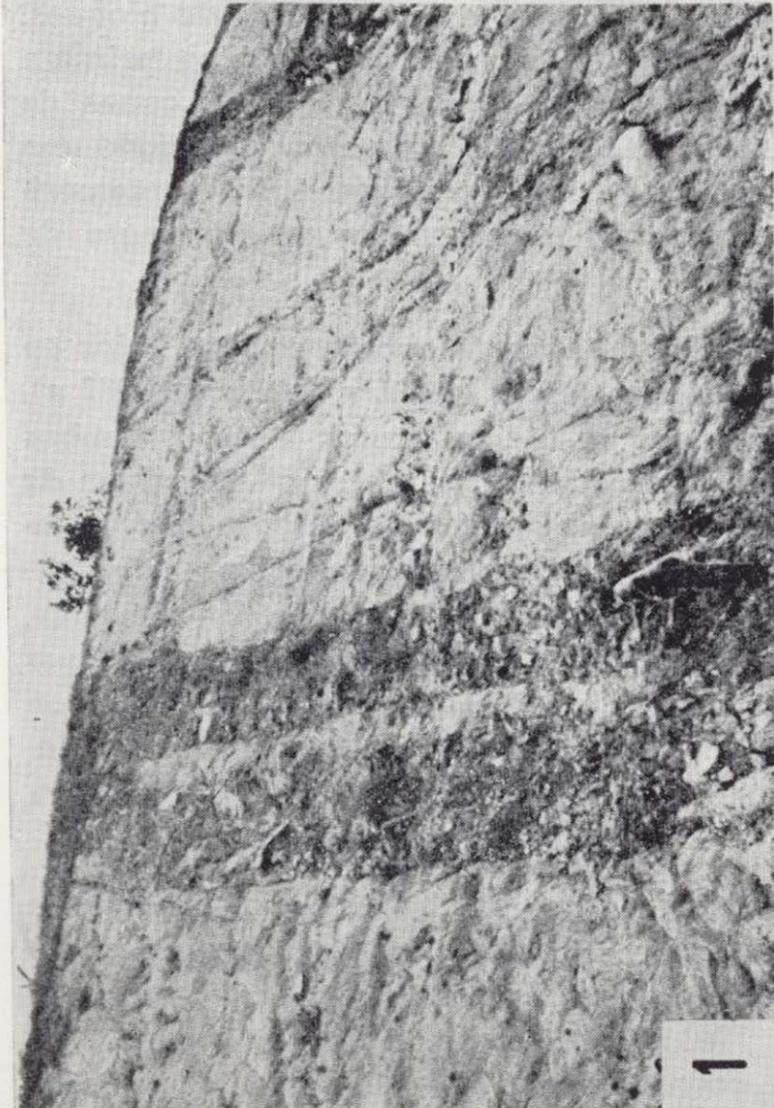


Foto 1.—Perfil de alteración en granito atravesado por diques básicos. Km. 387,500 de la carretera de Santa Olla a Monesterio.



Foto 3.—Bloque partido con fractura planar y corredor. A la derecha se observan formas en *flared slope*.

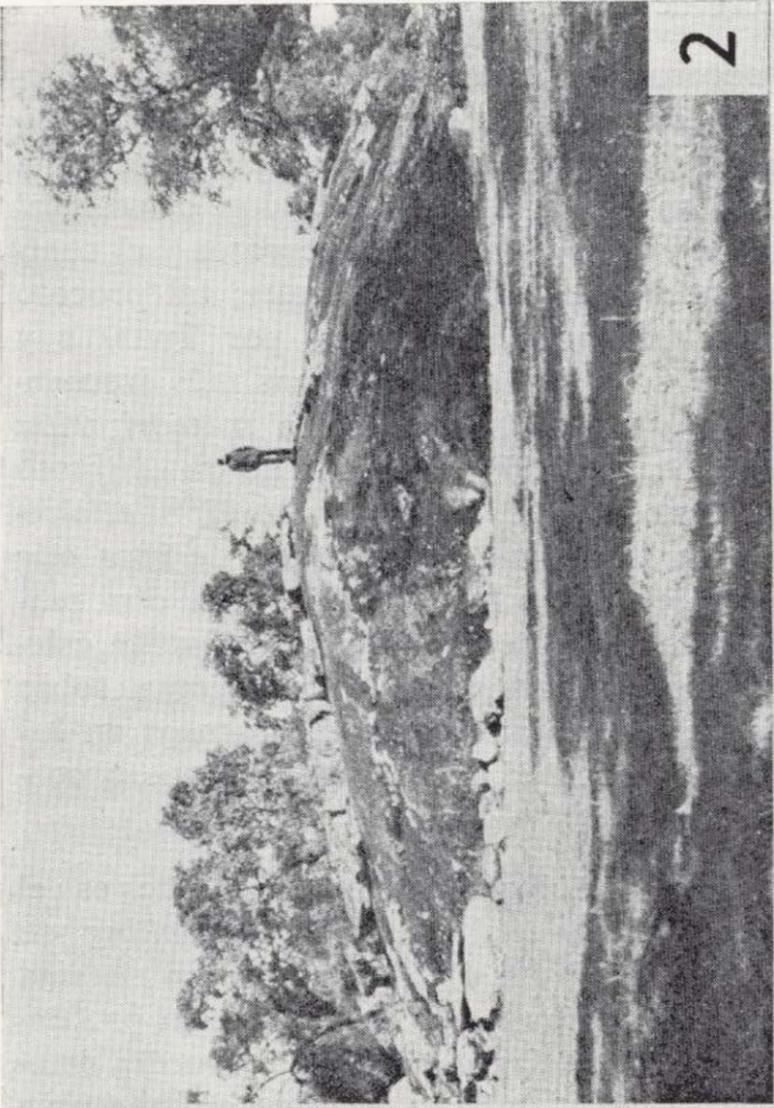


Foto 2.—Bornhardt con lajamiento a techo, destacando sobre una llanura de alteritas.

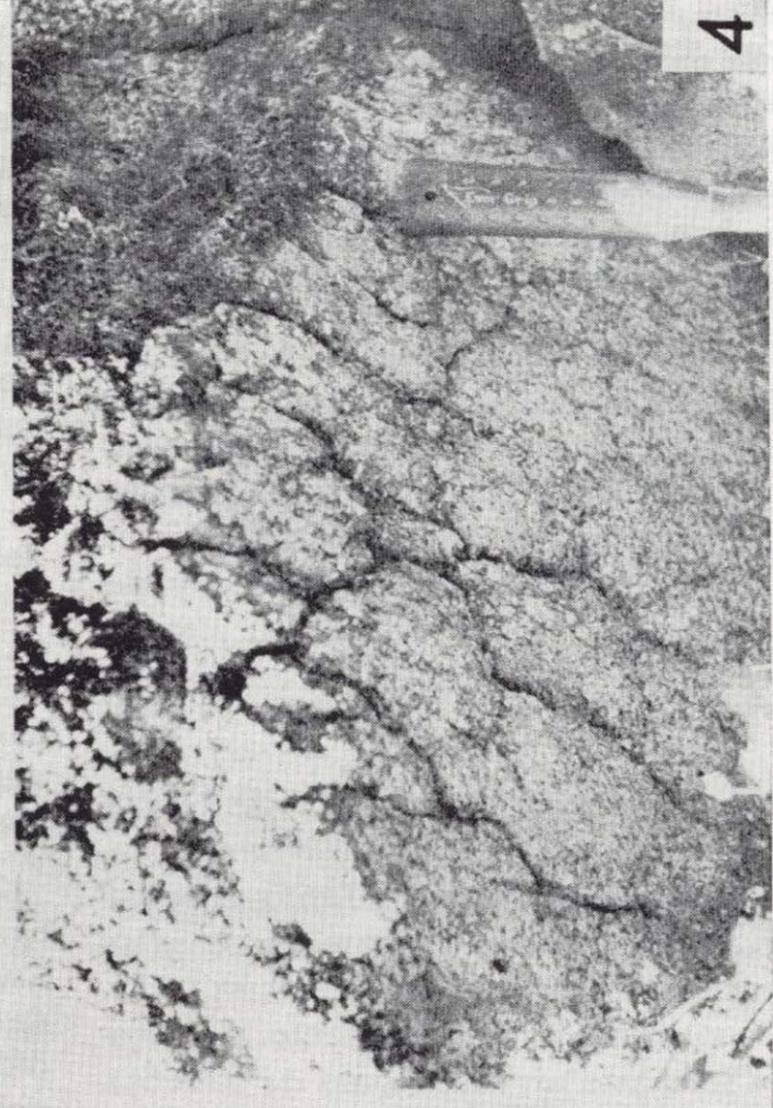


Foto 4.—Agrietamiento poligonal en pared extraplomada de un bloque granítico.



Foto 1.—Perfil de alteración en granito atravesado por diques básicos. Km. 387,500 de la carretera de Santa Olalla a Monesterio.

Foto 3.—Bloque partido con fractura planar y corredor. A la derecha se observan formas en flared slope.

Foto 2.—Bornhardt con lajamiento a techo, destacando sobre una llanura de alteritas.

Foto 4.—Agrietamiento poligonal en pared extraplomada de un bloque granítico.

de fracturas cerradas y se encuentran sobre afloramientos más o menos planos. Las otras dos se desarrollan en vertientes; unas parecen generarse por procesos de descamación y las otras resultan del desgajamiento de bloques que presentan una fractura subvertical vertiente arriba. La movilización por gravedad del bloque en la vertiente trae consigo la aparición de formas en media luna inicialmente semicerradas. Con posterioridad tiene lugar el ahondamiento de las mismas.

5. EVOLUCION GEOMORFOLOGICA

Los conocimientos de la geología regional indican que este área ha permanecido emergida desde finales de la orogenia hercínica. Por consiguiente, ha estado sometida a un intenso desmantelamiento que culminó con el desarrollo de una extensa superficie de erosión, en la que sobresalen relieves residuales alargados e inselbergs de posición (fig. 3). La edad de la misma está relacionada con las formaciones carbonatadas neógenas del área de Bienvenida, ya que la superficie enrasa con el techo de estos carbonatos. Por otra

parte, una profunda alteración tropical húmeda acompaña a la superficie de erosión, siendo más potente sobre los plutones graníticos.

Con posterioridad ha tenido lugar una etapa de denudación de esta superficie efectuada por la acción remontante de los ríos del área. Esto ha traído consigo la aparición de la superficie basal de meteorización con la generación de inselbergs de resistencia, tanto del tipo bornhardt como de bloques, y otras formas menores acompañantes. Se reconoce, además, una superficie intermedia muy degradada que parece indicar que ha existido una posible etapa de pedimentación tras la confección de la superficie de erosión de extensión regional.

La acción remontante continúa manifestándose en la actualidad, produciendo la denudación del regolito, la exhumación de formas embrionarias, y la recesión de la superficie de erosión. Además dan lugar al desarrollo de variadas microformas de esta dinámica actual los procesos de meteoriformas.

BIBLIOGRAFIA

ALIA MEDINA, M.: *Rasgos estructurales de la Baja Extremadura*. Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat., t. 61, pp. 247-263 (1963).

BARD, J. P.: *Le métamorphisme régional progressif des Sierras de Aracena en Andalousie Occidentale (Espagne); sa place dans le segment hercynien sud-iberique*. Tesis Doct. (inérita), Univ. Montpellier, 397 pp. (1969).

BIROT, P.: *Le cycle d'érosion sous les différents climats*. Faculdade Nacional de Filosofia, Universidade do Brasil, 137 pp., Río de Janeiro (1960).

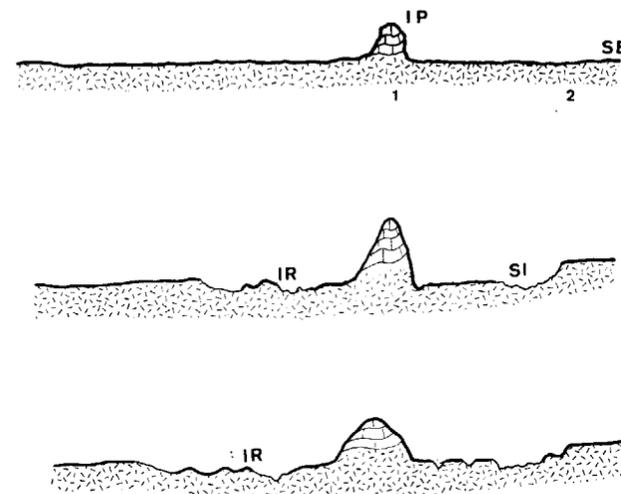
BIROT, P., y SOLÉ SABARIS, L.: *Investigaciones sobre morfología de la Cordillera Central Española*. C.S.I.C., Ins. Juan Sebastián Elcano, 87 pp., Madrid (1954 a).

BIROT, P., y SOLÉ SABARIS, L.: *Recherches morphologiques dans le NO de la Péninsule Ibérique*. Mémoires et Documents, t. IV, C.N.R.S., París, pp. 7-61 (1954 b).

BUDEL, J.: *Die Doppelten Einebnungsflächen in den feuchten Tropen*. Z. Geomorph., N.F. 1, pp. 201-228 (1957).

CASQUET MARTÍN, C.: *Fenómenos de endomorfismo, metamorfismo y metasomatismo en los mármoles de Rivera de Cala (Sierra Morena)*. Tesis Doctoral, 295 pp., Ed. Univ. Complutense de Madrid (1980).

CHAPUT, J. L.: *Aspects morphologiques du sud-est de la Sierra Morena (Espagne)*. Rév. de Géogr. Phys. et de Géol. Dyn. (2), vol. XIII, fasc. 1, pp. 55-66 (1971).



ESQUEMA EVOLUTIVO DEL AREA DE SANTA OLALLA

1.- Roof pendant de calizas 2.- Granitos s.l. de Santa Olalla. SE: Superficie de erosión. SI: Superficie intermedia. IP: Inselberg de posición. IR: Inselberg de resistencia.

- DÍAZ DEL OLMO, F.: *Geomorfología de Sierra Morena. Estudio del interfluvio de las cuencas fluviales Viar-Rivera de Hueznar*. Tesis Doctoral (inédita), Universidad de Sevilla, 503 pp. (1982).
- FEIO, M.: *A evolução do relevo do Baixo Alentejo e Algarve*. 186 p., Lisboa (1952).
- GARZON HEYDT, M. G.; PEDRAZA GILSANZ, J. y UBANELL, A. G.: *Los modelos evolutivos del relieve del Sistema Central Ibérico (sectores de Gredos y Guadarrama)*. Rev. Real Acad. Cienc. Ex. Fis. y Nat. de Madrid, t. 76, Geol., pp. 475-496 (1982).
- GLADFELTER, B. G.: *Meseta and Campiña Landforms in Central Spain*. The University of Chicago, Dpt. of Geography, Research Paper núm. 130, 204 p. (1971).
- GUTIÉRREZ ELORZA, M., y RODRÍGUEZ VIDAL, J.: *Consideraciones sobre la morfogénesis del Sistema Central*. Bol. Geol. y Min., t. 89-II, pp. 109-113 (1978).
- HERNÁNDEZ ENRILE, J. L.: *Estudio geológico-estructural de la región de Monesterio-Santa Olalla del Cala en Sierra Morena Occidental (Prov. de Badajoz y Huelva)*. Tesis Doctoral (inédita), Universidad Complutense de Madrid (1971).
- LOTZE, F.: *Zur gliederung der Varisciden der Iberischen Meseta*. Geotekt. Forschg., t. 6, pp. 78-92, 1 fig. Berlín (1945).
- MOLINA, E., y BLANCO, J. A.: *Quelques précisions sur l'altération du Massif Hercynien espagnol*. C. R. Acad. Sc. Paris, t. 290, Série D, pp. 1293-1296 (1980).
- OLLIER, C.: *Weathering*. Longman, 304 p., London (1969).
- OLLIER, C.: *Causes of spheroidal weathering*. Earth-Sci. Rev., 7, pp. 127-141 (1971).
- PÉREZ GONZÁLEZ, A.: *Neógeno y Cuaternario de la llanura Manchega y sus relaciones con la cuenca del Tajo*. Tesis Doctoral, 787 p., Ed. Universidad Complutense de Madrid (1982).
- RIBEIRO, O.: *Portugal*, t. V de *Geografía de España y Portugal*. Ed. Montaner y Simón, S. A., 290 p., Barcelona (1955).
- SCHWENZNER, J.: *Zur Morphologie des Zentralspanischen Hochlandes*. Geogr. Abhandl., 3.ª Ser., t. X, 128 p. (1937).
- SOLÉ SABARIS, L.: *Los rebordes oriental y meridional de la Meseta: Cordillera Ibérica y Sierra Morena*, en M. DE TERÁN et al. *Geografía General de España*. Ed. Ariel, pp. 74-85 (1978).
- THOMAS, M. F.: *Tropical Geomorphology*. The MacMillan Press, 332 p., London (1974).
- TWIDALE, C. R.: *Granite Landforms*. Elsevier Sc., 371 p., Amsterdam (1982a).
- TWIDALE, C. R.: *Los inselbergs à gradins et leur signification: l'exemple de l'Australie*. Ann de Géographie, núm. 508, pp. 657-678 (1982b).
- TWIDALE, C. R., y CORBIN, M.: *Gnammas*. Rev. Géomorph. Dyn., 14, pp. 1-20 (1963).
- TWIDALE, C. R., y BOURNE, J. A.: *Origin and significance of pifting on granitic rocks*. Z. Geomorph., 20, pp. 405-416 (1976).
- VAUDOUR, J.: *La région de Madrid, altérations, sols et paléosols*. Ed. Ophrys, 390 p. (1979).
- VÁZQUEZ GUZMÁN, F., y FERNÁNDEZ POMPA, F.: *Contribución al conocimiento geológico del suroeste de España en relación con la prospección de depósitos de magnetitas*. Memoria del Inst. Geol. y Min. de España, t. 89 (1976).
- VELASCO ROLDÁN, F.: *Mineralogía y metalogénia de los skarns de Santa Olalla (Huelva)*. Tesis Doctoral (inédita), Universidad del País Vasco (1976).

Recibido: Enero 1983

Sobre el descubrimiento de fosfatos sedimentarios en el Precámbrico Superior de España (*)

Por E. PERCONIG (1), F. VÁZQUEZ GUZMÁN (2), F. VELANDO (1) y F. LEYVA (1)

RESUMEN

El depósito de fosforita, situado cerca de la localidad de Fontanarejo, en la provincia de Ciudad Real, ha sido descubierto recientemente como consecuencia de los trabajos de investigación que se llevan a cabo dentro del Plan Nacional de Abastecimiento de Materias Primas Minerales.

Geológicamente se encuentra en la zona «Centroibérica» del Macizo Hespérico. Los materiales pertenecen al «complejo esquisto grauváquico», situándose el yacimiento de Fontanarejo en la serie de pizarras, areniscas, conglomerados, microconglomerados y calizas estromatolíticas de la parte superior de dicho complejo y asignándosele una edad precámbrica reciente.

En la roca fosfática existen abundantes estructuras organosedimentarias correspondientes al tipo C (oncolito) de Logan et al., 1964. Todos los caracteres sedimentológicos ponen de manifiesto que el origen de los depósitos es el resultado del relleno de paleocanales tidales.

El yacimiento de Fontanarejo tiene una longitud aproximada de 1,5 Km., con potencias variables que pueden llegar a alcanzar los 60 m. La ley varía entre el 20-30 por 100 P₂O₅, y se estiman unas reservas de al menos 2×10⁶ t., estando en proceso de evaluación.

ABSTRACT

As far as phosphate is concerned, Spain happens to be entirely dependent on foreign supplies. In order to meet this challenge, phosphate has been assigned top-ranking priority within the context of the National Commodity Provision Program, and the Spanish Geological and Mining Survey (IGME) asked E. N. ADARO, the government controlled spanish mining and metals company, to carry out an exploration program all over the country. One of the most important projects within the investigation program was the Proterozoic-Cambrian study.

The investigations that have been done showed soon the existence of some levels with a P₂O₅ content higher than usual, and discovered (April 1982) an important phosphatic sedimentary deposit situated near to the village of Fontanarejo, province of Ciudad Real.

Geologically, it is placed in the «Centro Iberica Zone» of the Hesperic massif. The materials belong to the «schist-grey-wackic complex» which consists mostly of pelitic materials in the lower part, followed by greywackes with pelitic and conglomeratic intercalations. Above, there is finally a zone consisting of shale, sandstone, conglomerate, microconglomerate and stromatolitic limestone. The Fontanarejo deposit is placed in this last zone, and its age is supposed to be late Precambrian.

In the phosphatic rock there are abundant organosedimentary structures that correspond with mode C (oncolite) of LOGAN et al., 1964. All the sedimentological characters show that the origin of the deposits result from the filling of tidal paleochannels.

The phosphatic deposit of Fontanarejo has a length of approximately 1,5 km, with variable thickness that reaches 60 m in some place. The grade of the unit ranges between 20 and 30% P₂O₅. It is being evaluated at the moment; today it's estimated at least about 2×10⁶ t.

INTRODUCCION

Las principales explotaciones de fosfatos que han existido en España corresponden a mineralizaciones de carácter filoniano, en relación con granitos hercánicos.

Estas minas estuvieron en actividad desde 1866 a 1956, con una producción global de 1,2×10⁶ tone-

(*) Comunicación presentada en el «Fifth International Field Workshop and Seminar on Phosphorite» — International Geological Correlation Programme, Project 156 — Kunming (China) — Nov. 1982.

(1) Empresa Nacional Adaro de Investigaciones Mineras, S. A., ENADIMSA, Serrano, 116, Madrid-6.

(2) Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Ríos Rosas, 23, Madrid-3.

ladas de mineral, con leyes comprendidas entre el 35 y 80 por 100 de fosfato tricálcico.

En la actualidad España no cuenta con explotaciones mineras de fosfato y su abastecimiento se realiza fundamentalmente a partir de los yacimientos norteafricanos, con la consiguiente repercusión en la balanza de pagos, que en 1982 superó los 100 millones de dólares.

El consumo español de fosfatos se ha mantenido prácticamente inalterable en los últimos cinco años, situándose alrededor de $2,9 \times 10^6$ toneladas anuales. Sin embargo, las previsiones de demanda estiman que, en 1987, alcanzará unos $4,1 \times 10^6$ toneladas.

La Administración española, a través de los planes de investigación del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y mediante diversos incentivos a la iniciativa privada, potencia las actividades encaminadas a la localización de formaciones adecuadas para albergar fosfatos, con el fin de reducir la actual dependencia del exterior.

En este sentido son de destacar las recientes acciones emprendidas conjuntamente por el sector

privado y el estatal, fundamentalmente la investigación de antiguas minas filonianas de apatito. Por su parte, el IGME ha enfocado sus últimas investigaciones exclusivamente hacia la posible existencia de fosfatos sedimentarios. Así, en 1978, realizó la investigación de las pizarras, con nódulos fosfatados, del Tournaisiense, en la Cordillera Cantábrica y en los Pirineos, con resultado negativo. Más recientemente, en 1980, inició, con la colaboración de la Empresa Nacional Adaro de Investigaciones Mineras, S. A. (ENADIMSA), una investigación sistemática tendente a localizar posibles yacimientos sedimentarios en España.

Fundándose en los caracteres geológicos regionales (estratigrafía, tectónica, sedimentología) y en un análisis crítico de las manifestaciones de fosfatos conocidas en el territorio español, a la luz de las actuales hipótesis fosfatogenéticas, se determinaron varios temas de investigación.

Entre los temas seleccionados, se consideró prioritario el de la exploración de los terrenos del Proterozoico y del Cámbrico.

En la última década, el Cámbrico y el Precámbrico han sido objeto de una gran atención, a

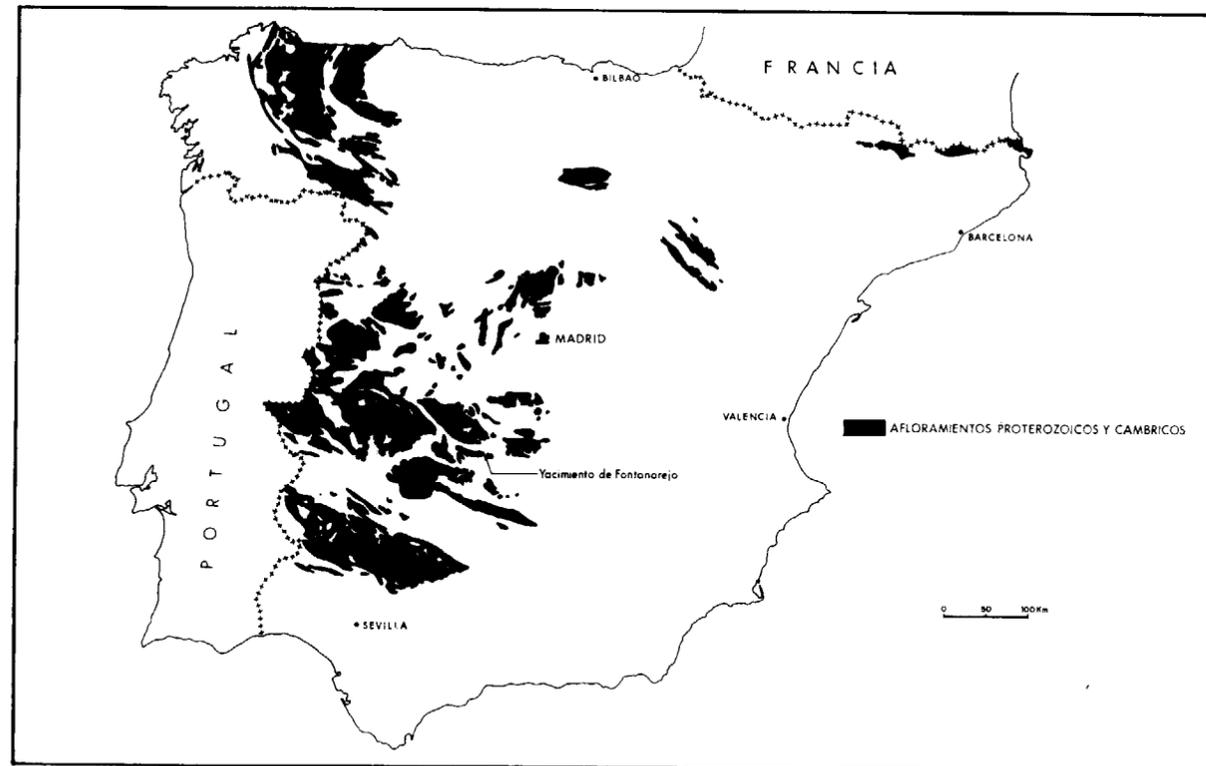


FIGURA 1

escala mundial, llegándose al descubrimiento de importantes yacimientos y a la constitución, en el seno del IGCP, en 1977, del proyecto 156 para las fosforitas de tal edad, cuyos recursos conocidos se estiman, según NOTHOLT (1979), en más de 10^{10} toneladas de rocas fosfáticas, con un contenido en P_2O_5 superior al 4 por 100.

Los terrenos del Proterozoico y del Cámbrico presentan, en España, facies y condiciones paleogeográficas muy similares a las de ciertas importantes provincias fosfatogenéticas. También la paleolatitud (poco superior a los 30° Sur) se sitúa dentro de límites que la teoría considera favorables. Se reúnen así varias condiciones que pueden justificar una exploración de fosfatos, la cual, además, tiene la ventaja de realizarse sobre una notable extensión geográfica de terrenos proterozoicos y cámbricos, que ocupan una superficie de cerca de 60.000 km², correspondiente a casi la octava parte del territorio nacional (fig. 1).

La investigación se ha beneficiado de recientes publicaciones debidas a iniciativas del Proyecto 156 del IGCP, de la asistencia a seminarios y visitas a campo organizadas por el citado proyecto, así como del intercambio de información con los expertos internacionales que componen sus grupos de trabajo, entre los cuales nos es grato recordar a R. P. SHELDON y A. J. E. NOTHOLT.

La conjunción de los trabajos de cartografía geológica (Proyecto MAGNA), realizados por el IGME, con los que lleva a cabo el equipo investigador de fosfatos, ha propiciado el descubrimiento de fosforitas en terrenos del Precámbrico Superior cerca de Fontanarejo (Ciudad Real), cuya importancia económica está siendo evaluada en la actualidad.

ESTRATIGRAFIA Y TECTONICA REGIONAL

Para situar de manera conveniente los depósitos de Fontanarejo en el contexto estratigráfico y tectónico creemos oportuna una breve descripción de los caracteres geológicos fundamentales de la región, en la cual pueden distinguirse terrenos precámbricos, cámbricos, ordovícicos y plio-cuaternarios (fig. 2).

Existen notables divergencias entre los autores que han tratado la estratigrafía del anteordovícico

en el área considerada, por lo cual la descripción siguiente, hecha en términos muy amplios, intentará resumir y aunar los distintos criterios hasta donde fuera posible. Estas discrepancias se fundamentan en la monotonía litológica (es muy difícil definir niveles guía), mala calidad de afloramientos y excesiva complicación tectónica.

Precámbrico-Cámbrico Inferior

Los materiales atribuidos a esta edad se engloban en el denominado complejo *esquisto-grauváquico*, caracterizado litológicamente por el predominio de pizarras y grauvacas, con intercalaciones detríticas de mayor tamaño (microconglomerados, conglomerados, brechas) y niveles carbonatados.

Se extiende por las provincias de Ciudad Real, Toledo, Salamanca, Cáceres, Avila y Badajoz, y en Portugal, en la región situada al N del río Tajo.

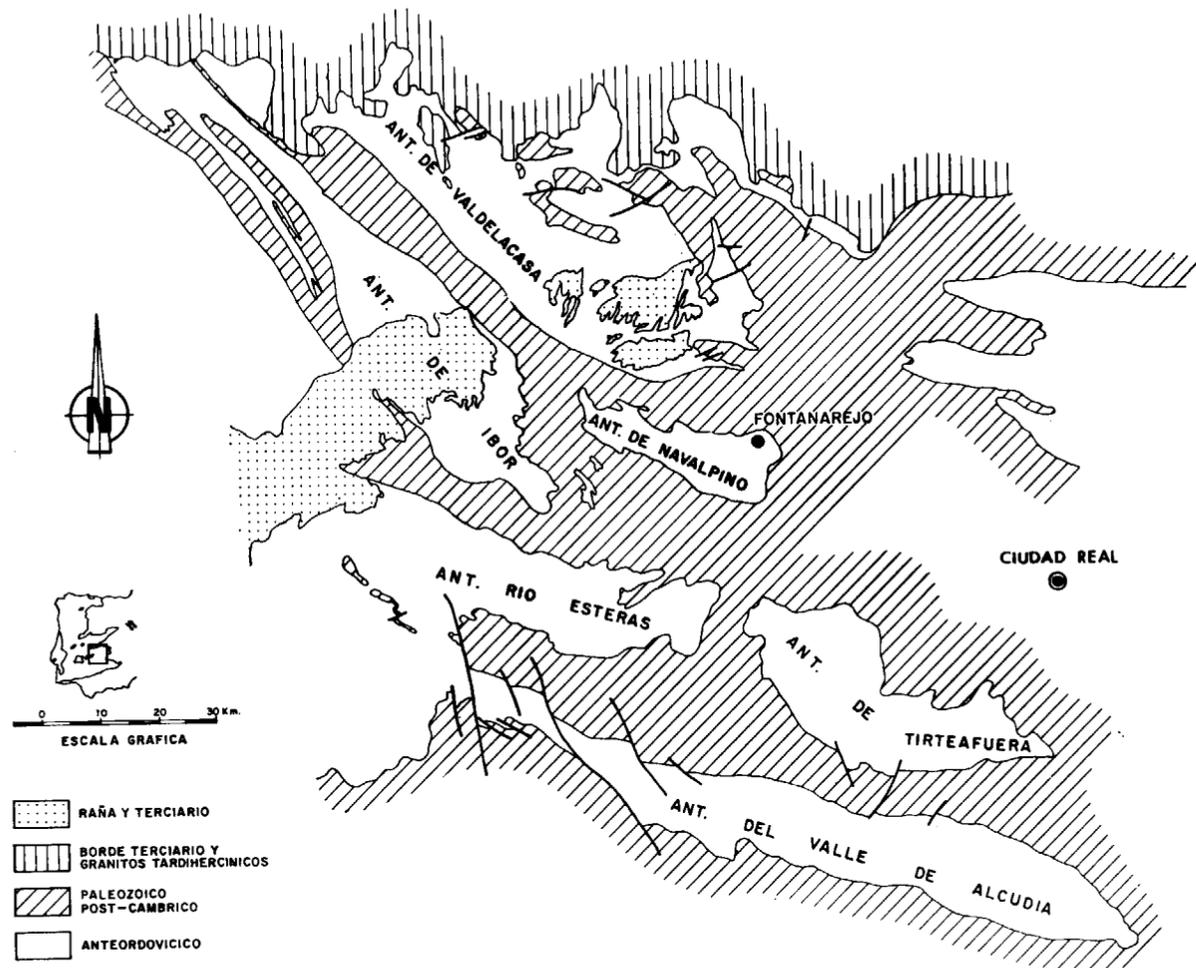
La denominación original de *complejo xisto-grauváquico anteordovícico* se debe a CARRINGTON DA COSTA (1950); posteriormente ha sido objeto de numerosos trabajos por TEIXEIRA (1954, 1969, 1979, etc.), el cual lo describe como una formación de tipo «flysch», en la que alternan pizarras y grauvacas.

LOTZE (1956) bautizó con el nombre de serie de Valdelacasa el tramo inferior del «complejo», eminentemente pizarroso, mientras al superior, donde además de pizarras y grauvacas se encuentran conglomerados y niveles carbonatados, lo llamó *series de tránsito*, situándolo en el Precámbrico Superior-Cámbrico Inferior.

Más recientemente, HERRANZ, SAN JOSÉ y VILAS (1977), en el *complejo esquisto-grauváquico* de los Montes de Toledo occidentales, distinguen un conjunto de unos 5.000 m. de espesor, formado por pizarras y grauvacas con niveles de cantos flotantes, más abundantes hacia el techo de la formación, identificando un nivel-guía carbonatado (calizas de Villarta). La serie estratigráfica que proponen puede resumirse en los tramos siguientes (fig. 3):

Pizarras del Guadiana

Conjunto turbidítico en el que predominan las pizarras arcillosas, con lentejones esporádicos de «pebbly-mudstones». Potencia visible, 800 m.



Esquema geológico-estructural regional. Basado en el esquema de F. MORENO (1977), simplificado. FIGURA 2

Calizas de Villarta

Serie carbonatada con un espesor máximo de 250 m.

Pizarras del Torilejo

Conjunto turbidítico con un espesor aproximado de 2.000 m. Sobre este nivel se deposita discordantemente un tramo olistostrómico con cantos calcáreos (*Nivel de Fuentes*), al que siguen niveles turbidíticos (*Pizarras de Pusa*) que pasan gradualmente a la unidad superior (*Areniscas del Azorejo*) formada por materiales detríticos de plataforma (areniscas y cuarcitas) con

icnofósiles *Astropolithon*, *Scolicia*, etc., atribuíbles al Cámbrico Inferior.

VEGAS, ROIZ y MORENO (1977) coinciden en líneas generales con la estratigrafía de la escuela de LOTZE. Distinguen un tramo basal con una potencia aproximada de 1.200 m., fundamentalmente pelítico, al que siguen más de 1.500 m. de la serie; todo ello representa facies turbidíticas. Sobre estos dos tramos descansa un conjunto heterogéneo (niveles pizarrosos, cuarcitas, fanglomerados, olistostromas, lechos de calizas, conglomerados calcáreos y en ocasiones conglome-

	Según Moreno y otros	Según Herranz, San José y Vilas
ORDOVICICO INFERIOR	TRAMO SUPERIOR	Cuarcitas, Pizarras, areniscas, cuarcitas y conglomerados
CAMBRICO INFERIOR	FORMACION CORTIJOS DE MALAGON FORMACION SOLERAS	Pelitas, cuarcitas y areniscas (400 m)
	FORMACION NAVALUCILLOS	Serie carbonatada (140 m)
	FORMACION CEVALOS	Grauvacas, pizarras y cuarcitas (> 500 m)
CAMBR. INF. PRE-CAMBRICO	SERIES DE TRANSITO	Pizarras conglomerados calizas y cuarcitas (~1700 m)
		TRAMO SUPERIOR: Grauvacas y pelitas (1500 m) TRAMO INFERIOR: Fundamentalmente pelítico (1000 m)
	CAPAS DE VALDELACASA	PIZARRAS DEL TORILEJO CALIZAS DE VILLARTA PIZARRAS DEL GUADIANA

Sucesión y correlación de niveles en el Precámbrico, Cámbrico y Ordovícico. FIGURA 3

rados feldespáticos) al cual denominan *Serie de Tránsito*, asimilándola al tramo del mismo nombre de LOTZE. Esta formación en algunas zonas está representada por sedimentos de plataforma.

Cámbrico-Ordovícico

En la estructura anticlinal de Valdelacasa, situada inmediatamente al N del anticlinal, de Navalpino, donde se encuentra el yacimiento de Fontanarejo, debajo de la cuarcita de facies armoricana han podido distinguirse (MORENO et al, 1976) tres conjuntos, que de techo a muro son:

- Tramo superior; muestra facies de aguas someras, litológicamente comprende areniscas, pizarras, conglomerados y cuarcitas. Predominan los tramos rojizos y violetas. Los icnofósiles permiten atribuirle una edad Tremadoc Medio a Superior.
- Descansa este conjunto detrítico por medio de una discordancia angular, sobre una serie pelítica, con un tramo intermedio de calizas intramareales de 350 metros de potencia, que muestran una fauna de Arqueociátidos de edad Cámbrico Inferior alto.
- El conjunto más bajo está formado por are-

niscas cuarcíticas (550 metros) de plataforma, en las cuales se han localizado icnofósiles que permiten atribuir este nivel al Cámbrico Inferior.

Las pizarras situadas debajo del tramo anterior (Pizarras de Pusa) representan facies turbidíticas.

Esta disposición, en la cual el Tremadoc se superpone en discordancia sobre el Cámbrico Inferior, sería válida para la zona situada al N de una línea trazada a lo largo del eje del anticlinal de Valdelacasa, mientras que al S no existen afloramientos del Cámbrico Inferior, disponiéndose el Tremadoc discordante sobre distintos tramos precámbricos. Esta falta de serie es debida a la intensa erosión ligada a la fase Sárdica.

Plio-Cuaternario

Las formaciones recientes tienen una gran extensión en la zona del yacimiento de fosfato, donde recubren los niveles oncolíticos e impiden reconocer su continuidad.

Se trata de depósitos fanglomeráticos (rañas o glaciés de erosión) originados en épocas de precipitaciones intensas y esporádicas.

Fases Tectónicas

Estructuralmente la zona se caracteriza por la alternancia de amplios anticlinales de núcleo precámbrico, separadas por estrechos sinclinales donde llegan a aflorar materiales devónicos (figura 2).

Las distintas estructuras son consecuencia de una serie de fases tectónicas cuyas características se resumen a continuación.

Actualmente el criterio más generalizado desecha la existencia de deformaciones importantes durante el Precámbrico. Las primeras estructuras habría que atribuirles a los movimientos sárdicos, que originaron pliegues de gran longitud de onda, flancos verticales y crestas más o menos planas, correspondientes a una tectónica distensiva y de adaptación al zócalo. La existencia de estructuras de plegamiento sárdico da lugar a fuertes discordancias angulares entre el Ordovícico Inferior y las series infrayacentes.

La deformación más importante hay que atribuirla a la orogenia hercínica, que se manifiesta en los Montes de Toledo occidentales (MORENO, 1977) por cuatro fases tectónicas principales y una serie de deformaciones tardías, que originan estructuras poco penetrativas.

Las fases 1.^a y 4.^a no afectaron a toda el área considerada, y concretamente en el anticlinal de Navalpino no se encuentran rasgos estructurales que evidencien su existencia.

Así pues, en el citado anticlinal, pueden considerarse dos fases tectónicas, equivalentes a la 2.^a y 3.^a de las descritas por MORENO:

- a) Fase hercínica principal.
- b) Fase transversal.

La fase hercínica principal es responsable de los grandes pliegues de dirección NO-SE y generadora de una esquistosidad, plano axial de los mismos.

La esquistosidad es de tipo «strain-slip» y afecta casi únicamente a los materiales pelíticos de forma algo espaciada.

La fase transversal origina, al igual que la anterior, pliegues a todas las escalas: las direcciones de los ejes oscilan entre N-S y N 20° O.

Asociada a ella se encuentra una esquistosidad de fractura poco desarrollada.

La interferencia de ambas fases origina estructuras de domos y cubetas, característica de dos sistemas de pliegues ortogonales con planos axiales verticales.

El metamorfismo regional relacionado con la orogenia hercínica es de bajo grado, no sobrepasando la anquizona.

Los materiales del anticlinal de Navalpino se encuentran afectados por numerosas e importantes fallas de desgarre dextrógiras, cuya dirección varía entre N 40° y N 60° E, posteriores a los pliegues.

Hay otro sistema importante, de dirección N 100-120° E.

EL YACIMIENTO DE FONTANAREJO

Situación y rasgos geográficos

El yacimiento de fosfatos de Fontanarejo, está situado al NO de la provincia de Ciudad Real,

en la Hoja núm. 735 del Mapa Topográfico Nacional, a escala 1:50.000, más concretamente al O de la misma y a unos 2 km. del pueblo de Fontanarejo, que da nombre a la Hoja.

El área donde se ubica pertenece a la comarca de los Montes, muy deprimida económicamente y escasamente poblada.

El clima es el típico de la meseta, con grandes contrastes térmicos.

El paisaje se caracteriza por tres elementos fundamentales:

- a) Las extensas planicies correspondientes a la penillanura de erosión y depósito finiterciaria, y las superficies de menor extensión que corresponden a las «Rañas».
- b) Las zonas de relieves alomados ocupados por los materiales precámbricos, fundamentalmente pelíticos, fácilmente meteorizables, y en los que destacan morfológicamente los tramos más duros (areniscas, grauvacas en estratos potentes y conglomerados) que forman alineaciones fácilmente distinguibles en la fotografía aérea.
- c) Zonas de relieves abruptos, en cuya morfología adquieren especial importancia la litología (cuarcitas y areniscas), meteorización física y estructura geológica a la cual se ha amoldado en múltiples ocasiones la red fluvial actual.

Características geológicas

En el área próxima al yacimiento afloran terrenos precámbricos, ordovícicos y depósitos recientes (rañas de edad pliocuaternaria, coluviones, aluviones y eluviones).

La observación es buena en el caso de los terrenos ordovícicos, no así en los precámbricos, donde los afloramientos son escasos debido al recubrimiento de los depósitos recientes.

La descripción realizada anteriormente de los terrenos posteriores al precámbrico, sigue siendo válida, por lo cual en este capítulo nos ceñiremos exclusivamente al Precámbrico de Fontanarejo.

De acuerdo con la columna adjunta (fig. 4), pueden distinguirse los tramos siguientes:

por cuarzo en un 70 por 100, fragmentos de roca (cuarcitas, chert) 5 por 100; como accesorios contienen circón y mica blanca. La matriz (18 por 100) es sericítica con algo de glauconita, y el cemento (5 por 100) es silíceo. Se trata de areniscas claramente bimodales; la moda principal en arena media-gruesa, y la secundaria en fina y muy fina. Muestran sedimentación alternante y gradada.

Tramo I b

Constituido por aproximadamente 250 m. (la potencia es muy difícil de establecer dado que la estratificación está borrada por la esquistosidad) de argilolitas, fangolitas, limolitas y pizarras con canales de gravas areno-lutíticas o de arenas con grava. Se observan capas de litarenita a sublitarénita con glauconita abundante. Como puede verse en la columna adjunta hay un neto predominio de materiales pelíticos.

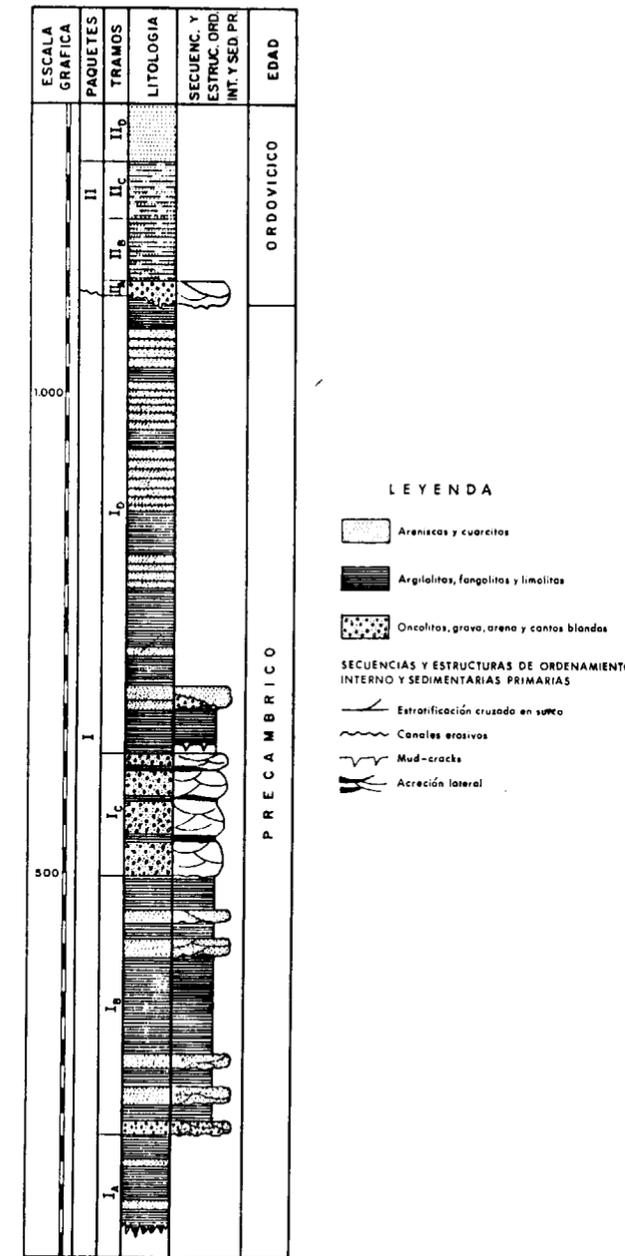
Tramo I c

Nivel de 130 metros aproximadamente, representa un complejo de canales con oncolitos y grava-arena de cuarzo en proporción variable. Pueden observarse secuencias grano crecientes y decrecientes, clastos centimétricos en los «lag» y superficies rubefactadas. Existen grandes acuíferos laterales.

Los materiales de los canales son fosforitas constituidas por oncoformas orientadas de tamaño variable (entre 2 y 15 mm.), y granos de cuarzo en pequeña proporción (tamaño entre 2 y 5 mm.). Cemento ferruginoso. Algunas muestras contienen grandes clastos blandos fosfatizados que a veces engloban oncolitos (lámina V, figuras 1-5; lámina VII, figs. 1 y 2).

Los canales están separados por tramos lutíticos.

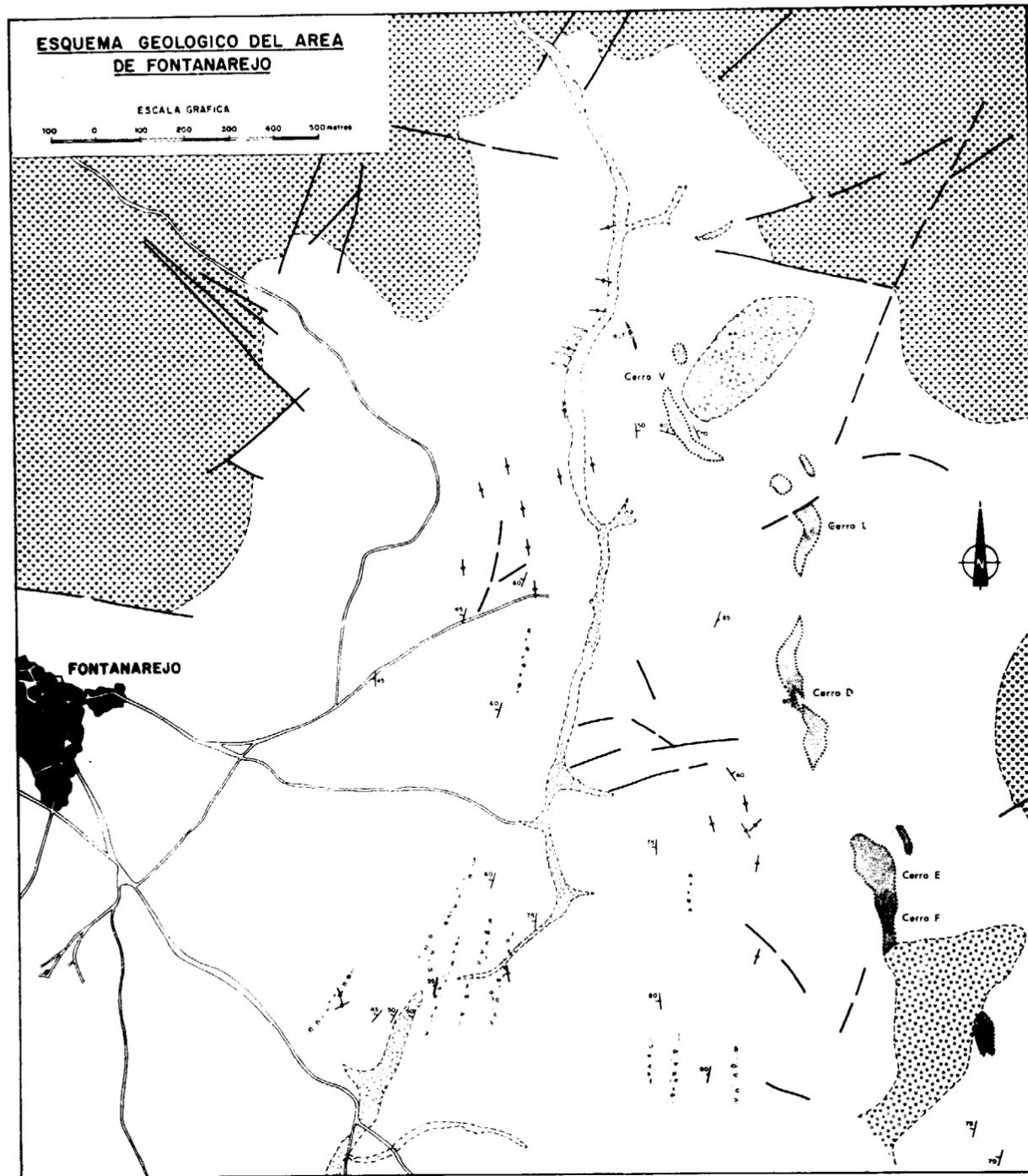
Las características sedimentológicas observadas: Estratificación cruzada (lámina III, figs. 2 y 3) estratificación cruzada en artesa o surco producida por la traslación de «megaripples», la presencia de abundantes cantos blandos en los «lag», la morfología de estos depósitos así como las conclusiones de la petrografía de los sedimentos, nos llevan a considerar que su génesis es debida al relleno de canales mareales. La migración de



Columna estratigráfica del área de Fontanarejo. FIGURA 4

Tramo I a

Comprende 250 metros en los cuales el muro no es visible. Está constituido fundamentalmente por argilolitas limosas y limolitas de color verde grisáceo, en ocasiones fuertemente silicificadas, con intercalaciones de niveles de areniscas o microconglomerados. Las intercalaciones están formadas



ESQUEMA GEOLOGICO DEL AREA DE FONTANAREJO

ESCALA GRAFICA

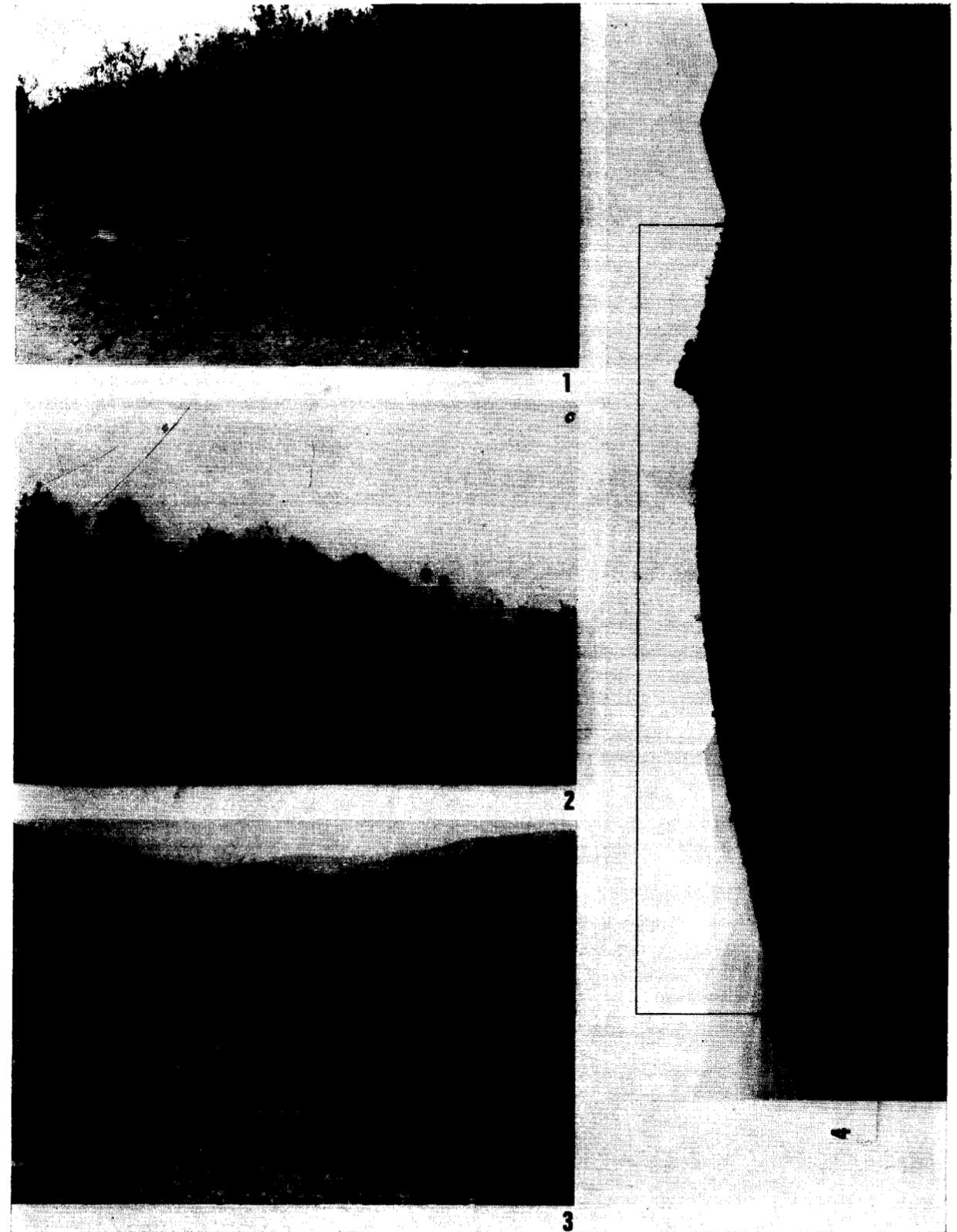
100 0 100 200 300 400 500 metros

LEYENDA

- | | | | |
|--|--|--|--|
| | Alluviones | | Contacto normal o concordante |
| | Raña (PLIO-QUATERNARIO) | | Contacto por discordancia |
| | Conglomerados, areniscas y cuarcitas (ORDOVICIC) | | Falla |
| | Microconglomerados y cuarcitas | | Falla supuesta o deducida |
| | Niveles oncolíticos | | Dirección y cantidad de buzamiento de la estratificación |
| | Niveles pelíticos | | Dirección y cantidad de buzamiento de la esquistosidad |
| | PRECAMBRICO | | Esquistosidad subvertical |

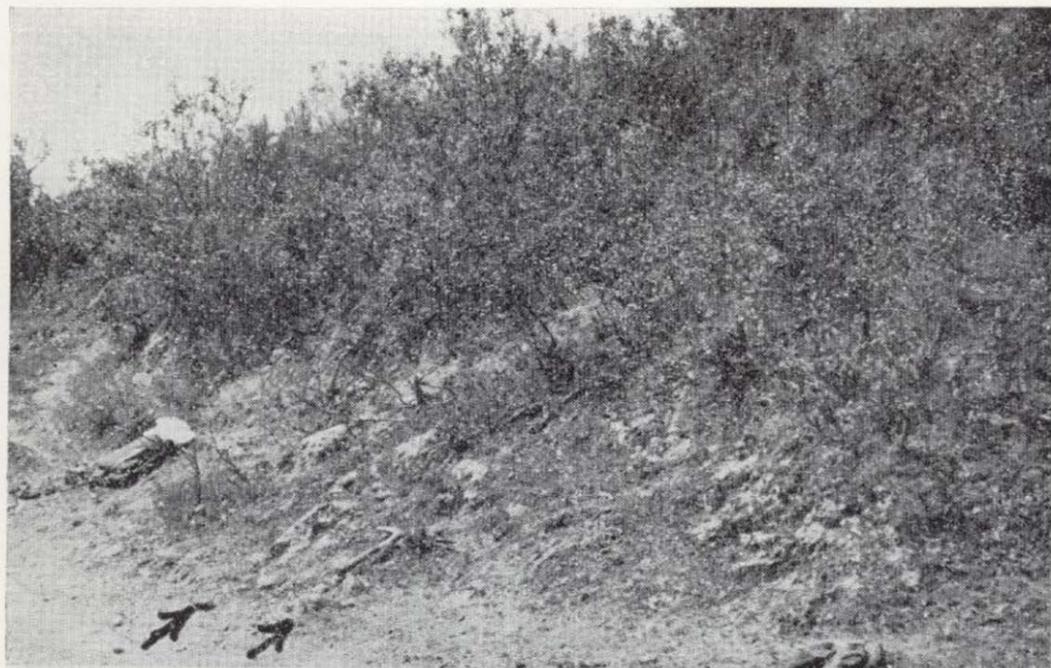
FIGURA 5

LAMINA I



- 1 - Arroyo del Puerto.—Pizarras con niveles de fosforitas algales de 15 a 50 cm. de espesor.
- 2 - Cerro D.—Microconglomerados con abundantes granos de cuarzo, muy persistentes a la erosión.
- 3 - Cerro D.—Afloramiento de fosforitas (20-24 por 100 de P_2O_5) fácilmente meteorizables.
- 4 - Cerro E.—Lado meridional. Corte transversal de una capa de fosforitas con un espesor superior a los 60 m. El buzamiento de las capas es de 70° hacia el Este (20-24 por 100 de P_2O_5).

LAMINA I



1



2



3



4

- 1 - *Arroyo del Puerto*.—Pizarras con niveles de fosforitas algales de 15 a 50 cm. de espesor.
- 2 - *Cerro D*.—Microconglomerados con abundantes granos de cuarzo, muy persistentes a la erosión.
- 3 - *Cerro D*.—Afloramiento de fosforitas (20-24 por 100 de P_2O_5) fácilmente meteorizables.
- 4 - *Cerro E*.—Lado meridional. Corte transversal de una capa de fosforitas con un espesor superior a los 60 m. El buzamiento de las capas es de 70° hacia el Este (20-24 por 100 de P_2O_5).

LAMINA II



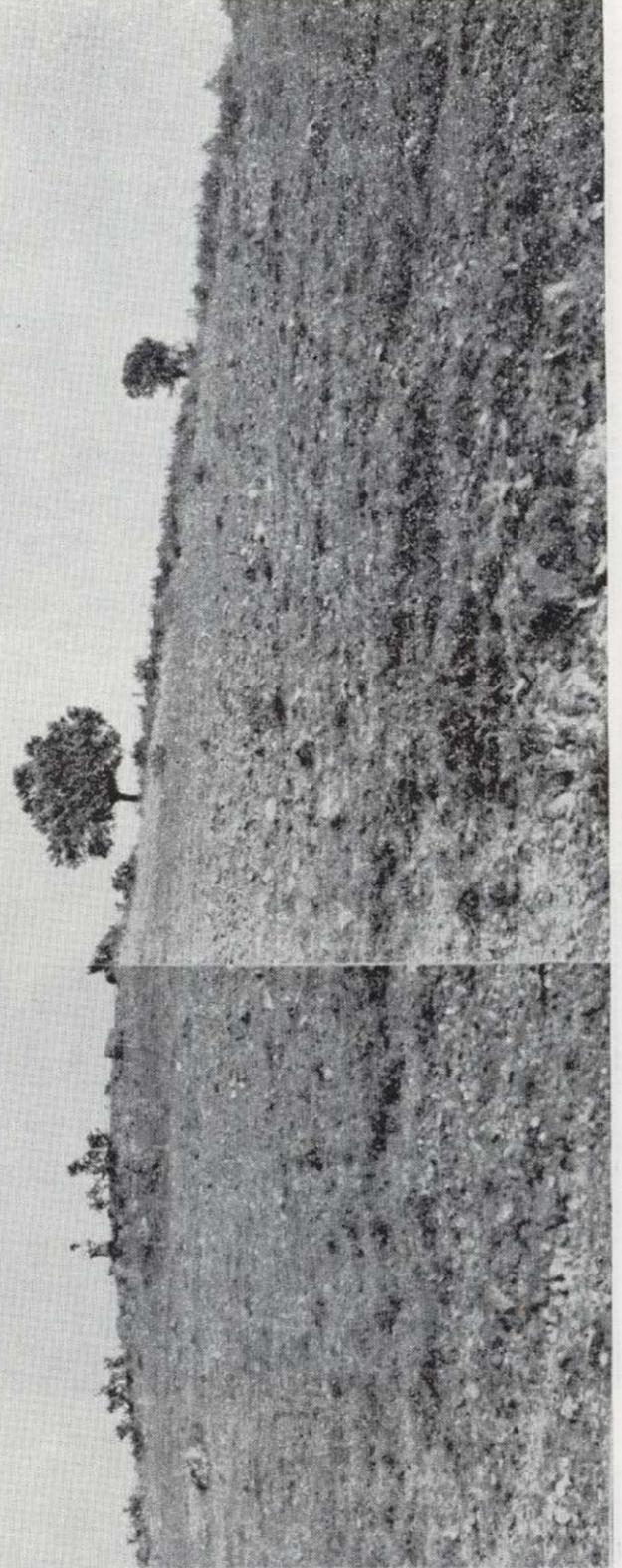
1



2



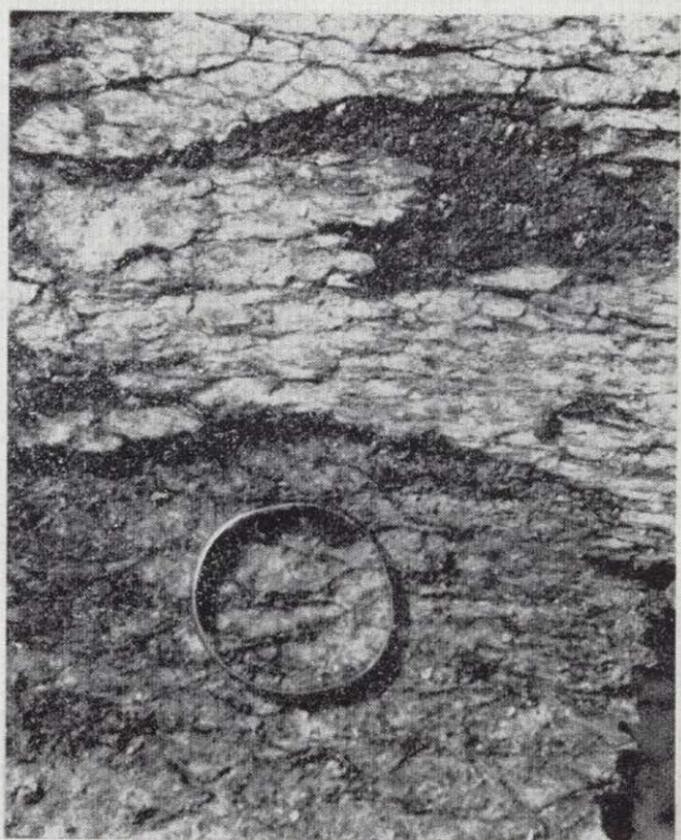
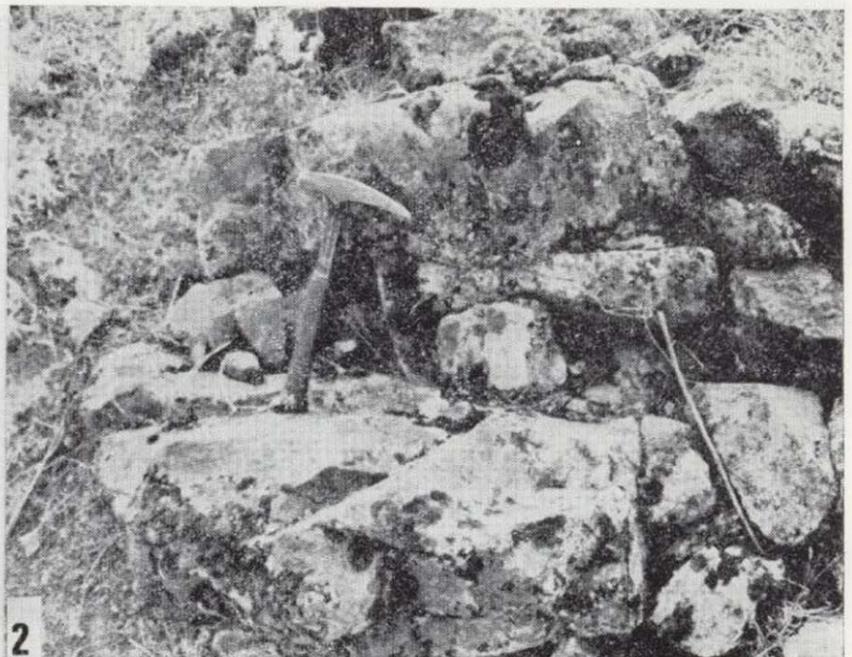
3



4

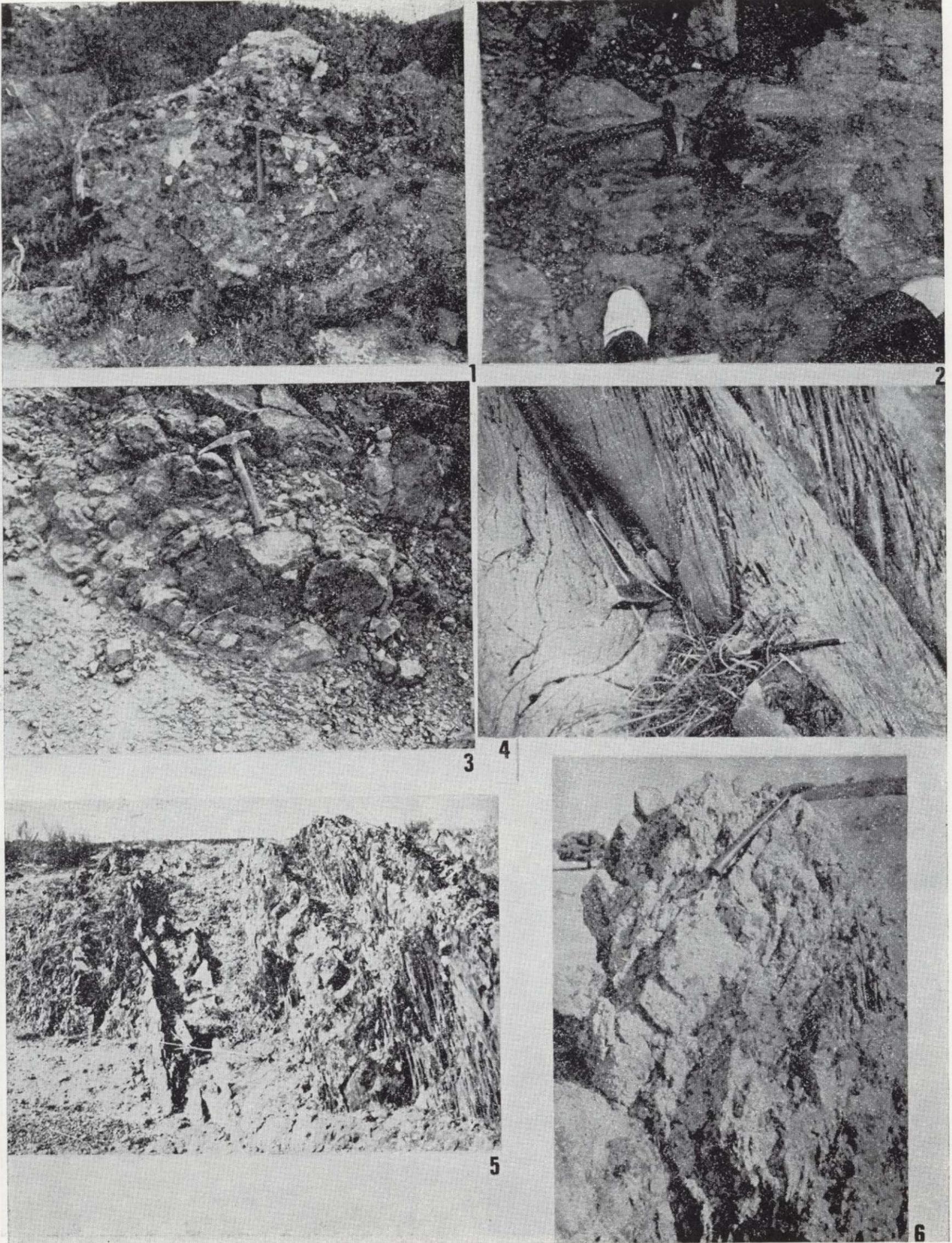
- 1 - Cerro D.—Detalle de un nivel de fosforitas meteorizadas con contenido de P_2O_5 superior al 30 por 100.
- 2 - Cerro E.—Afloramiento de fosforitas, > de 24 por 100 de P_2O_5 .
- 3 - Cerro E.—En primer término, las fosforitas, y al fondo, la serie del Tremadoc-Arenig, de areniscas rojas ferruginosas y pizarras, coronada por la cuarcita armoricana.
- 4 - Cerro F.—Ladera norte. Afloramiento de fosforitas parcialmente ocultas por la raña. 24 a 30 por 100 de P_2O_5 .

VI ANUARIO
LAMINA III



- 1 - Detalle de afloramiento de fosforita oncolítica.
- 2 - Estratificación cruzada tabular.
- 3 - Estratificación cruzada en surco. Secuencias granodecrescientes.
- 4 - Vista de perfil de un conjunto de paleosuelos. Las argilolitas subyacentes tienen colores de rubefacción.
- 5 y 6 - Detalles de grietas de desecación.

LAMINA IV

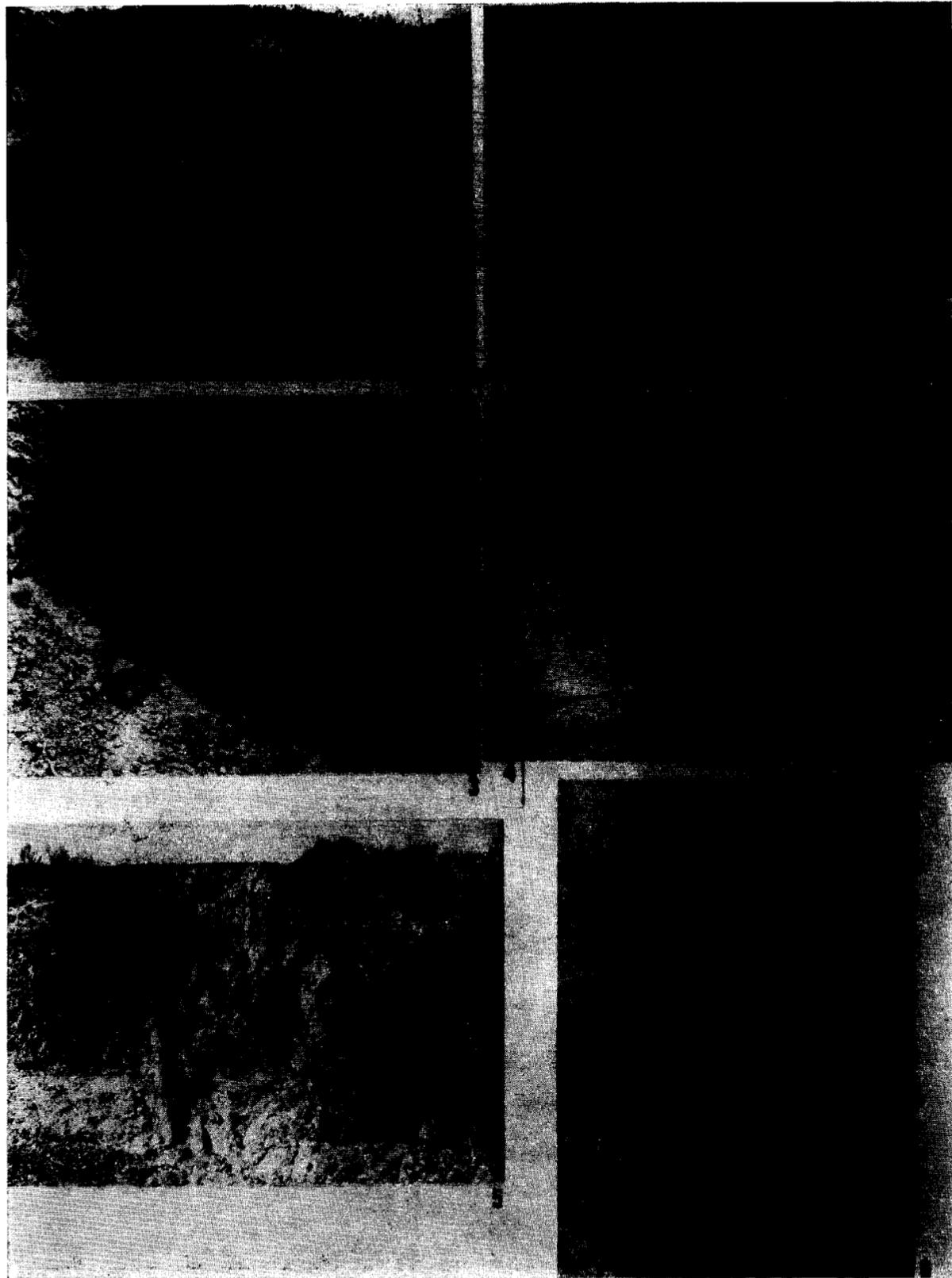


1 - Canal métrico con estratificación cruzada en surco.

2 - Canales pequeños con estratificación cruzada de muy bajo ángulo.

3 - Zona de implantación de un paleocanal.

4, 5 y 6 - Relación estratificación-esquistosidad. La estratificación es visible en las capas con detríticos de mayor tamaño. La esquistosidad se manifiesta claramente en los tramos pelíticos.



- 1 - Canal métrico con estratificación cruzada en surco.
 2 - Canales pequeños con estratificación cruzada de muy bajo ángulo.
 3 - Zona de implantación de un paleocanal.
 4, 5 y 6 - Relación estratificación-esquistosidad. La estratificación es visible en las capas con detriticos de mayor tamaño. La esquistosidad se manifiesta claramente en los tramos pelíticos.



estos canales y el consiguiente trabajamiento de los depósitos sub e intermareales, producen las estructuras de acreción lateral y variaciones petrográficas observadas.

De igual forma la migración lateral y vertical de este sistema y con él el desplazamiento geográfico de los diferentes subambientes asociados, origina la actual estructuración dentro del tramo.

Tramo I d

Incluye 450 m. aproximadamente de lutitas, fangolitas y limolitas con intercalaciones de areniscas y cuarcitas. A 50 m. del muro hay complejo de canales decamétricos con rápidos acuíferos laterales. En algunos «set» se ha observado la presencia de oncolitos, y en los niveles basales formados por lutitas de colores claros (blancas y rosadas) destaca la presencia de grietas de desecación («mud» cracks) (lámina III, figs. 4-6).

En el aspecto estructural, únicamente caben hacer algunas precisiones y añadir algunos datos a lo reseñado anteriormente en el capítulo de Tectónica.

Los materiales ordovícicos plegados y fracturados dibujan claramente el cierre oriental del anticlinorio de Navalpino; igualmente las direcciones y buzamientos señalados en el esquema geológico del área de Fontanarejo (fig. 5), muestran esta disposición estructural.

Las dos fases hercínicas descritas anteriormente, afectan a todos los materiales de la zona. La fase principal origina pliegues de plano axial vertical, no muy apretadas, con fuertes buzamientos de los flancos y una esquistosidad de fractura que afecta principalmente a las rocas pelíticas; la segunda fase afecta a las estructuras anteriores, originándose figuras de interferencia propias de la intersección de pliegues con ejes perpendiculares. Igualmente la esquistosidad aparece plegada en algunos puntos.

Los materiales precámbricos están en gran parte recubiertos por depósitos recientes, siendo muy escasos los afloramientos. Su gran plasticidad y la intensa erosión que han sufrido, hace difícil encontrar estructuras de plegamiento, las cuales han podido deducirse teniendo en cuenta la relación estratificación-esquistosidad, y los escasos criterios de polaridad disponibles.

Estudios microscópicos

(Láminas VI y VII)

En las secciones delgadas del paquete fosfático pueden distinguirse los siguientes componentes:

- a) Oncolitos.
- b) Clastos.
- c) Terrígenos.
- d) Matriz.
- e) Cementos (singenéticos y diagenéticos).
- f) Elementos resultantes de procesos postdiagenéticos.

1) La mayoría de las muestras son un conjunto homogéneo, con leves variaciones en cuanto a los porcentajes de los componentes, pero claramente homologables en cuanto a procesos genéticos y diagenéticos. Se pueden distinguir:

a) Oncolitos.

Un componente principal correspondiente a estructuras organo-sedimentarias de tipo oncolítico. Su porcentaje, si bien variable, se sitúa entre 55-70 por 100 del total del sedimento.

Pueden reconocerse diversos tipos de oncoforma:

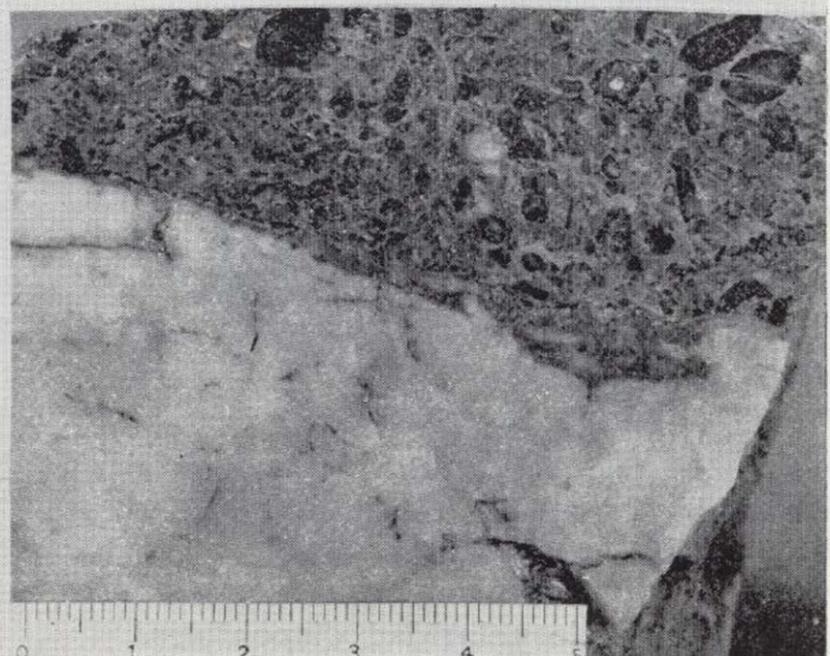
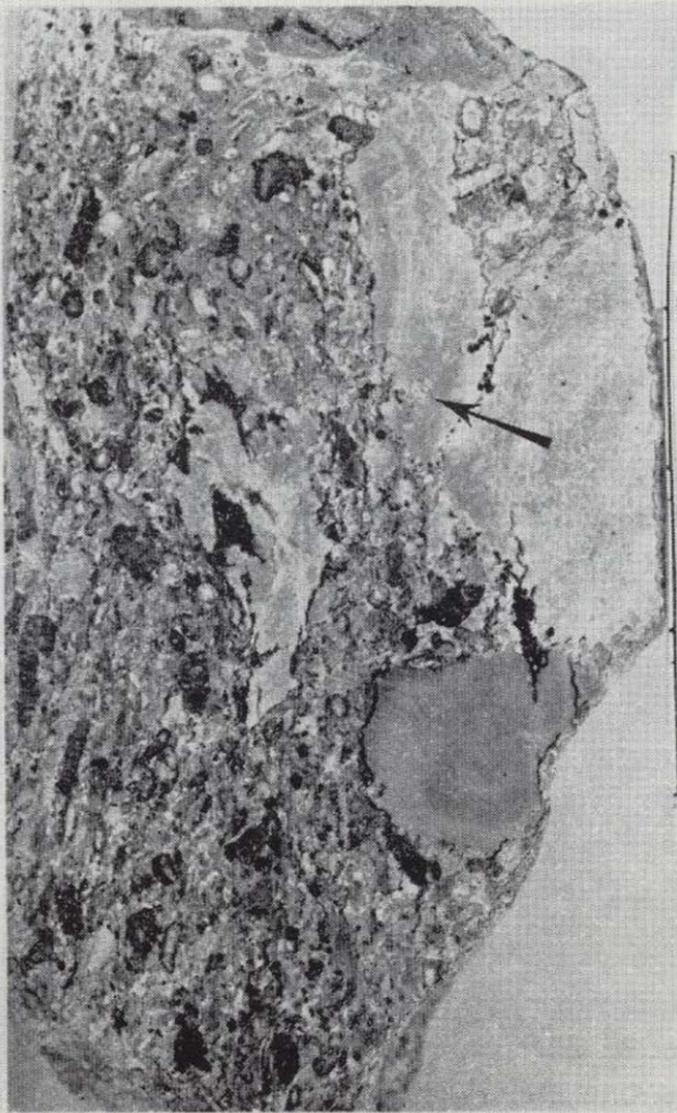
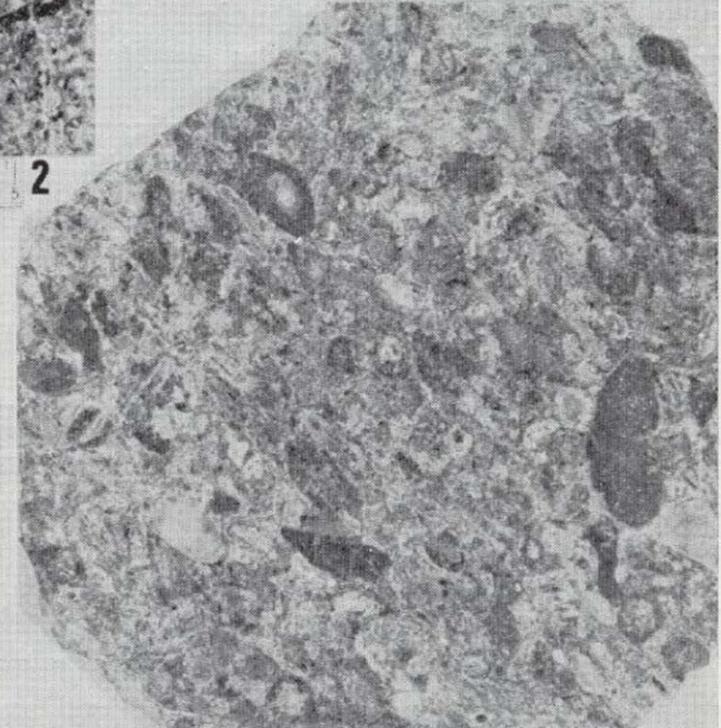
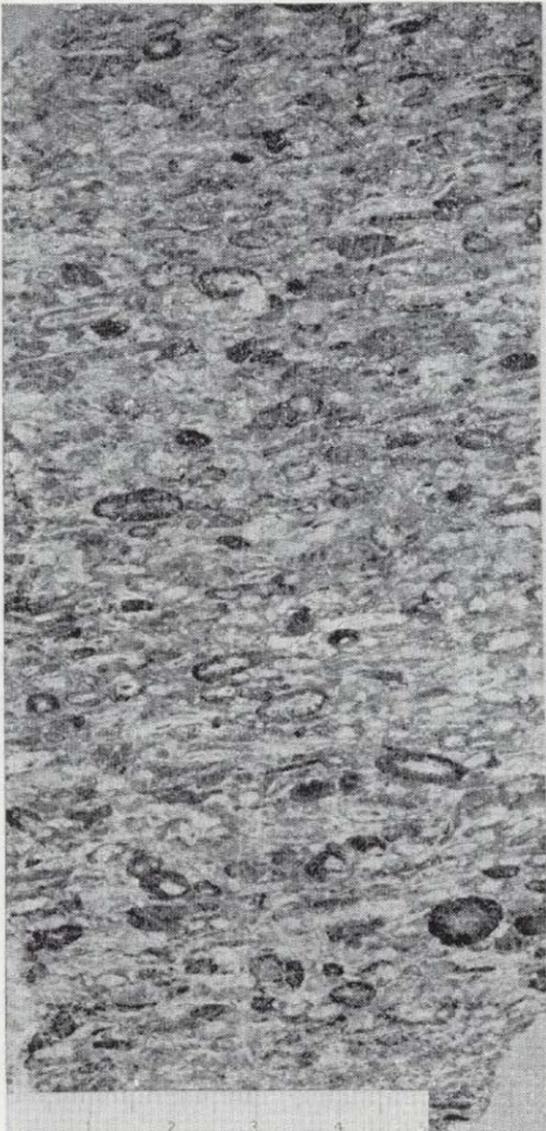
- De constitución eminentemente microcristalina.
- De constitución peletiforme.
- De constitución criptalgal.
- De constitución algal (formas variadas).
- Otras construcciones biogénicas.

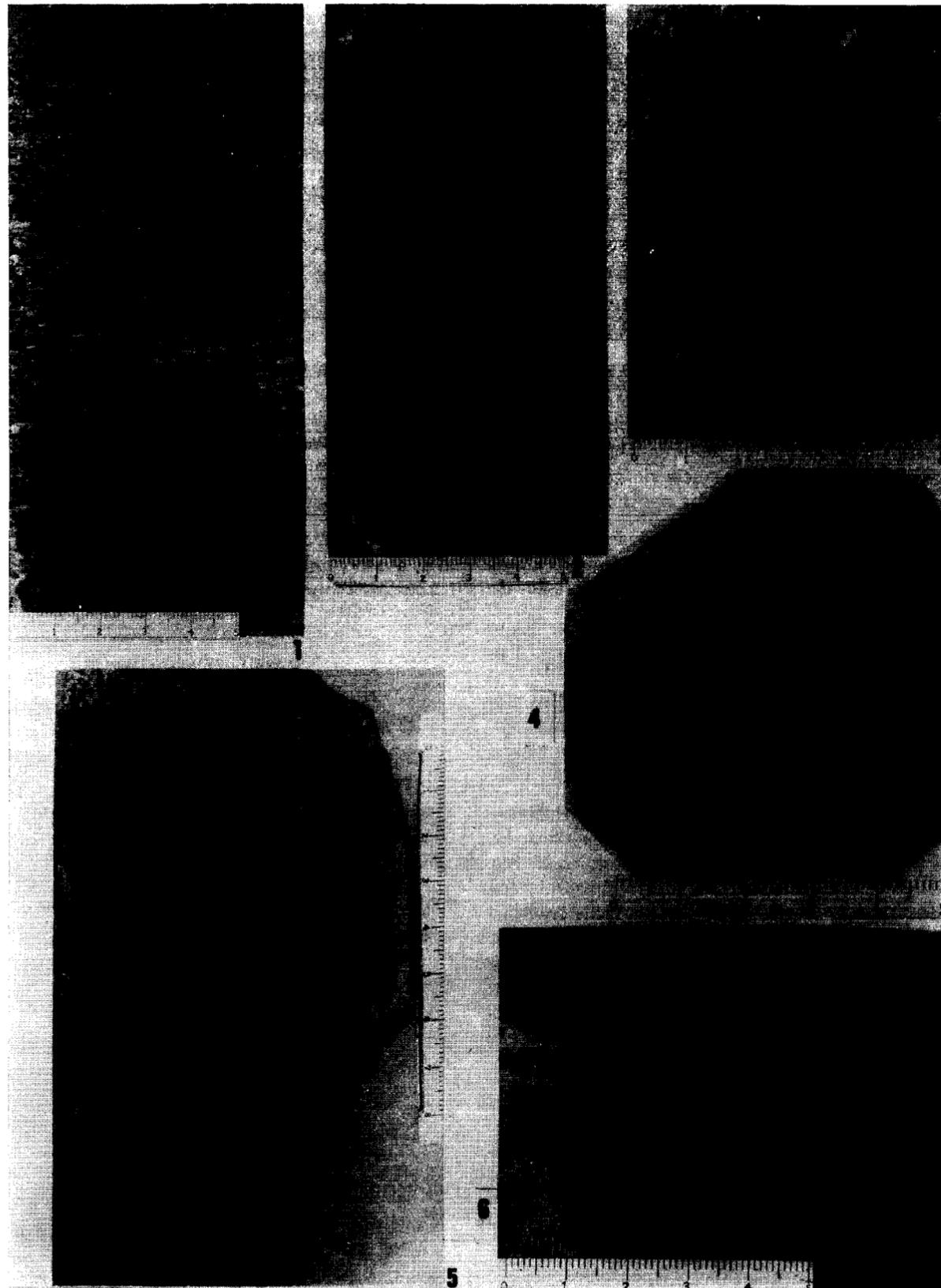
Hay numerosos ejemplos de oncolitos en los que puede observarse una zonación, desde el núcleo hacia las partes externas, de distintas envolturas en el orden descrito.

Asimismo, se observa que es normal en los oncolitos de núcleo microcristalino o peletiforme la silicificación de dicho núcleo, en tanto que las zonas criptalgales, en sus diversas variantes, están fosfatizadas en apatito. En todo caso, el porcentaje mayoritario corresponde a masas de colofana en los núcleos microcristalinos de los oncolitos.

Otro tipo de fosfato es el que aparece como cemento. Parece claro que en los procesos diagenéticos parte del fosfato ha sido movilizado susti-

LAMINA IV
LAMINA V





tuyendo parcialmente a la matriz y/o a otro tipo de cemento (silíceo, ferruginoso).

b) *Clastos.*

Otro componente importante son los *clastos*. En proporción variable, nunca superior a un 7 por 100, y de tamaño entre arena gruesa o grava, aunque normalmente bien calibrados con el resto de los terrígenos. Habitualmente se trata de limolitas fosfatizadas, de redondeadas a subredondeadas y aspecto de cantos blandos. Hay cantos donde puede observarse cómo algunos de estos clastos engloban oncolitos, lo que nos hace deducir que se incorporaron al sedimento en períodos de litificación muy temprana; lo cual explicaría, igualmente, su total fosfatización en los procesos diagenéticos de movilización de geles fosfáticos.

c) *Terrígenos.*

Aunque por su origen, los clastos tendríamos que incluirlos en este apartado, han sido considerados como elementos aparte, al encontrarse fosfatizados.

Esencialmente, los terrígenos son granos de cuarzo-cuarcita en proporción variable del 5-15 por 100, subredondeados a subangulosos y de tamaño arena grueso-grava. Su calibrado es igualmente bueno. Son muy raros los granos de heterometría marcada, comparando tamaño de oncoformas y terrígenos. Son muy escasos los minerales pesados, existen algunos pequeños granos de circón.

d) *Matriz.*

Es de tipo sericítico y su proporción varía del

5-10 por 100. En algunos casos puede observarse que ha sido sustituida parcialmente por masas de fosfato, movilizadas en los procesos diagenéticos.

e) *Cemento.*

Es esencialmente silíceo, en proporciones entre el 1-15 por 100, parcialmente reemplazado por la movilización diagenética del fosfato y, a su vez, reemplazando en una primera etapa el fosfato microcristalino de algunos núcleos de oncolitos.

Es posible que existiese en algunas capas, tramos o canales, otro tipo de cementos minoritarios, especialmente ferruginoso, pero la diagénesis profunda y los procesos diagenéticos posteriores han concentrado estos iones, y su aspecto genético primitivo es difícilmente identificable.

f) *Elementos resultantes de procesos postdiagenéticos.*

Hay una proporción variable de menas metálicas, si bien es normalmente importante, entre el 3 al 10 por 100. Estas menas metálicas, en su mayor parte, parecen proceder de procesos postdiagenéticos de origen hidrotermal, donde van ligados a calcedonia plumosa.

2) Un grupo de muestras, poco representado y correspondiente a intercalaciones microconglomeráticas y a paleocanales situados en paquetes estratigráficamente superiores al tramo fosfatado principal, presenta acusadas diferencias petrográficas con las muestras anteriormente descritas.

Se trata de areniscas (cuarzarenitas) con tamaños de arena gruesa-grava y de subredondeados a subangulosos. La matriz es muy escasa (4 a 6 por 100) y el cemento mixto, silíceo-fosfatado inferior al 10 por 100.

LAMINA V

- 1 - *Muestra EH1.*—Roca fosfática constituida por oncoformas orientadas, de distinto tamaño (entre 2 y 15 mm.) y distinta estructura interna. Cemento ferruginoso, y porcentaje muy pequeño de granos de cuarzo (entre 2 y 5 mm.). 30 por 100 de P_2O_5 .
- 2 - *Muestra SN.*—Roca fosfática constituida por oncoformas entre 1 y 3 mm. y abundantes granos homométricos de cuarzo. Pequeños clastos ferrificados. 25 por 100 de P_2O_5 .
- 3 - *Muestra EH2.*—Roca fosfática constituida por grandes oncoformas y porcentaje aproximado del 10 por 100 de granos de cuarzo tamaño grava. Hay numerosos clastos ferrificados. 26 por 100 de P_2O_5 .
- 4 - *Muestra EH5.*—Roca fosfática de composición igual a la EH2, en la que puede observarse la disolución de parte de su cemento y/o matriz por la circulación de aguas superficiales. 28 por 100 de P_2O_5 .
- 5 - *Muestra EH4.*—Roca fosfática con grandes clastos (cantos blandos), también fosfatizados. Puede observarse que los clastos blandos engloban, a veces, oncoformas (flecha). Contenido en P_2O_5 en las oncoformas y matriz, 25 por 100; en los clastos, de 1 a 24 por 100.
- 6 - *Muestra EH3.*—Roca fosfática cortada por un dique de cuarzo de origen hidrotermal. 24 por 100 de P_2O_5 .

Escala en centímetros.

LAMINA VI



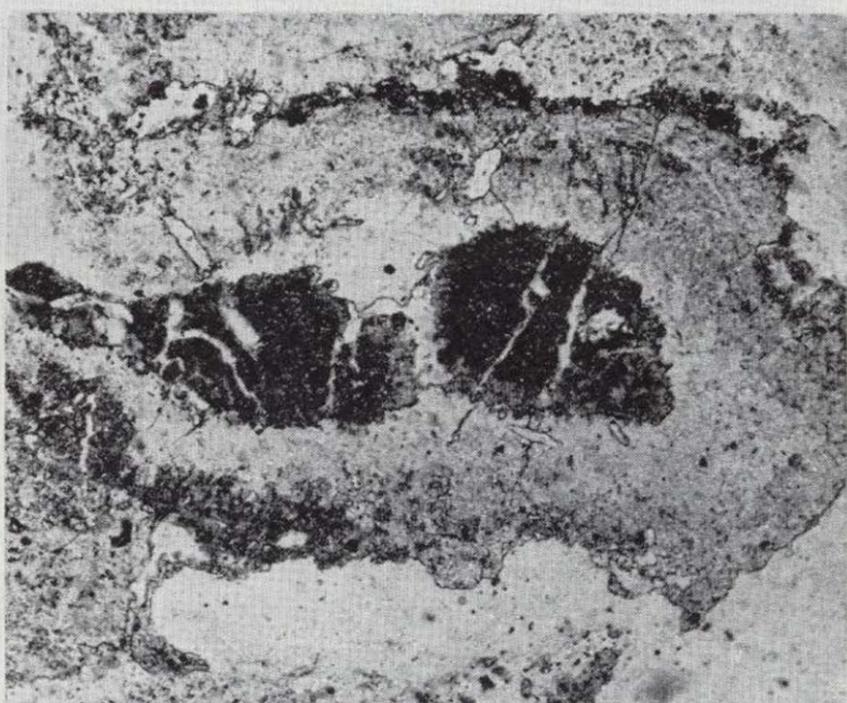
1



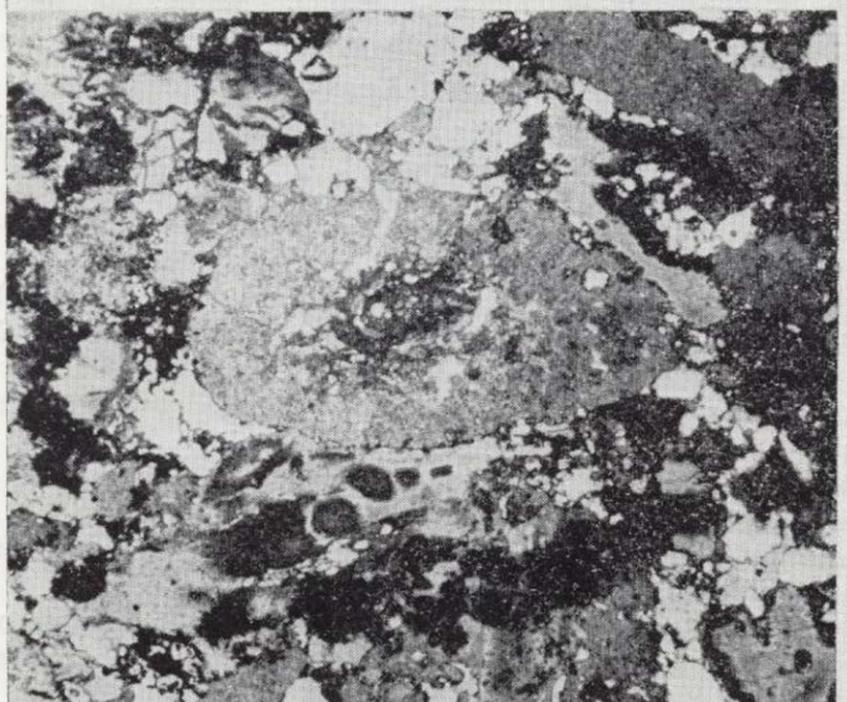
2



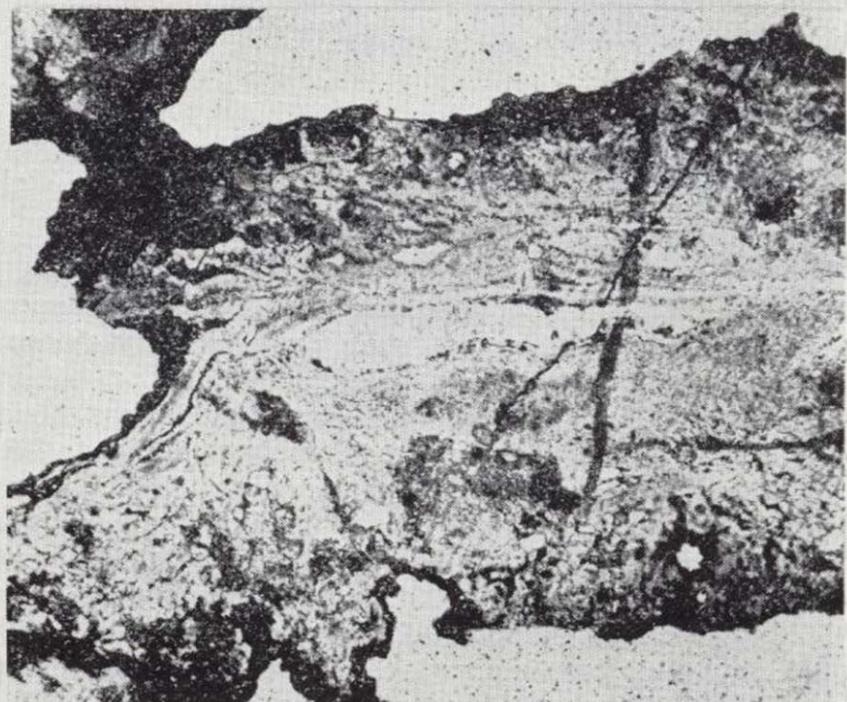
3



4



5



6



3) Otras muestras corresponden finalmente a sedimentos intermedios entre las cuarzenitas anteriores y el conjunto principal, descrito al principio. Su composición es de un 50 a 55 por 100 de terrígenos, esencialmente cuarzo-cuarcita, de tamaño arena media a grava, escasos oncolitos y clastos fosfatados, y un porcentaje elevado de matriz y cemento, la primera de tipo sericítico y el segundo de tipo mixto silíceo-fosfático. Las mineralizaciones debidas a procesos hidrotermales son importantes, con acumulación de menas metálicas y calcedonia plumosa.

En conclusión, los sedimentos estudiados, con las salvedades mencionadas, parecen ser el resultado de la interacción de procesos biogénicos, en especial ligados a construcciones algales (criptalgal, algal-mat, etc.) con materiales aportados por corrientes de alta energía. El calibrado y redondeamiento en comparación de terrígenos y oncolitos, así como la casi ausencia de matriz, nos lleva a considerar que se trata de un sedimento bien lavado y maduro. Todas estas características, así como la composición y estructura de los oncolitos serían encuadrables en un medio de depósito intramareal a submareal, con posibles recurrencias supramareales.

Edad

Ya hemos dicho que el yacimiento de Fontanarejo se sitúa en la parte superior del complejo esquisto-grauváquico, debajo de la transgresión ordovícica del Tremadoc. La intensa erosión ligada a la fase sárdica, sería la responsable de que localmente falte el Cámbrico, o gran parte del mismo, como parece ser el caso del anticlinal de Navalpino, donde se encuentra el yacimiento.

Más al norte del anticlinal de Navalpino, en el anticlinorio de Valdelacasa, BRASIER, PEREJÓN y SAN JOSÉ (1979) citan la presencia de *Planolites* en el nivel olistostrómico de Fuentes, cerca del

río Uso. Más arriba, en las «pizarras de Pusa», clasifican *Beltanelloides sorichevae* y *Chuarina circularis*, formas aparentemente limitadas al Rifeense y Vendicense. Pero debajo de los niveles de *Chuarina* encuentran también trazas de artrópodos que atribuyen a *Monomorphichnus lineatus*, especie que no se cita en terrenos más antiguos del Cámbrico Inferior, así como trazas de otros icnofósiles del Cámbrico Inferior (*Phycodes* y *Trep-tichnus*). Esta coexistencia les lleva a plantearse el dilema de si se trata de una eventual sobrevivencia de fósiles precámbricos en el Cámbrico, o de una preexistencia, ya en el Precámbrico, de fósiles considerados exclusivos del Cámbrico.

En un nivel estratigráficamente muy próximo al tramo fosfatizado de Fontanarejo, en el «Olistostroma de Casas del Membrillar» (que se supone aproximadamente coetáneo del «olistostroma de Fuentes»), T. PALACIOS cita la presencia de microfósiles de pared orgánica, entre ellos *Bavlinella favoelata*, especie dominante en el período glacial Valanginiense, de gran extensión mundial, con una distribución bioestratigráfica Véndico Inferior parte alta-Cámbrico Inferior. La presencia contemporánea de *Trachysphaeridium laufeldi* induce a T. PALACIOS a asignar al olistostroma una edad similar al Véndico Inferior alto-Véndico Medio. (Trabajo en curso de publicación en la Revista Española de Micropaleontología.)

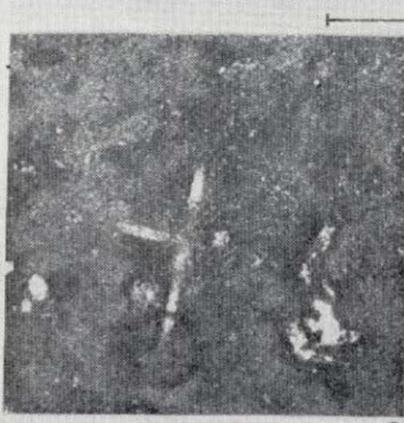
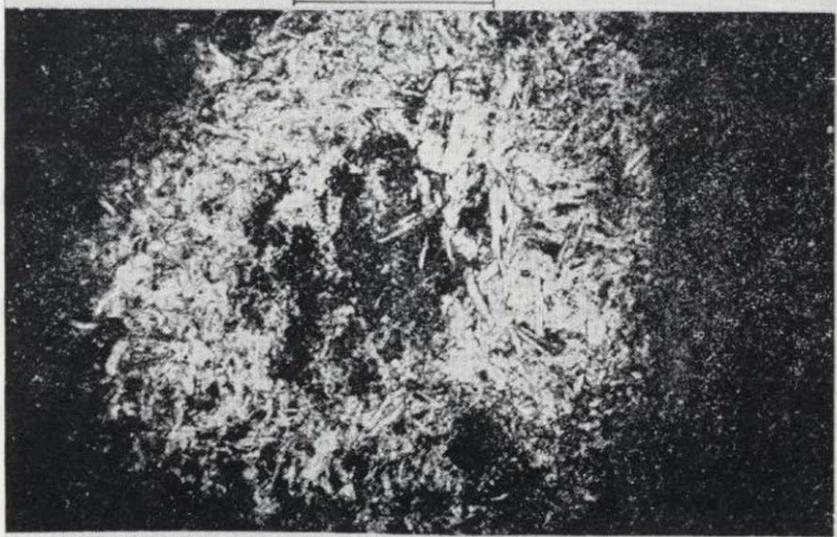
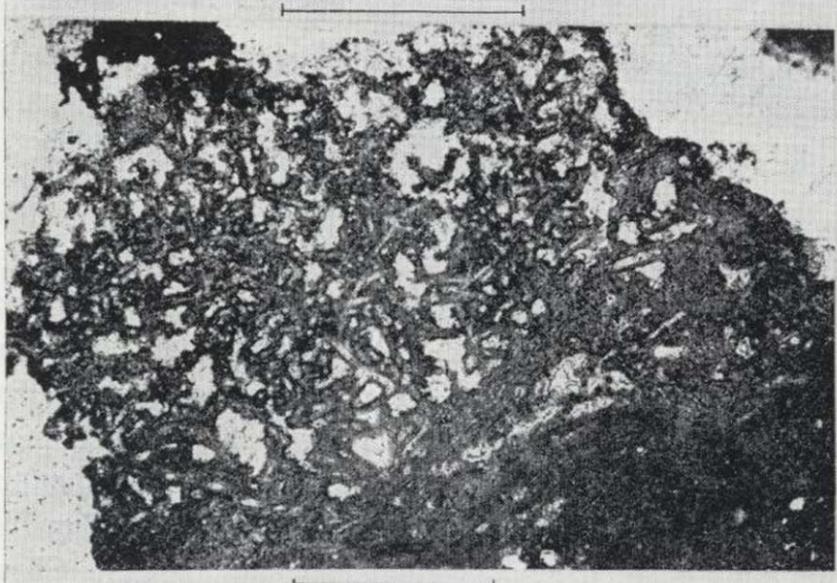
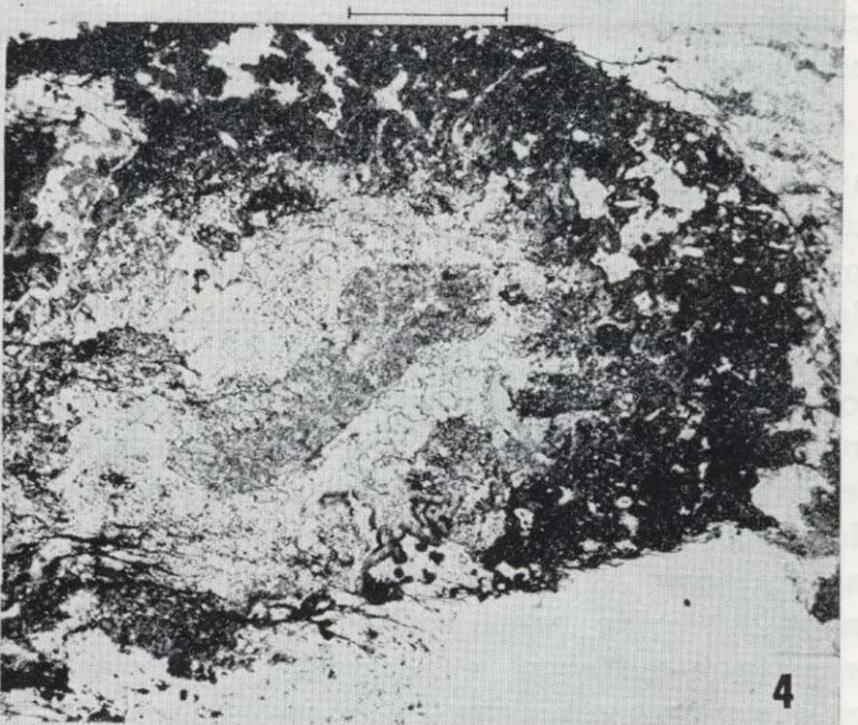
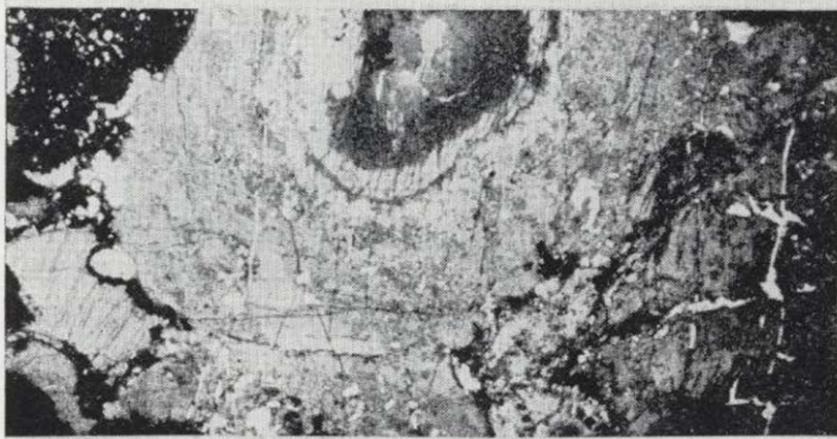
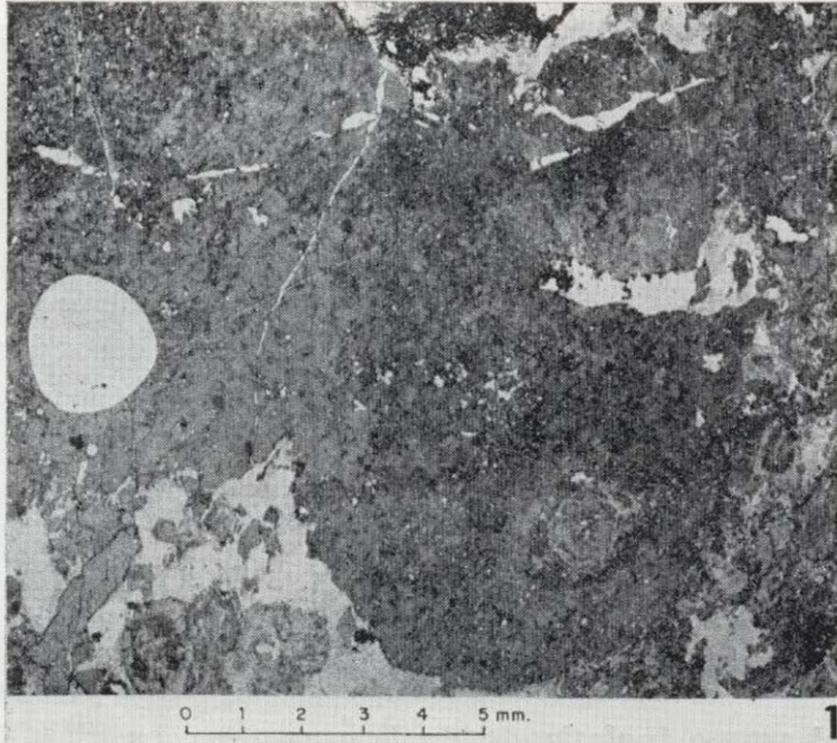
En algunas láminas transparentes de la formación fosfática de Fontanarejo, que T. PALACIOS tuvo la amabilidad de observar, se nota la presencia de abundantes esferomorfos de composición orgánica: uno de ellos guarda gran similitud con *Bavlinella favoelata* (SHEPELEVA, 1962), mientras que el resto tiene un color oscuro que impide reconocer sus rasgos morfológicos. También se observan algas cianofíceas del orden Chroococcales, que en ocasión ocupan el interior de estructuras oncolíticas, y formas filamentosas que

LAMINA VI

- 1 - Muestra CE 3.—Oncoforma con núcleo de aspecto peletiforme, debido a colonias de algas cianofíceas, y envueltas externas de tipo criptalgal.
- 2 - Muestra CE 4.—Oncoformas con núcleo criptalgal y envuelta algal de estructura más compleja.
- 3 - Muestra Calicata VH.—Oncoforma con núcleo microcristalino originado por colonias de algas cianofíceas silicificadas.
- 4 - Muestra EH 6 bis.—Oncoforma con núcleo algal de aspecto peletiforme y zona externa criptalgal.
- 5 - Muestra Calicata VH.—Oncoforma con núcleo detrítico (zona central oscura) fosfatizada en colofana. Los puntos blancos son granos de cuarzo tamaño limo.
- 6 - Muestra CV 2.—Detalle de estructuras algales y criptalgales complejas.

La barra corresponde a 0,5 milímetros.

LAMINA VII



pertenerían al orden Oscillatoriales (GOLUBIC, 1976; BOUREAU y DARS, 1979).

Al Sur, en las Hojas geológicas de Valdemanco del Esteras y de Abenojar, en niveles que podrían corresponder estratigráficamente a los de Fontanarejo, se han encontrado restos vegetales del Grupo *Vendotaenida*, del Vendiente Superior.

En la Hoja de Sevilleja de la Jara, en niveles aparentemente más bajos del «nivel de Fuentes», correspondientes a las pizarras, grauvacas y areniscas de la llamada «serie de Valdelacasa», se citan los acritarcos siguientes: *Bavlinella faveolata*, *Pterospermopsimorpha*, *Protosphaeridium*, *Leiosphaeridia*, *Trachisphaeridium*, I. cf. *lamnariitium*, *Uniporata*, *Farosphaeridium*, que, según los autores de la Hoja, indicarían un Rifeense Superior-Vendiente, si se excluye el género *Uniporata*, que es del Tommotiense en la plataforma siberiana.

En la misma Hoja, a techo del «nivel de Fuentes», en las «pizarras de Pusa», se clasifican vegetales como *Beltanelloides sorichevae*, especie típica del Vendiente de la URSS, *Planolites* y *Phycodespedum* entre los icnofósiles, y abundantes acritarcos representados por *Polytorama*, *Bavlinella faveolata*, *Protosphaeridium*, *Pterospermopsimorpha*, *Kildinella sinica*, *Leiosphaeridia*, indicativos del Vendiente Superior, según los autores de la Hoja.

Durante el simposio que tuvo lugar en Londres el 11 de mayo de 1982 («Chronology of Geological Record»), se discutieron las dificultades de una precisa definición de la base del Cámbrico, y se ratificó la decisión del Grupo de Trabajo del límite Precámbrico-Cámbrico de la Unión Internacional de Ciencias Geológicas y del Proyecto 29 del Programa de Correlaciones Geológicas Internacionales, de colocar el límite, desde el punto

de vista estratigráfico, cerca de la primera aparición de asociaciones fósiles de tipo Tommotiense (EPISODES, vol. 1982, núm. 2).

También en cuanto a la edad absoluta, la base del Cámbrico ha sido datada hace poco indirectamente por medio de rocas del basamento anteriores a la transgresión marina del principio del Cámbrico, en cinco localidades de Inglaterra, Francia, Marruecos y Sinaí. La coherencia de los resultados lleva a la conclusión de que la base de este Sistema no puede ser más antigua de 540 m.a. (G. S. ODIN, 1982).

Muy recientemente, P. CLOUD y M. GLAESSNER (Science, 27, agosto, 1982) han propuesto formalmente una importante modificación de la escala geológica, extendiendo el Fanerozoico a terrenos precámbricos, hasta los depósitos que suceden a la última glaciación del Proterozoico, donde ya se encuentran restos de animales pluricelulares (Metazoos) y sus trazas fósiles. Para tal período de tiempo han introducido el nuevo término *Ediacariense*, cuyo estratotipo se encuentra en Australia (EPISODES, vol. 1982, núm. 3).

Entre los otros términos estratigráficos actualmente en uso, los autores mencionados opinan que sólo el Vendiente puede merecer consideración, con la salvedad de que es costumbre generalizada incluir en él los depósitos de origen glacial del Proterozoico Superior, que CLOUD y GLAESSNER ponen debajo del Ediacariense.

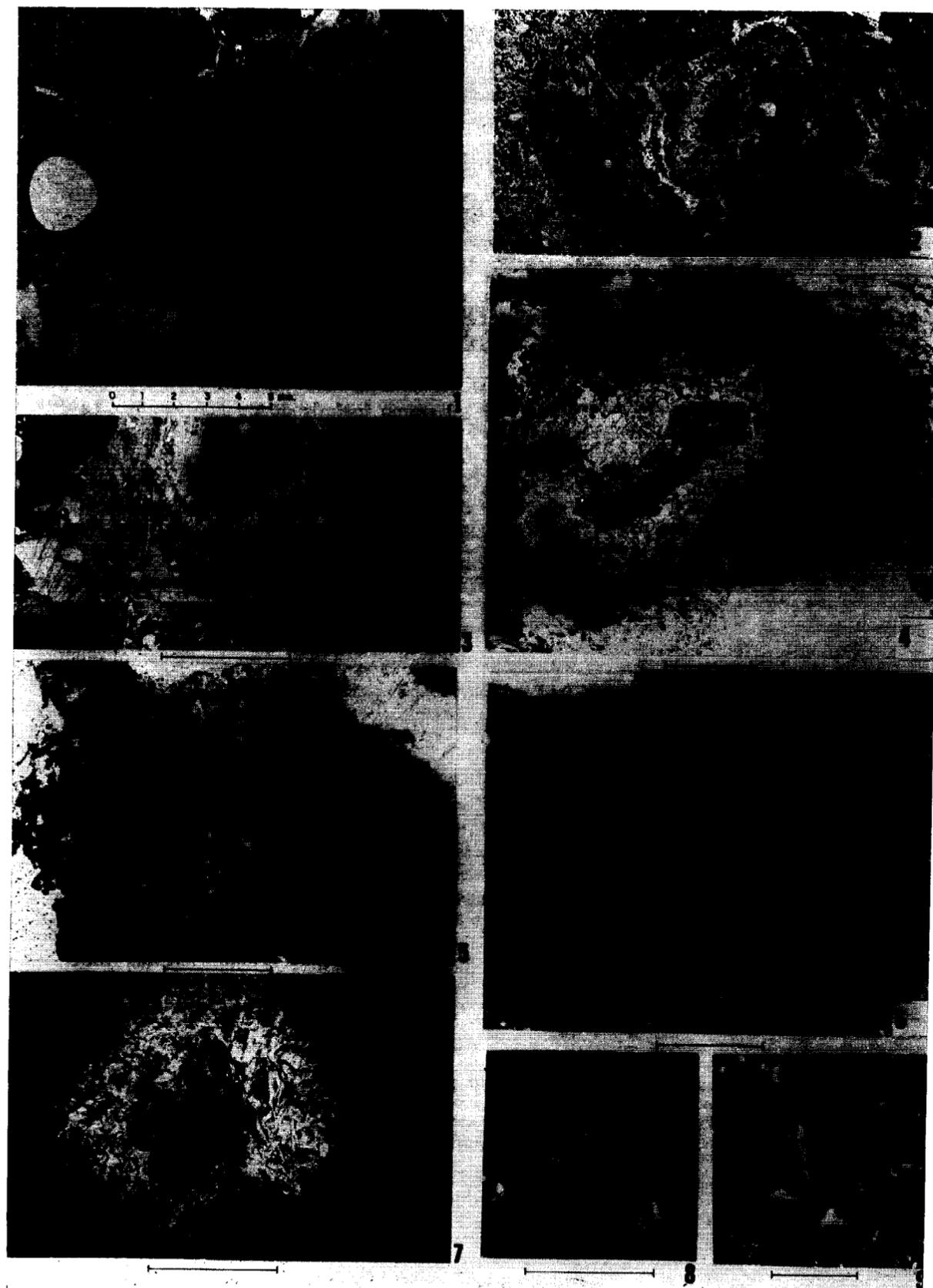
En el intento de encajar los depósitos de Fontanarejo en la cronoestratigrafía oficial, los datos expuestos al principio de este capítulo convergen hacia una probable atribución al Vendiente Medio-Superior y, posiblemente, al nuevo término Ediacariense propuesto por CLOUD y GLAESSNER.

Recordamos, sin embargo, que en algunas láminas transparentes de las rocas fosfáticas de

LAMINA VII

- 1 - *Muestra 3-1*.—Lámina de roca fosfática a pequeño aumento, en la cual se puede observar un clasto blando englobando a una oncoforma (en la esquina inferior derecha).
- 2 - *Muestra 3-1*.—Detalle de la oncoforma anterior, de constitución algal, incluida en el clasto blando.
- 3 - *Muestra EH 2*.—Oncoforma donde puede observarse el núcleo en colofana (zona negra) y las envueltas externas en apatito.
- 4 - *Muestra AP*.—Oncoforma con núcleo microcristalino constituido por mallas de algas cianofíceas (*Chroococcales*) silicificadas. La zona externa del núcleo (color negro) es colofana.
- 5 - *Muestra Calicata LH (a)*.—Restos de Espongiarios.
- 6 - *Muestra Calicata LH (a)*.—Núcleo de oncoforma con espículas.
- 7 - *Muestra Calicata LH (b)*.—Núcleo de oncoforma constituido por espículas silicificadas.
- 8-9 - *Muestras LH y SN*.—Detalles de espículas.

La barra corresponde a 0,5 milímetros.



Fontanarejo, hemos encontrado espículas de esponjas (lámina VII, figs. 5-9). Este hallazgo es interesante, porque, aunque se opine que la aparición de las esponjas ocurra a finales del Precámbrico (DE LAUBENFELS, 1955; REID, 1979), no parecen existir pruebas irrefutables.

DE LAUBENFELS (1955, pág. E33) hace una breve historia de los hallazgos, más o menos dudosos, de esponjas en el Precámbrico, y él mismo instituye el nuevo género y especie *Eospicula cayeuxi*, que coloca en la Clase Hyalospongea, fundándose en unos ejemplares encontrados por L. CAYEUX (1895) en el Precámbrico de Bretaña.

En la bibliografía moderna, J. J. SEPKOSKI jr. (1978, pág. 226, fig. 2) pone tajantemente la aparición de los Poríferos al principio del Tommo-tiense Inferior (Cámbrico) y, aparentemente, es sólo en el Cámbrico Inferior donde se encuentran verdaderas espongotitas, como, por ejemplo, en las sucesiones fosfáticas de Karatau (BUSHINSKII, 1969).

Las Esponjas son Metazoos, en cuanto multicelulares, pero se diferencian de los verdaderos Metazoos por la casi independencia de las células y por la falta de una distinta individualidad. Por tanto han sido colocados en la rama de los Parazoos, en contraposición de los Eumetazoos o verdaderos animales multicelulares.

Estamos, evidentemente, en el tema fascinante de la evolución del nivel de organización megascópica multicelular, que se sitúa en el techo del Proterozoico. Por eso, nos ponemos la pregunta de si los depósitos de Fontanarejo pueden pertenecer al Cámbrico Inferior como, según las opiniones actuales, indicaría la presencia de espículas de Esponjas, o todavía al Precámbrico, de acuerdo con los demás datos y con la dudosa pero posible aparición de los Poríferos en esta etapa de la historia bioestratigráfica.

Datos de geología económica

Las capas fosfatadas visibles forman una sucesión de pequeños cerros, de alineación N-S, sobre una longitud de cerca de 1,5 km., con espesores aparentemente variables entre los 10 y 60 m. e inclinación de unos 70° (fig. 5).

La vegetación, los depósitos recientes y la

«raña» impiden una observación exhaustiva y, por otro lado, al tratarse de paleocanales mareales, es muy difícil conocer la geometría, así como la constitución del material en profundidad.

Para ello se ha previsto la realización de una campaña de sondeos y de calicatas, que también podrá permitir reconocer nuevos tramos fosfatados debajo de los materiales de la raña y su extensión.

Estos trabajos están en fase de ejecución y la información actual no permite todavía precisar la ubicación del yacimiento. La estimación aproximada de unos 2 millones de t., fundada en los datos actuales, podría incrementarse notablemente si los trabajos mecánicos de reconocimiento dieran resultados favorables.

Los primeros análisis de varias muestras de niveles de fosforitas, por fluorescencia de Rayos X, proporcionan los valores medios siguientes:

	%	ppm
SiO ₂	33,20	
P ₂ O ₅	24	
CaO	33,90	
Al ₂ O ₃	2,86	
Fe ₂ O ₃	1,90	
MgO	1,14	
F	1,80	
PF	1,50	
S		< 25
Cl		43

Las muestras analizadas corresponden a los tramos oncolíticos, donde el porcentaje de cuarzo detrítico es menor.

En el análisis por difracción de Rayos X se ha podido determinar la presencia de fluorapatito.

También se efectuaron ensayos de mineralurgia que permiten ver con optimismo la explotación del yacimiento.

Pero independientemente del interés económico que pueda tener el depósito de Fontanarejo, hay que destacar la importancia geológico-minera de tal descubrimiento, que, confirmando las hipótesis de trabajo, abre amplias perspectivas a la investigación de fosfatos sedimentarios en la Península Ibérica, toda vez que la formación geológica en que se enmarcan tiene una gran extensión.

AGRADECIMIENTOS

Queremos dejar constancia de nuestro agradecimiento a la Dirección del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) por la autorización concedida para la presentación de esta comunicación, y a la colaboración del personal de la Empresa Nacional Adaro de Investigaciones Mineras, S. A. (ENADIMSA), que de diversas maneras contribuyó a la misma, en especial a la doctora Argüelles, que identificó al microscopio los minerales de fosfato.

BIBLIOGRAFIA

BOUREAU, E., y DARS, R.: *Sur les organismes précambriens récoltés au Mali*. BCREDP, 3 págs., 481-487 (1979).

BRASIER, M. D.; PEREJON, A., y DE SAN JOSÉ, M. A.: *Discovery of an important fossiliferous Precambrian-Cambrian sequence in Spain*. Estudios geológicos, vol. 35, enero-diciembre, págs. 379-383, Madrid (1979).

BUSHINSKII, G. I.: *Old phosphorites of Asia and their genesis*. Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem IPST Press (1969).

DE LAUBENFELS, M. W.: *Porifera*. En R. C. MOORE: «Treatise on Invertebrate Paleontology, Part E. Archaeocyatha and Porifera». Geological Society of America and University of Kansas Press, Lawrence, Kansas (1955).

GOLUBIC, S.: *Taxonomy of extant stromatolite-building Cyanophytes*. STROMATOLITES, M. R. WALTER (editor). Elsevier, Amsterdam (1976).

CAYEUX, L.: *De l'existence de nombreux débris de spongiaires dans le précambrien de Bretagne*. Ann. Soc. Geol. du Nord, t. 23, págs. 54-65 (1895).

HERRANZ, P.; DE SAN JOSÉ, M. A., y VILAS L.: *Ensayo de correlación del Precámbrico entre los Montes de Toledo occidentales y el Valle del Matachel*. Estudios geológicos, 33, págs. 327-342 (1977).

LOTZE, F.: *Das Präkambriums Spaniens*. N. Ib. Geol. Paläont., 8, págs. 373-380 (1956).

MORENO, F.: *Estudio geológico de los Montes de Toledo occidentales*. Tesis Universidad de Madrid (inérita) (1977).

MORENO, F.; VEGAS, R., y MARCOS, A.: *Sobre la edad de las series ordovícicas y cámbricas relacionadas con la discordancia «Sárdica» en el anticlinal de Valdelacasa (Montes de Toledo)*. Breviora geol. Astúrica, año XX, I, págs. 8-16 (1976).

NOTHOLT, A. J. G.: *Resources of Precambrian and Cambrian Sedimentary Phosphate Rock*. Proterozoic-Cambrian Phosphorites, Cambera, págs. 71-86 (1979).

ODIN, G. S.: *The Phanerozoic Time Scale revisited*. Episodes, págs. 3-9 (1982).

PERCONIG, E.: *Reflexiones sobre las posibilidades de existencia, investigación y descubrimiento de yacimientos o criaderos de fosfatos en España*. Informe interno, ENADIMSA (marzo de 1980).

PERCONIG, E.: *Introducción a la exploración de fosfatos sedimentarios en España*. Informe interno, ENADIMSA-IGME (abril de 1981).

PERCONIG, E., y VELANDO, F.: *Investigación preliminar de fosfatos sedimentarios en España, en terrenos del Proterozoico, Cámbrico y Mioceno Terminal*. Informe interno, ENADIMSA-IGME (diciembre de 1981).

REID, R. E. H.: *Porifera*. En FAIRBRIDGE y JABLONSKI: «The Encyclopedia of Paleontology», págs. 635-641, vol. VII, Dowden, Hutchinson & Ross, Inc. Stroudsburg, Pennsylvania (1979).

SCHOPF, J. W.: *Precambrian Life*. En FAIRBRIDGE y JABLONSKI: «The Encyclopedia of Paleontology», págs. 641-652, vol. VII, Dowden, Hutchinson & Ross, Inc. Stroudsburg, Pennsylvania (1979).

SEPKOSKI, J. J., jr.: *A kinetic model of Phanerozoic taxonomic diversity. I. Analysis of marine orders*. Paleobiology, 4 (3), págs. 223-251 (1978).

TEIXEIRA, C.: *Os conglomerados de complexo xisto-grauváquico ante-silúrico. Sua importância geológica e paleogeográfica*. Com. Serv. Geol. Portugal, 35, págs. 33-49 (1954).

TEIXEIRA, C.: *Quelques problèmes de la géologie du Portugal*, 23.º Int. Geol. Congr. Prague, 13, págs. 233-242 (1968).

TEIXEIRA, C.: *Le Précambrien portugais*. C. R. Somm. Soc. géol. Fr., fasc. 5-6, págs. 228-230 (1979).

VEGAS, R.; ROIZ, J. M., y MORENO, F.: *Significado del complejo esquistograuváquico en relación con otras series «pre Arenig» de España Central*. Studia geol., 12, págs. 207-215 (1977).

Recibido: Enero 1983

AGUAS SUBTERRANEAS

Hidrogeología del acuífero de la Vega de Almuñecar (Granada)

Por J. BENAVENTE HERRERA (*) y R. FERNANDEZ-RUBIO (*)

RESUMEN

Se exponen las principales características hidrogeológicas del acuífero aluvial litoral de la vega de Almuñecar (Granada), junto con algunos aspectos sedimentológicos de los materiales que lo integran. Se analizan los factores que determinan la recarga del acuífero junto con las causas que inciden en la situación actual de sobreexplotación del mismo, así como su posible incidencia futura en la calidad de las aguas subterráneas.

RESUME

On expose les principales caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère alluvial littoral de la vega de Almuñecar (Granada), ainsi que quelques aspects sédimentologiques des matériaux qui le composent. On analyse les facteurs qui déterminent la recharge de l'aquifère et les causes qui influent sur la situation actuelle de surexploitation de celui-ci, ainsi que sa possible incidence future sur la qualité des eaux souterraines.

INTRODUCCION. ENCUADRE GEOLOGICO E HIDROECONOMICO

La vega de Almuñecar se localiza en el litoral occidental de la provincia de Granada, entre los núcleos urbanos de Jete, en el extremo septentrional, y Almuñecar, en el borde costero meridional (fig. 1).

La población actual es del orden de 20.000 habitantes, si bien en los meses estivales dicha cifra se supera ampliamente, debido a la afluencia de veraneantes y turistas. La demanda de agua para abastecimiento es del orden de 5 Hm³/año, de acuerdo con las previsiones de incremento demográfico para el año 2000 (CHSE, 1974).

La principal riqueza del área reside en los cultivos de regadío, con predominio casi absoluto de plantaciones de tipo subtropical (chirimoyo, aguacate y níspero, fundamentalmente), que aseguran una elevada rentabilidad del terreno, condicionada a la disponibilidad de agua de buena calidad para dicho uso. En la actualidad se riegan unas 500 Ha que, en una elevada proporción, se localizan en los valles aluviales de los ríos Verde y Seco, si bien cada vez es más frecuente la implantación de nuevos regadíos en las laderas de dichos valles, mediante roturación y abancalamiento de las mismas, de manera que, en un futuro relativamente próximo, está previsto alcanzar una superficie regable del orden de 1.000 Ha. En base a dicha previsión, se ha estimado una demanda de agua, para uso agrícola, cercana a 9 Hm³/año (CHSE, 1974).

El área investigada se incluye, desde el punto de vista de su localización geológico-regional, en

las zonas internas de las Cordilleras Béticas y, más concretamente, en el Complejo Alpujarride, sobre el que se han depositado los sedimentos aluviales cuaternarios que originan la vega de Almuñecar propiamente dicha. Estos depósitos rellenan los valles de los ríos Verde y Seco, los cuales, en el sector cercano a su desembocadura, aparecen separados por una divisoria que apenas se eleva sobre el nivel del valle aluvial, con una distancia entre ambos cauces del orden de 400 m.

El trazado de ambos valles fluviales evidencia un control marcadamente tectónico (ESQUITINO y FERNÁNDEZ-RUBIO, 1975), según sistemas de fracturas con direcciones aproximadas: N 20°-30° E y N 30°-45° O.

Los materiales cuaternarios aluviales aparecen encajados dentro de un conjunto de carácter metapelítico, que presenta estructura general de

mantos de corrimiento (fig. 2). Más hacia el Norte afloran materiales carbonáticos alpujarrides, que constituyen la cabecera de la cuenca vertiente. En los trabajos de AVIDAD (1976) y AVIDAD y GARCÍA-DUEÑAS (1981) se describen las características geológicas de este área, y a ellos nos remitimos para una mayor información al respecto.

Desde el punto de vista morfológico, la vega de Almuñecar se localiza en la cuenca baja de los ríos Verde y Seco, cuya superficie vertiente es de 120 Km². Al primero de tales cursos, aportan sus aguas una serie de manantiales, en su cabecera, que drenan un sector del acuífero carbonatado de Sierra Almijara (BENAVENTE, 1981, 1982), los cuales aseguran un caudal base cercano a 350 l/s., como valor medio, si bien durante los meses de invierno y primavera es frecuente que se superen, a veces de manera bastante amplia, valores de 500 l/s.

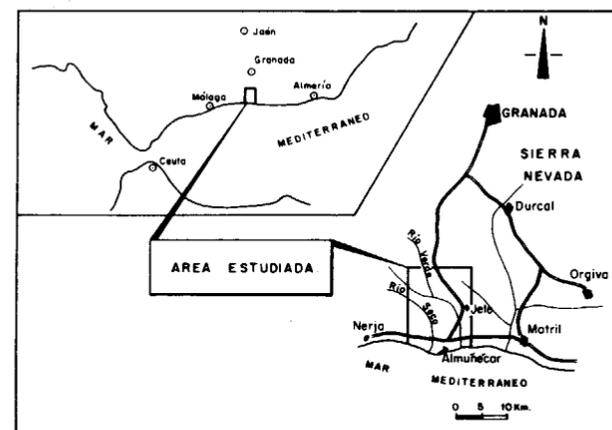


Figura 1.—Localización geográfica.

(*) Departamento de Hidrogeología, Universidad de Granada, y Sección de Hidrogeología del Centro Coordinado de Geología del C. S. I. C. en Granada.

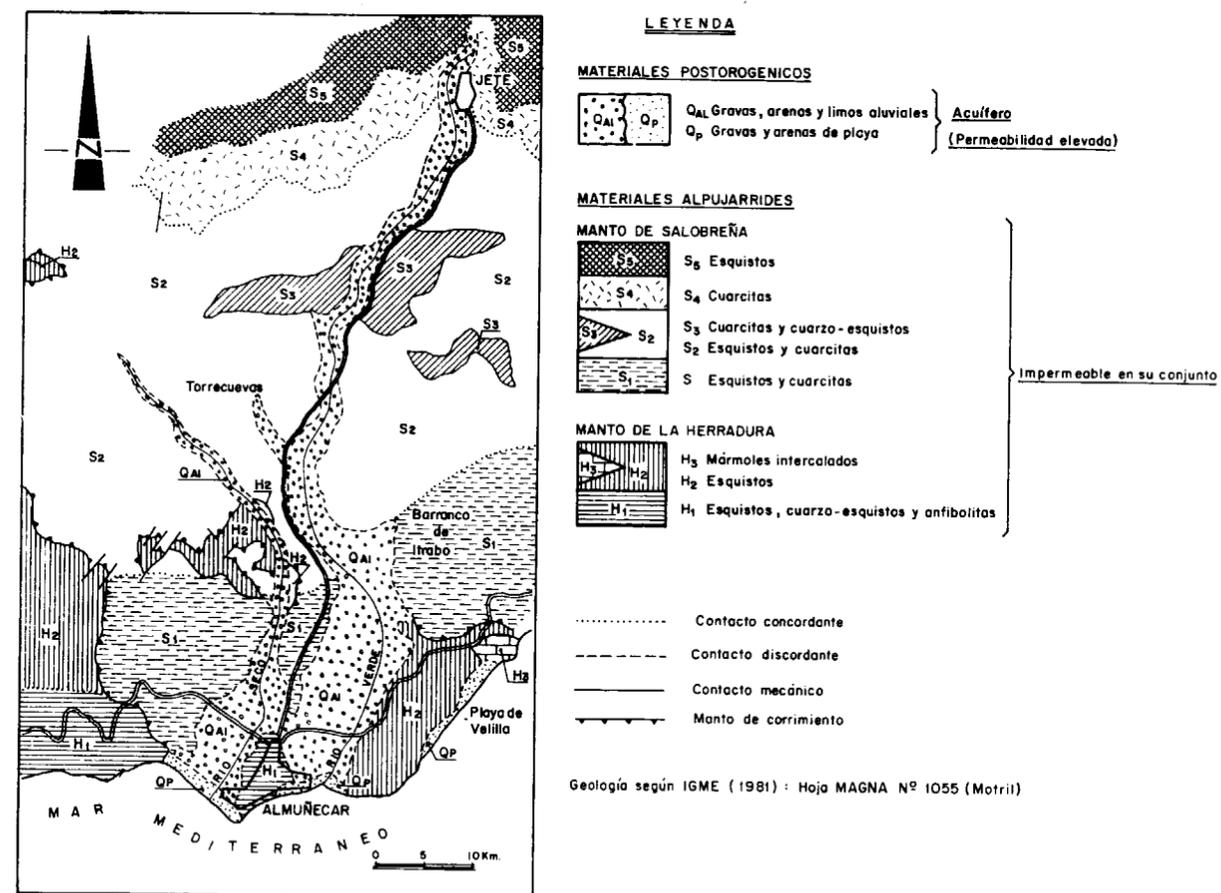


Figura 2.—Esquema geológico.

No obstante dicho aporte, el cauce del río Verde aparece seco durante gran parte del año, en su recorrido sobre la vega, debido a la derivación de sus aguas por acequias, fundamentalmente para regadío.

Las aportaciones totales del río Verde, en su entrada a la vega de Almuñécar, están comprendidas entre 15 y 20 Hm³/año.

A pesar del excedente global de recursos hídricos superficiales, frente a la demanda antes indicada, la irregular distribución temporal de estas aguas es la causa de que exista un déficit, concentrado fundamentalmente en la época estival, que en la actualidad trata de subsanarse mediante la extracción de aguas subterráneas. Esta situación ha motivado un proyecto, por parte de la Administración, tendente a efectuar una regulación superficial del río Verde, mediante un embalse en cabecera (CHSE, 1974). Más adelante comentaremos el riesgo que, en un plazo más o menos largo, entrañaría dicha actuación.

La escorrentía superficial del río Seco es de tipo torrencial, relacionada con precipitaciones de relativa intensidad, sobre los materiales impermeables que ocupan la totalidad de su cuenca.

Una mayor información adicional, relativa a las principales características hidrológicas y morfológicas de la cuenca vertiente, puede encontrarse en el mencionado trabajo de ESQUITINO y FERNÁNDEZ-RUBIO (1975).

CARACTERÍSTICAS HIDROMETEOROLÓGICAS DEL ÁREA

En lo que se refiere a los parámetros hidrometeorológicos, que caracterizan el área investigada, hay que señalar que el módulo pluviométrico anual en la estación de Almuñécar es de 465 mm. (período 1955-80), con valores extremos, en dicho período, de 275 y 750 mm. Los dos últimos años hidrológicos (1980/81 y 1981/82) se han caracterizado por la incidencia de una acusada sequía, cuyas consecuencias hidrogeológicas apuntaremos más adelante.

En la cuenca del río Verde, la pluviosidad muestra un incremento progresivo hacia el sector montañoso de cabecera, debido a la barrera que ofre-

cen tales elevaciones (que sobrepasan los 1.700 m.), a los vientos portadores de lluvia, procedentes, en su mayoría, del suroeste. En dicho sector, la precipitación media sobrepasa los 900 mm. Tales elevaciones constituyen, a su vez, una barrera frente a los vientos fríos del Norte, lo que justifica la benignidad del clima, con temperaturas medias anuales ligeramente superiores a 17° C, a lo largo del valle aluvial. A este respecto, en la estación de Almuñécar, las temperaturas mínimas medias, en el mes más frío, son del orden de 8° C, y muy raramente descienden, en valores absolutos extremos, por debajo de 3° C.

Una característica desfavorable, en la ocurrencia de las precipitaciones dentro del área investigada, reside en la escasa frecuencia con que se producen (40 días al año, como valor medio, en Almuñécar), con elevada intensidad en los aguaceros, que llega a ser superior a 20 mm/día, igualmente como valor medio anual en el período considerado; esta última cifra puede verse ampliamente superada, a nivel mensual, en especial durante el estiaje, cuando las lluvias duran, en general, muy pocas horas.

En la estación de Almuñécar, los valores más frecuentes de evaporación están comprendidos entre 900 y 1.000 mm/año. La evapotranspiración potencial media anual, calculada por el método de THORNTHWAITE, en dicha estación, es del orden de 800 mm., y la real, para los materiales aluviales, resulta cercana a 400 mm/año, como valor medio, lo que representa del orden del 85 por 100 del módulo pluviométrico. Existen, no obstante, variaciones importantes, en lo que a cálculo de dicho parámetro se refiere, según se trate de años relativamente húmedos o secos, cuya influencia en la recarga subterránea resulta evidente, habida cuenta de que una fracción importante de la lluvia útil pasa a ser infiltración. Así, en años cuya precipitación supera 650 mm., la alimentación subterránea puede ser del orden del 40 por 100 de dicha cifra, mientras que en aquellos casos en los cuales la pluviometría anual es inferior a 350 mm., puede considerarse que prácticamente la totalidad de la infiltración compensaría al déficit de humedad del suelo y se consumiría en la evapotranspiración.

De lo expuesto se desprende que la alimentación, por infiltración directa de la precipitación, o a partir de la escorrentía superficial generada

en los materiales metapelíticos (posteriormente infiltrada, en una gran proporción, a su paso sobre los depósitos aluviales), ha sido muy escasa en los dos últimos años, caracterizados por la incidencia de una sequía de la que apenas existen precedentes en lo que va de siglo, lo que ha agravado la actual situación de desequilibrio hidrogeológico.

CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLOGICAS Y PARAMETROS HIDRAULICOS DE LOS MATERIALES. ASPECTOS SEDIMENTOLOGICOS Y GEOMETRICOS DEL ACUIFERO

Los materiales aluviales, relacionados con los ríos Verde y Seco, así como los depósitos detríticos asociados a la franja estrictamente litoral, constituyen un acuífero de permeabilidad por porosidad intergranular.

Los materiales metapelíticos, que constituyen el sustrato y la totalidad de los bordes del acuífero, dentro del área investigada, pueden considerarse, en términos generales, como «impermeables». No obstante, las intercalaciones más cuarcíticas, debido a su fracturación, aportan caudales, relativamente exigüos, hacia las obras de captación y/o al acuífero detrítico principal (GARCÍA GARCÍA et al., 1981).

A partir de una campaña de sondeos eléctricos verticales, efectuados en el aluvial del río Verde por ENADIMSA-IGME (1977), se ha podido determinar que, bajo un recubrimiento superficial fundamentalmente limoso, cuyo espesor oscila entre 0 y 10 m., aparecen formaciones de resistividad media o, más generalmente, elevada. La formación más transmisiva, que corresponde a un conglomerado casi suelto, constituye generalmente la totalidad del relleno aluvial en la mitad septentrional del acuífero, y solamente el tramo superior (10 a 35 m.) en la mitad meridional. En el extremo distal del valle (sectores próximos a costas), se ha localizado, mediante sondeos mecánicos (ENADIMSA-IGME, 1977) algunas intercalaciones arcillo-limosas que, en determinados puntos, superan los 5 m. de espesor.

En algunos sectores del valle del río Verde son visibles restos de terrazas, que han quedado colgadas debido a la posterior acción erosiva del río.

La existencia de un antiguo cauce del río (fig. 3 A), ha sido determinada mediante análisis fotogeológico (FERNÁNDEZ-RUBIO, 1972; LÓPEZ LÓPEZ, 1974). Este cauce presenta granulometría relativamente más gruesa y homométrica que los materiales aluviales en los cuales aparece encajado. Esto se traduce en un mayor rendimiento de las captaciones ubicadas sobre él, ya que constituye una vía preferencial para la circulación del agua subterránea.

A partir de numerosos datos, procedentes de sondeos mecánicos y pozos, hemos elaborado el mapa de la figura 3 B, en el que se representa, de manera aproximada, la geometría del acuífero. Los máximos espesores del relleno aluvial no corresponden al trazado actual del cauce, sino que, especialmente en el extremo distal del valle, se encuentran algo desplazados hacia el Oeste, y parecen coincidir con el principal paleocauce detectado.

En cualquier caso, el esquema geométrico presentado debe admitirse con ciertas reservas, especialmente en su detalle, ya que la aplicación de metodologías geoestadísticas, relativas al estudio de la distribución espacial en los espesores aluviales (CHICA et al., 1982), apunta hacia la existencia de una marcada anisotropía local de espesores, que se traduce en elevaciones y hundimientos del sustrato metapelítico, a favor de los principales sistemas de fracturas anteriormente señalados.

En lo que se refiere a la distribución de los parámetros hidráulicos del acuífero, LÓPEZ LÓPEZ (1974), en base al análisis granulométrico de los materiales que forman el relleno más superficial del valle aluvial del río Verde, estima una porosidad eficaz comprendida entre el 20 y el 30 por 100, y valores de permeabilidad entre 150 y 400 m/día.

A partir de los datos ofrecidos por algunos ensayos de bombeo (BENAVENTE, 1982) han podido establecerse, a grandes rasgos, los valores de permeabilidad y transmisividad en algunos sectores del acuífero. Así, en las inmediaciones del Jete, éstos son del orden de 300 m/día y 400 m²/día, respectivamente. En el sector central de la vega de Almuñécar, donde el acuífero presenta mayor anchura, los valores de permeabilidad son algo inferiores, del orden de 100 a 250 m/día según los puntos, lo cual podría estar ligado a la mayor heterometría de los sedimentos y, en especial, al incremento de la fracción detrítica fina en los

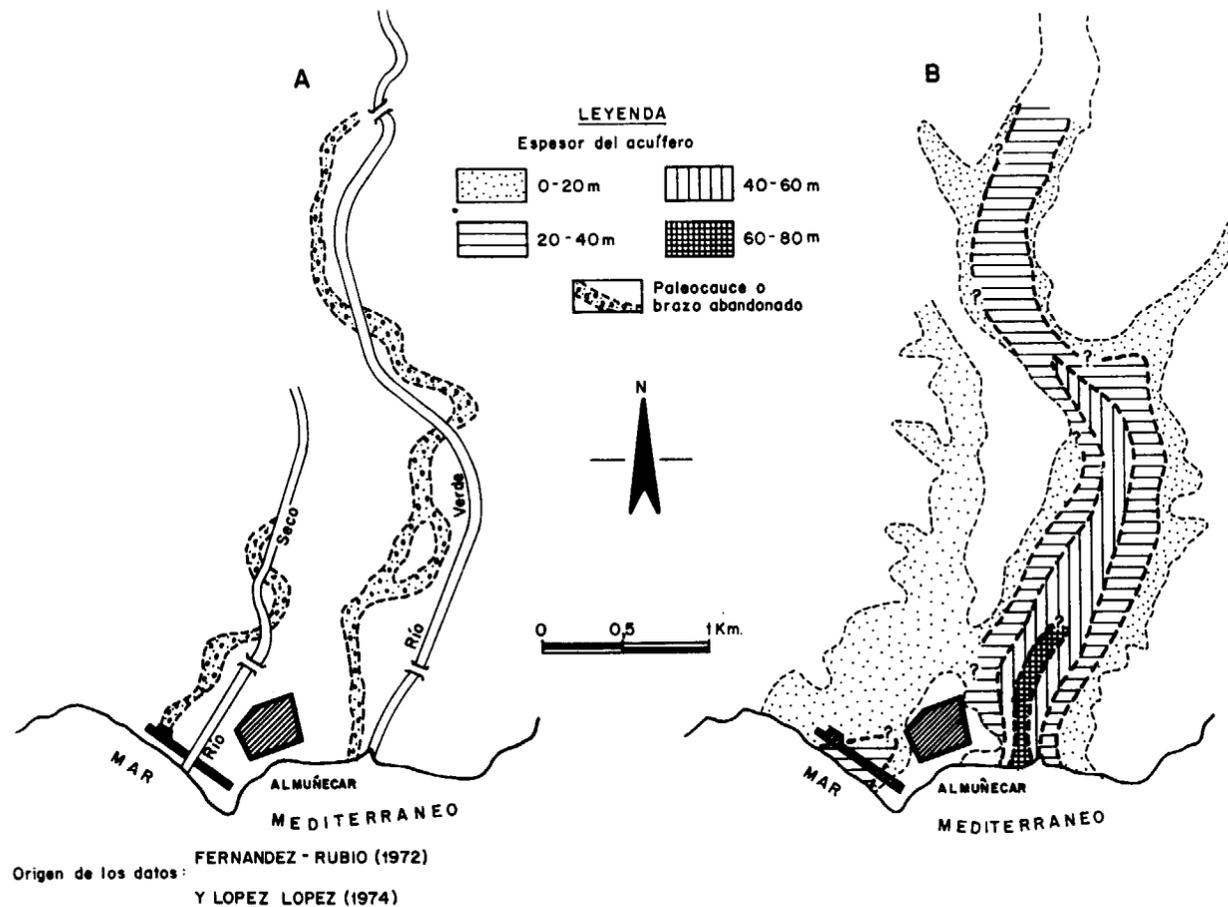


Figura 3.—Paleocauces (A) y espesor aproximado del acuífero (B).

mismos. No obstante, la transmisividad registra valores más elevados, del orden de 10.000 m²/día, debido a que el espesor saturado llega a triplicar al correspondiente a sectores situados aguas arriba.

Los datos relativos a caudales específicos de pozos y sondeos presentan, en general, valores más elevados en el sector central que en el resto del acuífero, y son del orden de 25-27 l/s/m. Existen, sin embargo, variaciones significativas de dicho parámetro, para diferentes situaciones del punto considerado, aún dentro de la misma transversal del acuífero. Ello da idea de la extrema heterogeneidad del acuífero a escalas más reducidas, consecuencia de los factores comentados al explicar el modelo sedimentológico del mismo (presencia de paleocauces, intercalaciones de limos, variaciones locales en la profundidad del sustrato, etc.).

Existen pocos valores relativos al coeficiente de almacenamiento del acuífero. En las inmediaciones del Jete, es del orden del 10 por 100 (hallado mediante simulación matemática por GARCÍA GARCÍA et al., 1981), lo que resulta sensiblemente inferior a los valores de porosidad eficaz deducidos para las muestras de superficie. En el resto del acuífero dicho parámetro ofrece valores más reducidos (5-10 por 100), e incluso puede resultar notablemente inferior en los sectores más cercanos al borde costero.

En gran parte del acuífero del río Seco, los diferentes parámetros hidráulicos adquieren valores similares a los registrados para la cuenca del río Verde, excepto la transmisividad, ya que el espesor saturado, en este caso, es sensiblemente inferior (casi siempre menor de 10 m.).

PUNTOS DE AGUA. PIEZOMETRIA Y FUNCIONAMIENTO DEL ACUÍFERO

Tenemos inventariados, en el acuífero aluvial de los ríos Verde y Seco, del orden de 150 puntos de agua. Prácticamente la mitad de dicha cifra corresponde a pozos excavados, y de ellos algo más del 75 por 100 presentan profundidades comprendidas entre 0 y 20 m., lo que refleja la escasa profundidad del nivel piezométrico en gran parte del acuífero.

En el caso de sondeos, que representan del orden del 40 por 100 del total de las captaciones inventariadas, la profundidad de la obra está condicionada por la aparición del sustrato meta-pelítico; los valores más frecuentes corresponden al intervalo comprendido entre 30 y 50 m. (fig. 3 B).

Algo más del 65 por 100 del total de puntos inventariados se utilizan para regadío, y un 20 por 100 se emplean para abastecimiento. Como contraste, frente a la situación actual de descenso de niveles, hay que señalar la existencia de algunos pozos, realizados hace 10 ó 15 años, para el drenaje de fincas, que se localizan, fundamentalmente, en el sector cercano a la desembocadura de ambos ríos.

Las captaciones utilizadas para regadíos presentan, a grandes rasgos, un régimen de extracciones supeditado a las necesidades de agua de cada período en particular. En base a una encuesta a los agricultores del área (in CHSE, 1974), se ha estimado una dotación media de 950 m³/Ha/riego, con la siguiente distribución:

- Junio a septiembre (ambos inclusive: un riego cada 20 días,
- Mayo y octubre: un riego cada 30 días, y
- resto de los meses: las necesidades se reducen al 20 por 100 de lo reseñado para mayo y octubre, y son prácticamente nulas si el año es abundante en lluvias.

En las captaciones utilizadas para abastecimiento, el funcionamiento es prácticamente continuo, si bien durante la época estival las extracciones se intensifican.

De acuerdo con los datos recogidos, las extracciones totales, para un año medio, pueden cifrarse en unos 7 Hm³, aunque en períodos de intensa sequía, como los dos últimos años, éstas llegan a superar los 9 Hm³, concentradas en los meses

de primavera y verano. En tales años, excepcionalmente secos, disminuye la alimentación al acuífero, con el agravante de que las extracciones pueden superar, tal vez de manera amplia, la cifra correspondiente a los recursos, con la consiguiente afección al volumen de reservas del acuífero e, incluso, a la fracción de éstas situada por debajo del nivel del mar, como señalaremos más adelante.

El acuífero aluvial de los ríos Verde y Seco es libre, en la mayor parte de su extensión. Hacemos esta salvedad porque en algunos sondeos, efectuados muy cerca del borde costero, se encontraron aguas surgentes (ENADIMSA-IGME, 1977), que denotan el confinamiento del acuífero, relacionado con la existencia de intercalaciones detríticas finas. Esta situación, bastante común en el resto de los principales aluviales del litoral mediterráneo español (CUSTODIO, 1981), y en otras áreas (MIJATOVIC y BAKIC, 1967; DAVIS y de WIEST, 1971), además de ser poco extensa desde el punto de vista espacial, desapareció rápidamente al alcanzarse un nuevo estado de equilibrio.

La intercomunicación hidrogeológica, entre el acuífero aluvial del río Seco y el del río Verde, en las inmediaciones de Almuñecar, parece poco probable, en función de los datos piezométricos obtenidos, y a que, en dicho sector, el sustrato impermeable debe encontrarse, en general, a menos de 10 m.

En ambos casos (río Verde y río Seco) se trata de cursos influentes o «perdedores», en el sentido de que alimentan al acuífero, bien de manera directa a través del cauce, cuando el río circula con agua, bien a través del retorno de regadíos efectuados a partir de sus derivaciones. Este aspecto, válido para la casi totalidad del área investigada, puede no cumplirse en los sectores de cabecera de ambos cursos, donde el nivel de agua en las captaciones suele venir impuesto por el del río.

La evolución piezométrica, en diferentes sectores del acuífero, durante el período comprendido entre junio de 1977 y julio de 1981 (fig. 4), muestra la existencia de una periodicidad estacional, con niveles altos en los meses de primavera, y bajos a finales del estiaje. La intensificación de los bombeos, durante los meses estivales, contribuye a un sobreabastecimiento de niveles, superpuesto a la tendencia general de descensos.

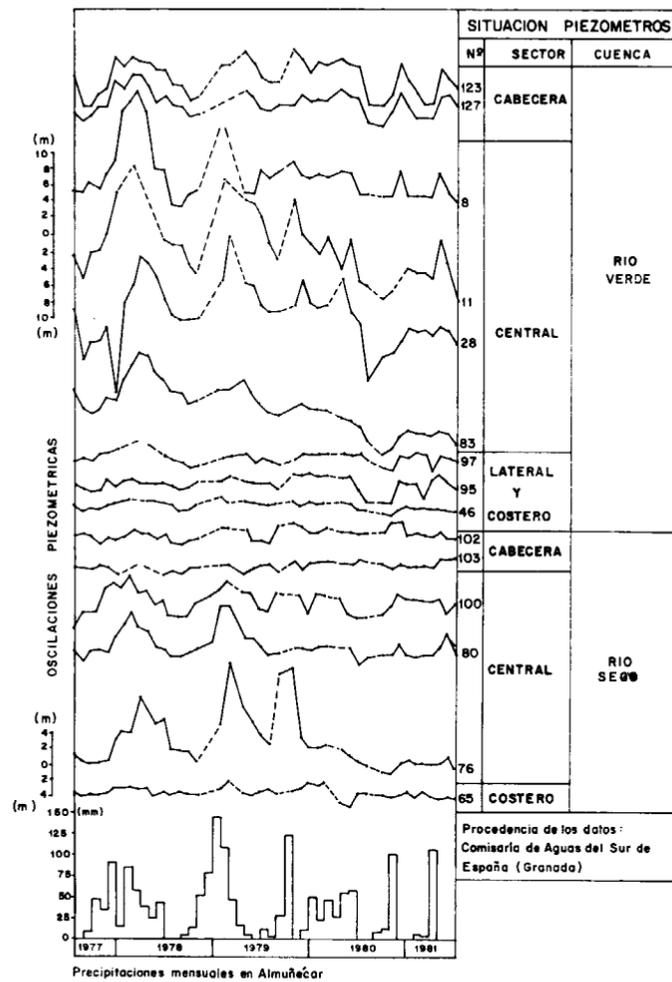


Figura 4.—Oscilaciones piezométricas en algunos puntos del acuífero.

Aguas abajo de Jete se localizan las principales derivaciones de las aguas superficiales, y una galería subálvea con un importante caudal subterráneo captado. Como consecuencia, a partir de dicho sector, el río permanece seco durante gran parte del año y la superficie piezométrica se sitúa varios metros por debajo del cauce. En dicho sector central del acuífero se localizan las principales extracciones de aguas subterráneas. Dado que no existe prácticamente recarga inducida, y debido a la proximidad de barreras negativas en ambas márgenes del acuífero, se produce un efecto de «interferencia», con formación de conoides de descenso, superpuestos unos a otros, que provocan importantes depresiones piezométricas.

Así, la mayoría de los puntos del sector central denotan fluctuaciones superiores a 15 m., y, en algunos, se llegan a superar los 30 m.

Este proceso se amortigua, de manera progresiva, al aproximarnos al borde costero, por el efecto de «nivel de base» impuesto por el mar, y en este sector llegan a ser patentes los efectos de la marea.

En los piezómetros situados en el sector de cabecera del río Seco, y en los extremos finales de las ramblas de Torrecuevas e Itrabo, la evolución piezométrica está relacionada estrechamente con las precipitaciones, las cuales aportan la totalidad de los recursos de tales sectores.

En cuanto a la tendencia general evolutiva de niveles, a lo largo de los últimos cuatro años de control, las variaciones más importantes se registran en el sector central del acuífero del río Verde (progresión de descenso, en niveles mínimos, cercana a 2 m/año). Algunos piezómetros de determinados sectores de la cuenca del río Seco (números 100 y 103, en la fig. 4) denotan una evolución ascensional, que puede suponer elevaciones de hasta 4 m. en los niveles de estiaje. Tal fenómeno puede deberse a la recarga adicional, incrementada, en los últimos años, por los regadíos implantados en esta cuenca con aguas que se elevan desde la cuenca del río Verde.

En la figura 5 presentamos dos mapas de isopiezas, que corresponden a situaciones hidrogeológicas prácticamente antagónicas. La A representa la situación de niveles altos en un año húmedo (mayo de 1974), y en ella el gradiente hidráulico, en el sector septentrional del acuífero del río Verde, es del orden del 1,5 por 100, mientras que, en el sector central, disminuye hasta valores cercanos al 0,5 por 100, lo cual podría responder, a igualdad de otros factores, a un ensanchamiento importante del frente del acuífero. En el área cercana al borde litoral, el gradiente vuelve a aumentar (0,8 por 100), lo cual puede deberse, además de a la disminución de sección, a una reducción en la permeabilidad de los materiales, debida a la presencia de sedimentos más finos. Destaca, en este último sector, el trazado de las isopiezas, que denota un eje de circulación preferencial del agua subterránea, coincidente, a grandes rasgos, con la dirección del paleocauce antes descrito. El gradiente según dicho eje (0,6 por 100), es ligeramente inferior al de su entorno, lo que

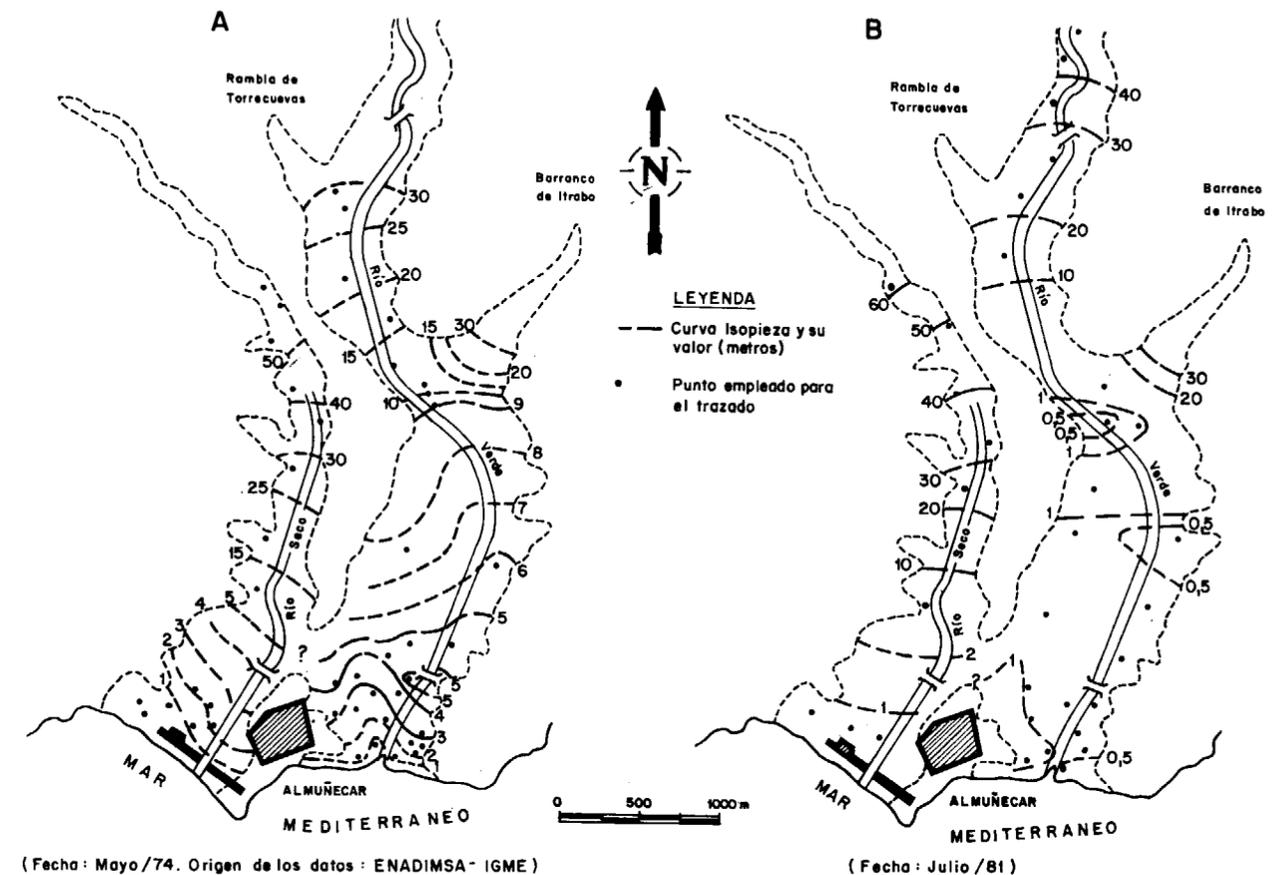


Figura 5.—Mapas de isopiezas con diferentes situaciones hidrodinámicas.

sugiere la existencia de materiales más permeables, a través de los cuales el flujo subterráneo se realiza a mayor velocidad.

En el sector de cabecera del río Seco, el gradiente hidráulico es elevado (2-3 por 100), como corresponde al relativamente exiguo caudal subterráneo circulante. Las causas que rigen la disminución de dicho parámetro, en el sector central y costero del acuífero (del orden del 0,5 por 100), habría que buscarlas fundamentalmente en la influencia de la recarga por los riegos, con aguas procedentes de la cuenca del río Verde, así como en el ensanchamiento en la sección del acuífero.

En el mapa de isopiezas del mes de julio de 1981, año de pluviosidad muy escasa (fig. 5 B), puede observarse cómo los descensos, en el sector de cabecera del río Verde, respecto a la situación de niveles altos (fig. 5 A), son del orden de 10 m. El gradiente hidráulico, en tal área, es del 2,5

por 100, incremento que debe responder a la importante reducción que registra la transmisividad del acuífero, al disminuir de manera notable el espesor saturado del mismo.

Prácticamente, la totalidad del sector central del acuífero del río Verde, presenta cotas piezométricas por debajo de la cota 1 y, en áreas concretas, se aprecia la existencia de conoides de depresión con cotas inferiores a 0,5 m. Existe un pequeño umbral de cotas piezométricas ligeramente por encima del metro al este del núcleo de Almuñecar, verosíblemente inducido por recarga a partir de excedentes de riegos, efectuados con aguas procedentes de la red urbana.

Un control piezométrico, efectuado en el sector cercano al borde litoral del acuífero del río Verde, en septiembre de 1981, puso de manifiesto la existencia de cotas piezométricas ligeramente inferiores al nivel del mar. Si se tiene en cuenta que

la sequía se ha prolongado a lo largo de todo el año 1981/82 es previsible que la gravedad de la situación se haya intensificado, en lugar de remitir, ya que a la disminución en las aportaciones se suma la extracción de mayores volúmenes de aguas subterráneas para satisfacer la demanda.

A partir del mapa de la figura 3 B, y para un coeficiente de almacenamiento medio del 10 por 100, hemos estimado el volumen aproximado de agua gravífica almacenada para la situación de niveles altos, de acuerdo con las isopiezas de la figura 5 A. El valor oscila, a grandes rasgos, entre 10 y 25 Hm³. El mismo cálculo, para la situación de estiaje (fig. 5 B), arroja valores entre 10 y 15 Hm³, que corresponderían al volumen de reservas del acuífero. La diferencia entre ambos valores (10 Hm³) debe corresponder, al menos en orden de magnitud, a los recursos anuales del acuífero. De manera orientativa, hemos estimado entre 5 y 7 Hm³ el volumen de agua almacenada en el acuífero por debajo del nivel del mar.

Resulta difícil establecer, de manera precisa, un balance hídrico para el acuífero, habida cuenta de la extremada variabilidad que, a lo largo del tiempo, ofrecen algunos de sus principales componentes. En una investigación anterior (BENAVENTE, 1982) se detalla la metodología seguida para la evaluación y/o acotación de los elementos más importantes, con influencia sobre el balance, de los cuales ofrecemos, a continuación, una estimación resumida que tiene en cuenta las dos situaciones extremas, de alta pluviosidad y drástica sequía.

Las entradas al acuífero aluvial del río Seco proceden de la infiltración a partir de la escorrentía superficial, generada en los materiales impermeables que integran su cuenca, así como del retorno de riegos, a partir de acequias que derivan parte del caudal del río Verde, y totalizan de 1 a 4 Hm³/año. La explotación, por bombeos, está comprendida entre 1 y 2 Hm³/año. Debe existir, por tanto, un drenaje subterráneo hacia el mar, cuyo valor medio es cercano a 1 Hm³/año.

En el acuífero aluvial del río Verde puede estimarse una alimentación comprendida entre 6 y 14 Hm³/año, según las características del año que se considere. La partida más importante corresponde a la infiltración a través del cauce del río, y al retorno de regadíos efectuados a partir de sus derivaciones, la cual oscila entre 5 y 8 Hm³/

año. Hay que señalar que esta recarga tiene su origen en las aportaciones del río Verde, en su entrada a la vega de Almuñécar, las cuales proceden en una elevada proporción (70-90 por 100), del drenaje del acuífero carbonatado de cabecera, carente en la actualidad de regulación (BENAVENTE et al., en prensa).

Mayor variabilidad acusa la partida correspondiente a infiltración directa, a partir de las precipitaciones, o de la escorrentía generada en los materiales impermeables, la cual se infiltra, en buena parte, al llegar al acuífero. Esta infiltración, en conjunto, puede oscilar entre 1 y 6 Hm³/año.

Las extracciones por bombeo del acuífero, están comprendidas, a grandes rasgos, entre 7 y 9 Hm³/año (la última cifra corresponde a aquellos años con escasez de recursos superficiales), pero pueden haberse incrementado en los últimos años.

De acuerdo con lo expuesto, en épocas de sequía los recursos del acuífero son inferiores a las extracciones. Esta situación es la que se acusa en los últimos años, y la consecuencia es un progresivo incremento en la profundidad de los niveles piezométricos del acuífero, hasta alcanzar cotas, en época de estiaje, inferiores al nivel del mar. En años de lluvias abundantes ocurre lo contrario, y se pierden al mar, de manera oculta, importantes volúmenes de agua. Ello implica, desde un punto de vista de la relación entre el agua dulce y el agua marina, notables variaciones en la posición de la interfase, con el riesgo, cada vez mayor, de que se produzca una invasión salina. De hecho, puede tener lugar, en la actualidad, una afección importante dada la escasa hidraulicidad y el aumento de las extracciones en los meses de primavera-verano.

CARACTERÍSTICAS HIDROQUÍMICAS

En la figura 6 representamos, mediante diagramas poligonales, las principales características hidroquímicas registradas en una serie de puntos de agua. En casi todos ellos, la facies es bicarbonatada cálcica y/o magnésica, como corresponde a aguas poco cargadas en sales (mineralizaciones comprendidas, en general, entre 600 y 800 mg/l.), y con alimentación mayoritaria procedente del drenaje del acuífero calizo-dolomítico de la cabecera del río Verde. Los valores más elevados de

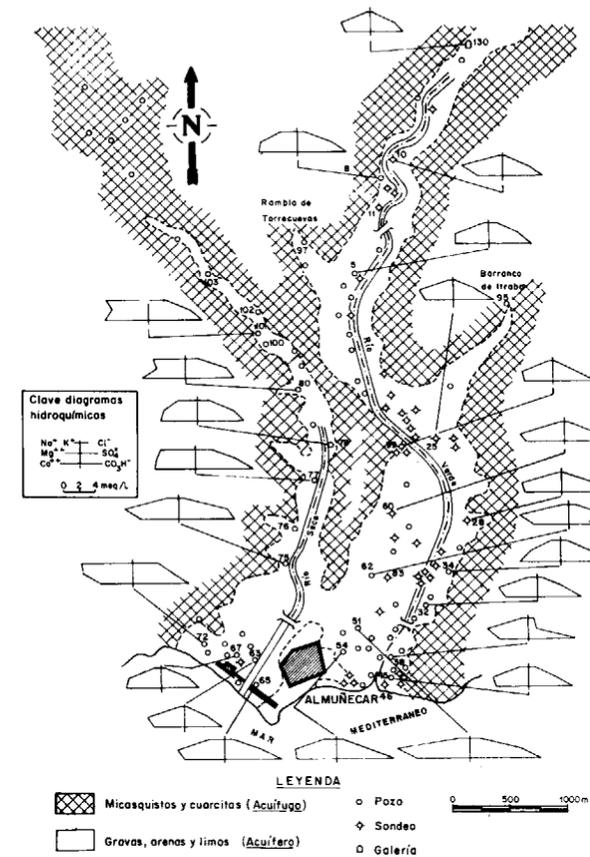


Figura 6.—Principales características hidroquímicas de algunos puntos del acuífero.

aluvial, estas últimas con mayor contenido en Na⁺ y K⁺, que puede reflejar el efecto de la escorrentía sobre los borde metapelíticos, posteriormente infiltrada en el acuífero.

La situación del punto número 38, en el campo de aniones de la figura 7, denota, respecto a las muestras de su entorno, la influencia de un proceso de reducción de sulfatos, relacionado con un foco puntual de contaminación orgánica (filtraciones procedentes de una fosa séptica situada aguas arriba de dicho punto). Las muestras correspondientes al aluvial del río Seco registran, de acuerdo con las consideraciones efectuadas relativas a su alimentación, mayor proporción de Na⁺+K⁺ y disminución en la relación Mg⁺⁺/Ca⁺⁺, respecto al acuífero del río Verde, así como un proceso de aproximación hacia valores característicos de este último, en el sector más próximo al borde costero.

Desde el punto de vista químico, y de acuerdo con los datos expuestos, hasta el momento la calidad de las aguas del acuífero de la vega de Almuñécar resulta excelente, tanto para abastecimiento humano, como para su empleo en labores agrícolas, pero estas características se verían drásticamente afectadas, si se llega a la situación inducida de infiltración marina.

CONCLUSIONES

El acuífero de la vega de Almuñécar, integrado por los depósitos de los ríos Verde y Seco, se encaja en un potente conjunto impermeable, de materiales metapelíticos alpujárrides, en un sector del litoral de la provincia de Granada, con importante demanda de agua para uso agrícola y abastecimiento humano.

La investigación ha puesto de manifiesto algunos aspectos sedimentológicos de los materiales, y geométricos del acuífero, con notable influencia en las características hidrogeológicas que rigen el flujo subterráneo. La consecuencia es una relativa heterogeneidad espacial en los parámetros hidráulicos.

La alimentación del acuífero ha sido evaluada, de manera aproximada, entre 18 y 7 Hm³/año, según se consideren años con pluviometría abundante o escasa. Una fracción, relativamente poco

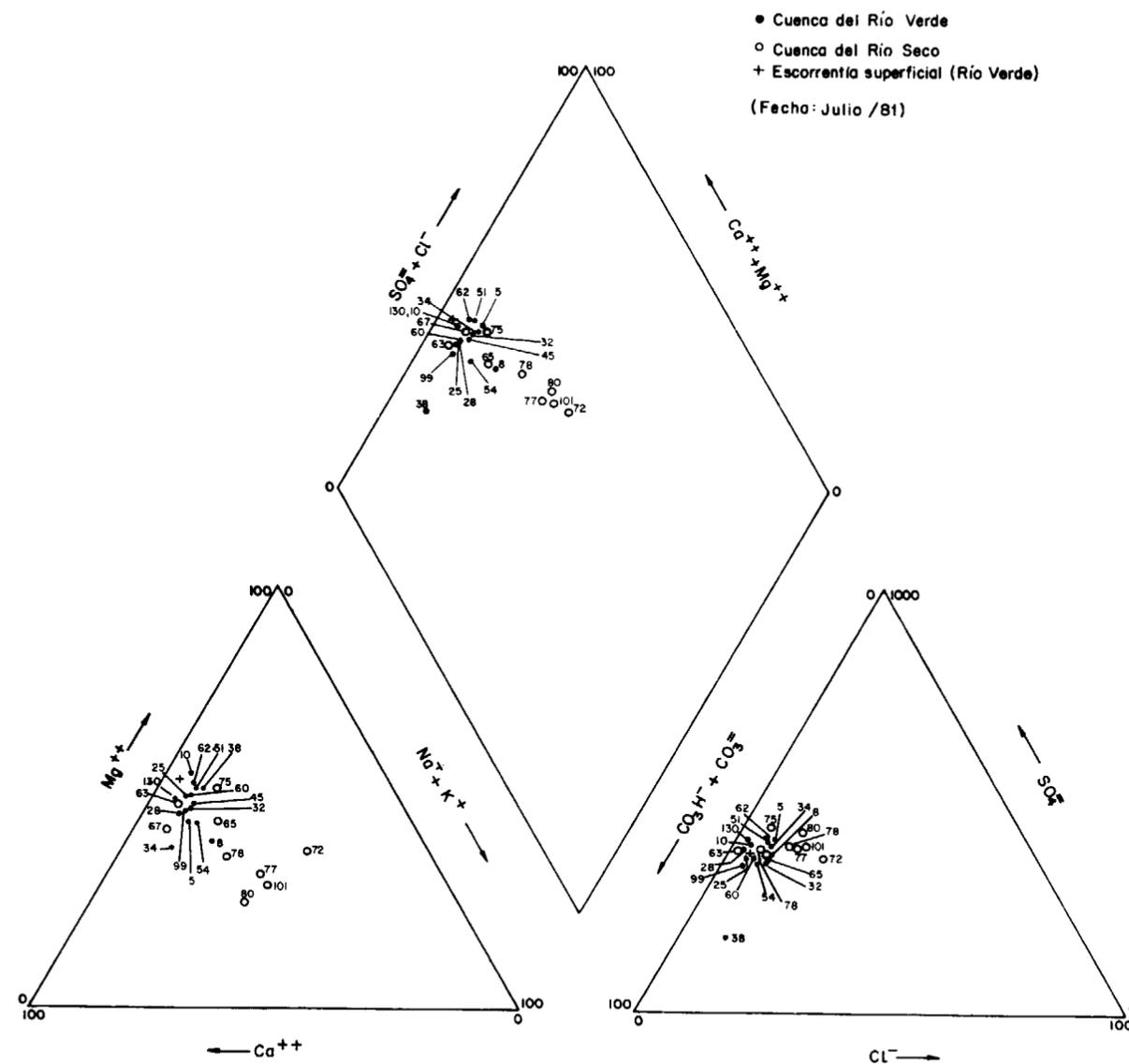


Figura 7.—Proporciones iónicas en algunos puntos del acuífero y en las aguas de escorrentía superficial.

variable en el tiempo, de dicha recarga (9-5 Hm³/año), procede de la infiltración directa del río Verde, y de los riegos efectuados a partir de sus derivaciones. La otra partida de la alimentación está relacionada estrechamente con los aportes pluviométricos directos y, de acuerdo con las características del área, aparece sujeta a una extrema variabilidad temporal (9-2 Hm³/año). La evolución, en el espacio y el tiempo, de la superficie piezométrica, ilustra respecto a la incidencia relativa de tales situaciones en el funcionamiento del acuífero.

Las extracciones del acuífero, por bombeo, pueden superar, en estos últimos años de anormal sequía, los 9 Hm³/año, muy concentradas además en el estiaje, lo que se traduce en un progresivo sobreabastamiento de los niveles piezométricos, con una afección a reservas por debajo del nivel del mar (estas últimas estimadas del orden de 5-7 Hm³, de entre los 10-15 Hm³ que corresponden al volumen almacenado para la situación del estiaje). En años de relativa abundancia de recursos superficiales, la explotación puede ser inferior a

7 Hm³/año y en tal circunstancia se producen importantes pérdidas ocultas hacia el mar.

Las características hidroquímicas originales (facies bicarbonatada cálcica y/o magnésica, con reducidos valores de mineralización), resultan idóneas para los principales usos de estas aguas subterráneas, pero el panorama puede variar por la iniciada sobreexplotación del acuífero, que puede dar lugar a la inutilización total o parcial del mismo, para abastecimiento y regadío, por efecto de la invasión salina.

De acuerdo con lo expuesto, la regulación superficial del río Verde, mediante un embalse antes de su entrada a la vega de Almuñécar, supondría una disminución de la recarga al acuífero, por lo que su realización sería incompatible con la actual explotación de aguas subterráneas en el mismo.

Nota: En octubre de 1982, hemos obtenido datos hidroquímicos, del sector central del acuífero del río Verde, los cuales denotan un notable incremento en la mineralización de las aguas subterráneas (del orden de 1.600 mg/l.), en especial en lo que a contenido de cloruros se refiere (superiores a 700 mg/l.). Recordemos que, para julio de 1981, tales valores en dicho sector eran del orden de 700 mg/l. y 30 mg/l., respectivamente. Ello obliga a considerar que el riesgo de invasión salina, que antes apuntábamos, se ha hecho realidad. Esperamos disponer de datos, hidrodinámicos e hidroquímicos, más precisos, para identificar el alcance real de este proceso, cuya investigación hemos continuado.

BIBLIOGRAFIA

- AVIDAD, J.: *Los mantos alpujarrides al SO de Sierra Nevada*. Tesis Doctoral, Univ. Bilbao, 262 pp. (1976).
- AVIDAD, J., y GARCÍA-DUEÑAS, V.: *Memoria explicativa de la Hoja núm. 1.055 (Motril) del Mapa Geológico de España a escala 1/50.000*. I. G. M. E., Madrid (1981).
- BENAVENTE, J.: *Caracterización hidrológica del alto río Verde (Otívar, Granada)*. Simp. Agua Andalucía, II: 565-578, Granada (1981).

BENAVENTE, J.: *Contribución al conocimiento hidrogeológico de los acuíferos costeros de la provincia de Granada*. Tesis Doctoral, Univ. Granada (inédita), 571 pp., Granada (1982).

BENAVENTE, J.; FERNÁNDEZ-RUBIO, R.; CASTILLO MARTÍN, A., y LOZANO VEGA, A.: *Relaciones entre acuíferos kársticos y detríticos en el sector litoral de la provincia de Granada*. Actas Reunión Monográfica sobre el Karst (Isaba, Navarra) (en prensa).

CHICA, M.; BENAVENTE, J., y FERNÁNDEZ-RUBIO, R.: *Aplicación de la geoestadística al estudio de la potencia de un acuífero detrítico. Consideraciones metodológicas*. *Tecniterrae*, 48: 42-48, Madrid (1982).

C. H. S. E.: *Estudio para la viabilidad técnico-económica del plan de aprovechamiento integral del río Verde de Almuñécar (Granada) para la mejora y ampliación de los regadíos en la cuenca*. Informe técnico (inédito), M. O. P. U. (Granada) (1974).

CUSTODIO, E.: *Evaluación y causas de la contaminación por invasión de agua marina en los acuíferos de la costa peninsular y en las áreas insulares*. Actas Jornadas sobre análisis y evolución de la contaminación de las aguas subterráneas en España, I: 447-508, Barcelona (1981).

DAVIS, S. N., y WIEST, R. DE: *Hidrogeología*. Ed. Ariel, 563 pp., Barcelona (1971).

ENADIMSA-IGME: *Estudio hidrogeológico de la cuenca Sur. Acuíferos costeros*. Informe Técnico (inédito) (1977).

ESQUITINO, F., y FERNÁNDEZ-RUBIO, R.: *Contribución al estudio hidrológico de los ríos Verde y Seco (Almuñécar, Granada)*. V Jorn. Min., Met., III: 145-161, Bilbao (1975).

FERNÁNDEZ-RUBIO, R.: *Estudio hidrogeológico de la captación existente en el Cortijo de Fuente Piedra (Almuñécar, Granada)*. Informe (inédito), Cátedra de Hidrogeología, Univ. Granada, 27 pp. (1972).

GARCÍA GARCÍA, J. L.; OLLERO, E., y BENAVENTE, J.: *Aplicación de un modelo matemático para comprobar las características hidráulicas de un acuífero aluvial (Las Angosturas, Jete, Granada)*. Simp. Agua Andalucía, II, 975-687, Granada (1981).

LÓPEZ LÓPEZ, J.: *Estudio hidrogeológico de los ríos Seco y Verde (Almuñécar, Granada)*. Trabajo monográfico (inédito), Cátedra de Hidrogeología, Univ. Granada, 112 pp. (1974).

MIJATOVIC, B., y BAKIC, M.: *Le karst du Liban. Etude de son évolution d'après les recherches Hydrogéologiques*. *Chronique d'Hydrogéologie*, 10: 95-107, BRGM, Paris (1967).

Recibido: Febrero de 1983

GEOFISICA

Consideraciones sobre algunos métodos geofísicos aplicables en la Faja pirítica.

Por A. GRANDA SANZ (*)

RESUMEN

En el momento actual se realiza sobre la Faja pirítica una notable labor de investigación minera. De alguna forma esta situación representa una fase bien definida dentro de la larga historia de la prospección en la zona, ya que los objetivos perseguidos se sitúan a mayor profundidad y dentro de modelos geológicos más complejos que los hasta ahora estudiados.

Ante esta situación es obvio que la prospección geofísica tiene un papel importante que jugar y consideramos oportuno revisar la validez y conveniencia de las técnicas tradicionales, así como señalar las características de otros métodos más avanzados y que entendemos pueden aportar soluciones al problema que se plantea.

Entre estos nuevos métodos se hace especial hincapié en el electromagnético de dominio de tiempos (o transient), en sus dos modalidades de aplicación, y también en el de polarización inducida magnética.

SUMMARY

Nowadays, a remarkable quantity of mineral exploration work is being carried out on the Faja Pirítica (Spain). This situation represents somehow a well-differentiated stage in the long history of prospection in that area, since the present targets are located at greater depths and involving more complex geological patterns than those considered up to now.

In the face of this fact, it is obvious that the geophysical prospection has an important role to play. We think it suitable to revise the validity and convenience of the traditional techniques, as well as to underline the features of more advanced methods, which we believe capable of providing solutions to the problem we are dealing with.

Among such new methods, a particular emphasis is put on that called «Time Domain EM» (Transient), in its two forms of application, and on the «Magnetic Induced Polarization», too.

1. INTRODUCCION

En el ámbito de la provincia metalogenética conocida como la faja pirítica hispano-portuguesa, impulsado por el interés económico de sus reservas de sulfuros complejos, se ha realizado un notable esfuerzo investigador a lo largo de los últimos decenios, tanto por parte de la Administración como por diversas compañías privadas.

Obviamente el conocimiento adquirido ha ido condicionando la metodología de estudio, posteriormente aplicada de una forma análoga a lo que sucede en otros campos de la ciencia.

Por otra parte, la investigación se ha extendido a objetivos de dificultad creciente al ir agotándose las zonas que podríamos llamar fáciles, y

(*) Ingeniero de Minas.

esta circunstancia ha creado de alguna manera la necesidad de desarrollo y puesta a punto de nuevas técnicas, o de incorporar nuevas ideas al conjunto de disciplinas que intervienen en la investigación.

En el momento actual existe sobre la Faja un interés destacable por parte de diversas compañías nacionales y extranjeras que desarrollan costosos programas de investigación en los que la geofísica ocupa un lugar trascendente, si no en coste, sí en cuanto a resultados esperables de cara a la mejor programación de la previsible campaña de sondeos mecánicos.

Con el presente trabajo pretendemos ofrecer una perspectiva de las posibilidades de empleo de métodos geofísicos en cada etapa, en la que los técnicos y las empresas españolas deberían

jugar un papel importante tanto por su capacidad actual como por la oportunidad de participar en el desarrollo de metodologías de vanguardia aplicables a la investigación minera en nuestro país.

2. ESTADO DE LA CUESTION

Tradicionalmente la prospección minera en la Faja pirítica se ha centrado sobre aquellas zonas del complejo volcanosedimentario donde el modelo geológico respondiera a las ideas metalogenéticas de mayor aceptación en ese momento. Así, con el transcurso del tiempo se pasó de la teoría epigenética a la singenética y dentro de ésta a un afinamiento progresivo que ha ido acotando las relaciones de mineralización en estratigrafía, vulcanismo, etc. (FEBREL, 1966; STRAUSS et al, 1974).

De acuerdo con la síntesis de las ideas anteriores se delimitaron zonas donde la cartografía geológica aconsejó centrar el mayor esfuerzo investigador: principalmente los centros de efusión del vulcanismo ácido alcalino y especialmente donde la existencia de indicios superficiales, tales como monteras oxidadas, aportó un mayor grado de interés.

Simultáneamente con estos estudios, que podríamos definir como locales, se efectuaron otros de tipo regional a través de técnicas aeroportadas, tendentes a la identificación de rasgos estructurales y a la definición de las grandes unidades litológicas. Los métodos básicos en este caso fueron el magnético y diversas variantes de los electromagnéticos. No está en nuestro ánimo abordar aquí la crítica de este tipo de trabajos, sino que vamos a centrarnos en los métodos de superficie, aunque sea únicamente en sus rasgos esenciales, con objeto de extendernos un poco más en la descripción de algunos de los métodos más recientes y que consideramos de mayor interés.

Tal interés viene apoyado por dos razones fundamentales: de una parte el avance que la Geofísica ha experimentado en los últimos diez años, tanto en instrumentación como en incorporación de nuevos métodos y tratamiento de datos, y por otro lado la circunstancia de que la investigación no se limita hoy a las zonas de afloramiento del complejo volcanosedimentario, sino que se ha extendido a áreas con una importante cobertura

de pizarras y grauwacas del Culm. Consecuentemente la mayor complejidad del modelo geológico, junto con la necesidad de investigar cada vez a más profundidad, al imponer severas limitaciones a los métodos tradicionales, obliga a la búsqueda de nuevas técnicas capaces de ofrecer soluciones a varios de los problemas planteados.

3. ESQUEMA GEOFISICO DE LA FAJA PIRITICA

Es obvio que la posibilidad de aplicación de métodos geofísicos al estudio de un problema determinado es tanto más alta cuanto mayor sea el contraste entre las propiedades físicas de los materiales en presencia.

Dentro de la Faja pirítica se dan variaciones sensibles de los parámetros siguientes:

- resistividad eléctrica,
- densidad,
- susceptibilidad magnética,
- cargabilidad.

Existe amplia experiencia de empleo de algunos de los métodos y en base a ella puede elaborarse a título orientativo la tabla núm. 1, que resume los rasgos geofísicos más representativos. Es in-

TABLA I

Parámetros físicos más representativos de la Faja Pirítica.

		RESISTIVIDAD	DENSIDAD	CARGABILIDAD	SUSCEPTIBILIDAD
		(ohm m)	(g/cm ³)		MAGNETICA (W)
CULM	PIZARRAS Y GRAUWACAS	120 - 330	2'47 - 2'75	Baja	500 X 10 ⁶ emu
	PIZARRAS CARBONOSAS	60 - 150	2'47 - 2'70	Baja a media	500 X 10 ⁶ emu
CARBONIFERO COMPLEJO VOLC. SEDIM.	VOLCANITAS BASICAS	220 - 1.200	2'68 - 3'15	Nula	2.600 X 10 ⁶ emu
	PIZARRAS TUFITICAS	150 - 250	2'50 - 2'78	Baja	500 X 10 ⁶ emu
	DISEMINACIONES DE SULFUROS	60 - 200	2'55 - 2'80	Muy elevada	120 X 10 ⁶ emu
	SULFUROS MASIVOS	< 1	4'05 - 4'92	Media a alta	25.000 X 10 ⁶ emu
	PIZARRAS GRAFITOSAS	15 - 70	2'45 - 2'72	Baja a media	500 X 10 ⁶ emu
DEV. SUPERIOR	VOLCANITAS ACIDAS	200 - 2000	2'60 - 2'93	Baja	650 X 10 ⁶ emu
	PIZARRAS Y CUARCITAS	220 - 1.300	2'47 - 2'85	Baja	400 X 10 ⁶ emu

(*) La susceptibilidad magnética es un parámetro adimensional. Al expresarla en e.m.u. se pretende únicamente facilitar la apreciación de sus variaciones en unidades homogéneas.

mediata la consideración, a la vista de esta tabla, que el método de resistividad junto con el gravimétrico ofrecen en principio las más claras posibilidades para la localización de sulfuros metálicos, y así ambos han sido los tradicionalmente utilizados.

Sin embargo, la realidad de una investigación demuestra en muchas ocasiones que los resultados geofísicos no son tan simples en su interpretación como pudiera parecer observando las asépticas cifras de la tabla núm. 1.

Es nuestra intención dejar constancia en los próximos párrafos de las limitaciones y ambigüedades interpretativas que caracterizan la metodología geofísica utilizada sobre la Faja pirítica en los últimos años. No pretendemos, en ningún caso, negar la validez y utilidad de muchos de los trabajos realizados con resultados importantes en algunas ocasiones. Sin embargo, las áreas hasta ahora estudiadas presentaban, en términos generales, un grado de dificultad sensiblemente menor que aquellas sobre las que se trabaja actualmente y es momento de hacer una revisión seria respecto al futuro de la geofísica en el suroeste.

3.1. METODOS ELECTRICOS

3.1.1. Resistividades

Nos referimos a los métodos de resistividad en cc. o a cualquier variante destinada a reflejar las condiciones eléctricas del medio rocoso utilizando la cc. como señal emisora.

Partimos de la consideración básica de que el parámetro medido o calculado a partir de los datos de campo no es la resistividad real del medio rocoso sino la «resistividad aparente» definida como una función

$$\rho_a = f(\rho_i h_i g_m G_d)$$

donde ρ_i = Resistividad real de un elemento litológico determinado.

h_i = Su espesor.

g_m = Relativo a aspectos geométricos del medio.

G_d = Constantes geométricas del dispositivo de medida.

En términos matemáticos estamos en presencia de un sistema indeterminado, del que pueden aco-

tarse las soluciones a través de condiciones adicionales, como por ejemplo incorporando datos reales de espesor y resistividad obtenidas por otros medios. Aún así quedan dos aspectos importantes por resolver como son las variables geométricas relativas al modelo geológico y al tipo y dimensiones más apropiados del dispositivo electródico de medida.

Teniendo presente la geometría irregular de las masas de sulfuros, así como su disposición subvertical en muchos casos, el problema se reduce básicamente a la localización de discontinuidades laterales de resistividad en un determinado rango de profundidad. La variante prospectiva adecuada a estos objetivos es la de Calicatas o Perfiles Eléctricos. En el planteamiento de un estudio mediante estas técnicas hay dos factores principales a tener en cuenta:

- profundidad de investigación,
- detalle requerido en la definición de anomalías.

Mientras que el primero está en relación directa con la separación entre electrodos de emisión (AB), la focalización de los datos obtenidos depende, en relación inversa, de la distancia entre electrodos de potencial (MN). Cuando la distancia AB crece sensiblemente en relación con MN es necesario aumentar ésta a fin de que la señal medida lo sea con fiabilidad porque su orden de magnitud supere claramente al ruido ambiental. Consecuentemente no resulta compatible un incremento apreciable de penetración con focalización detallada de los resultados, y por tanto ha de llegarse a una situación de compromiso entre lo teóricamente preciso y lo realmente realizable, compatible con el coste adecuado a la fase de la investigación considerada.

Estas ideas generales son aplicables a cualquiera de los diversos dispositivos tradicionalmente utilizados (fig. 1). No tiene objeto que entremos en la descripción de los mismos, pero recordamos los más corrientes, señalando características a tener en cuenta en cada caso.

Dispositivos simétricos tipo Schlumberger

Asigna las lecturas al centro del dispositivo, pero en ellas engloba los efectos de un volumen rocoso considerable en relación con la distancia MN, de forma que la definición de anomalías

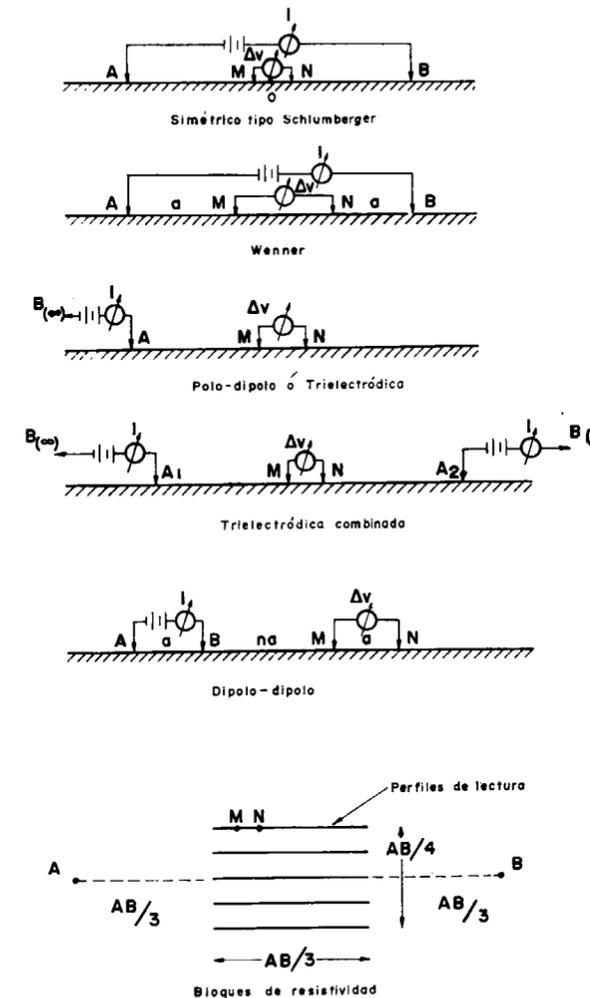


Figura 1.—Dispositivos electródicos de uso más corriente en la Faja pirítica.

no resalta nítida en la representación clásica de perfiles. Su ventaja principal radica en que el trazado de mapas de isolíneas a partir de sus datos refleja la posición de las anomalías sobre la vertical de la causa productora. Ha sido poco empleado sobre la Faja pirítica.

Dispositivo polo-dipolo

Se denomina también como trielectrónico, y se emplea preferentemente en forma combinada y con diferentes penetraciones sobre un mismo perfil. La comparación de las curvas de resistividad aparente obtenidas permite deducir aspectos relativos a buzamiento y espesor de los posibles

accidentes geológicos productores de la anomalía considerada. Esta es su principal ventaja en el aspecto interpretativo. Desde el punto de vista de la toma de datos también presenta rasgos ventajosos: de una parte, precisa menos personal, y por otro lado, el hecho de desplazar un único electrodo de emisión evita los problemas derivados de las adversas resistencias de contacto que se dan en muchos casos. Además, la aparición de falsas anomalías asociadas a la proximidad de los electrodos de emisión a contactos o accidentes litológicos se minimiza por la misma causa.

En contrapartida ha de tenerse especial precaución con la interpretación de los planos de isoresistividades obtenidas a partir de esos dispositivos. Al asignar el valor registrado al punto medio entre los electrodos de recepción se produce un desplazamiento de la anomalía en relación con la posición real del accidente que la origina. A título orientativo puede observarse la figura 2.

Dispositivo Wenner

Prácticamente nunca utilizado en la zona que nos ocupa, no presenta ninguna ventaja reseñable

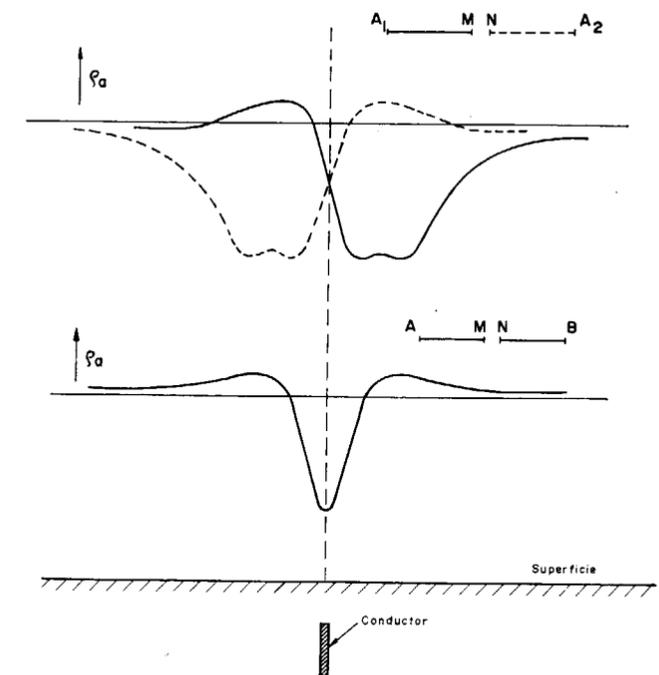


Figura 2.—Comparación de resultados para dispositivos Schlumberger y polo-dipolo.

respecto de los anteriores. En los países anglosajones es de amplia divulgación y existen varias colecciones de respuestas correspondientes a diversos modelos geológicos.

Dispositivo dipolo-dipolo

En algunas épocas se empleó con profusión. Su rasgo más característico es la forma de presentación de resultados, mediante seudosecciones que desde nuestro punto de vista ofrecen una visión confusa de las condiciones eléctricas del subsuelo. El hecho de asignar el valor de resistividad al punto de intersección de dos líneas que parten, con una inclinación de 45°, del punto medio del dispositivo emisor y receptor, respectivamente; no tiene ninguna base teórica y pese a la proliferación de modelos matemáticos es un sistema en desuso. Existen, no obstante, intentos atractivos de filtrado de los datos, tendentes a la obtención de un valor único de resistividad por punto (FRASER, 1981) que permita la elaboración de mapas de isolíneas más útiles que las seudosecciones. La toma de datos también resulta problemática cuando la separación entre dipolos supera en cuatro o cinco veces la distancia entre sus electrodos.

Bloques de resistividad

Limitan el área de toma de datos a la zona donde, teóricamente, el campo eléctrico es prácticamente uniforme con la idea de que las variaciones que en él se produzcan sean debidas a las heterogeneidades resistivas o conductoras situadas en esa zona. Su principal dificultad estriba en los enlaces entre bloques adyacentes, ya que es frecuente que la repetición de un perfil común a dos bloques contiguos produzca resultados muy diferentes según cual sea el dispositivo emisor. La aplicación de promedios o filtros matemáticos para la resolución de este extremo produce en muchos casos resultados insatisfactorios. Únicamente el método de Lotario (LOTARIO, 1978) nos parece adecuado porque se basa en datos físicos.

Otros dispositivos

Esporádicamente se han utilizado otras variantes, como pueden ser el método Lee, el Racon, el de los Sondeos Eléctricos Inclinados (que no es

otra cosa que la representación en seudosección de los datos obtenidos a partir de un dispositivo polo-dipolo, que manteniendo la distancia MN, aumenta progresivamente la penetración), etc. Su utilidad es más que discutible y no vale la pena extenderse al respecto.

3.1.2. Método del cuerpo cargado

Conocido también como «Puesta a masa», es un método que estudiando la geometría del campo establecido, al hacer pasar una corriente eléctrica a través de un medio conductor, permite conocer la continuidad del mismo así como la posible presencia de otros conductores próximos.

Pese a la simpleza de su teoría (MWENIFUMBO, 1980) su utilidad es extraordinaria cuando mediante sondeos, minados antiguos, etc., se puede acceder a una posible masa de sulfuros situando en ella un buen contacto eléctrico.

Por su sencillez y alta relación información/coste, consideramos que este método debiera ser de aplicación sistemática y rutinaria sobre cualquier sondeo que atravesase una mineralización de sulfuros complejos masivos.

3.1.3. Polarización inducida

La aplicación tradicional de este método ha sido la prospección de diseminaciones metálicas según dos variantes prospectivas:

- dominio de tiempos,
- dominio de frecuencias.

Por falta de experiencia en su aplicación y por la complejidad de su interpretación ha sido un método pobremente considerado en las escasas referencias bibliográficas existentes sobre la geofísica aplicada en el SO español.

Entendemos, y nuestra experiencia avala esta idea, que el método de PI resulta de extraordinaria utilidad en orden a comprender y justificar ciertas anomalías de resistividad, al enjuiciar conjuntamente las variaciones de dos parámetros (resistividad y cargabilidad). De esta forma se pueden diferenciar, por ejemplo, las diseminaciones asociadas a mineralizaciones masivas de aquellas otras sin interés. En este sentido consi-

deramos suficientemente ilustrativa la figura 3, que corresponde a un caso real en el área de Aznalcóllar.

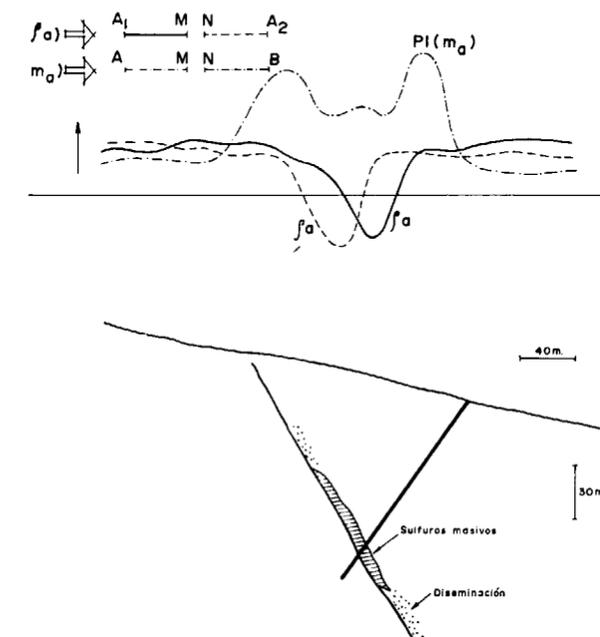


Figura 3.—Perfil de cargabilidad-resistividad.

Respecto a la posible interferencia de litologías con valores altos de cargabilidad hay que señalar que la determinación sobre muestras de cargabilidad características de las diferentes unidades litológicas presentes permite valorar adecuadamente esta circunstancia, de forma que lo que en principio pudiera parecer un inconveniente se traduce en un dato más para la interpretación global de los resultados en una determinada zona.

Aparte de estas ideas conviene señalar que la instrumentación geofísica ha avanzado espectacularmente en los últimos años desarrollando equipos que, junto con una extraordinaria potencia del emisor, presentan alta sensibilidad en el receptor. Consecuentemente permiten alcanzar mayores profundidades, aunque la capacidad de definición de una determinada anomalía viene condicionada fundamentalmente por el volumen y propiedades de la causa productora.

El coste adicional que representa respecto de una prospección convencional por resistividades puede oscilar entre un 20 o un 30 por 100 y viene

compensado con creces por los datos obtenidos en la inmensa mayoría de los casos.

3.1.4. Métodos electromagnéticos

En términos generales, y sin entrar en el enjuiciamiento de las diferentes modalidades prospectivas aplicadas, se puede afirmar que su utilización raramente ha sobrepasado el carácter de ensayo geofísico en la Faja. Naturalmente nos referimos a los métodos electromagnéticos que trabajan en el dominio de frecuencias.

Su principal limitación radica en la escasa penetración que les caracteriza y más en las condiciones del SO español, donde conocemos sobradamente la presencia de materiales conductores en superficie que acentúan esta circunstancia.

Naturalmente en el rango de profundidades en que se plantea la investigación actual es muy pobre el papel que cabe atribuir a estos métodos y más si tenemos en cuenta que en muchos casos la prospección se realiza sobre pizarras y grauwacas del Culm, claramente conductoras.

3.2. METODO GRAVIMETRICO

Es un método que se ha utilizado ampliamente, porque a nivel teórico representa la posibilidad más clara para discriminar cuando una anomalía conductora es debida a sulfuros metálicos o a pizarras carbonosas, merced al amplio contraste de densidad que existe entre ambos tipos de materiales.

Cuando se trata de grandes masas relativamente próximas a superficie, la anomalía gravimétrica que originan puede oscilar en algunos casos entre 1,5 y 2 mgals, siendo entonces relativamente fácil su interpretación. Desgraciadamente cuando, para una misma masa, se incrementa la profundidad de enterramiento sucede que la intensidad de la anomalía decrece drásticamente, pudiendo llegar ésta a quedar enmascarada por otros efectos de tipo litológico o estructural (ver fig. 4).

Sin embargo, lo realmente crítico en este sentido es la corrección de relieve; dando por sentada la calidad del gravímetro y del levantamiento topográfico. Habitualmente este proceso se ha realizado a mano mediante las plantillas de Hammer y utilizando los planos adecuados. Ha-

cerlo manualmente es tanto como decir subjetivamente y esto conlleva un error importante en muchos casos, ya que su magnitud puede llegar a algunas decenas de cmgales.

Es relativamente frecuente que la corrección topográfica en algunos puntos sobrepase 1 mgal y consecuentemente su error absoluto puede superar los 0,20 mgal. Considerando tres zonas con diversa dificultad topográfica: alta, intermedia y baja, hemos obtenido, al realizar las correcciones topográficas por cuatro personas diferentes, las variaciones representadas en la figura 5. El valor de estos datos puede juzgarse en términos comparativos si se tiene en cuenta que el yacimiento de Neves-Corvo (Portugal) viene definido por una anomalía de 0,30 mgales.

Por todas estas circunstancias y teniendo en cuenta que la topografía de la Faja pirítica es abrupta, especialmente en relación con el complejo volcánico, se plantea como cuestión ineludible el adecuado cálculo de las correcciones topográficas. El camino es claro: digitalización de los planos y procesado automático de los mismos, pero de acuerdo con un programa correcto, porque sólo existe una cosa peor que la corrección manual, y es la corrección automática chapuceara, fácil de hacer, por cierto.

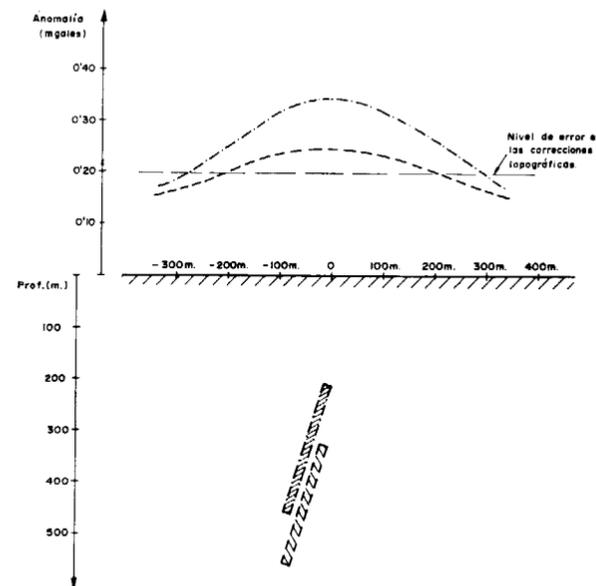


Figura 4.—Efecto de la profundidad en una anomalía gravimétrica típica del SO.

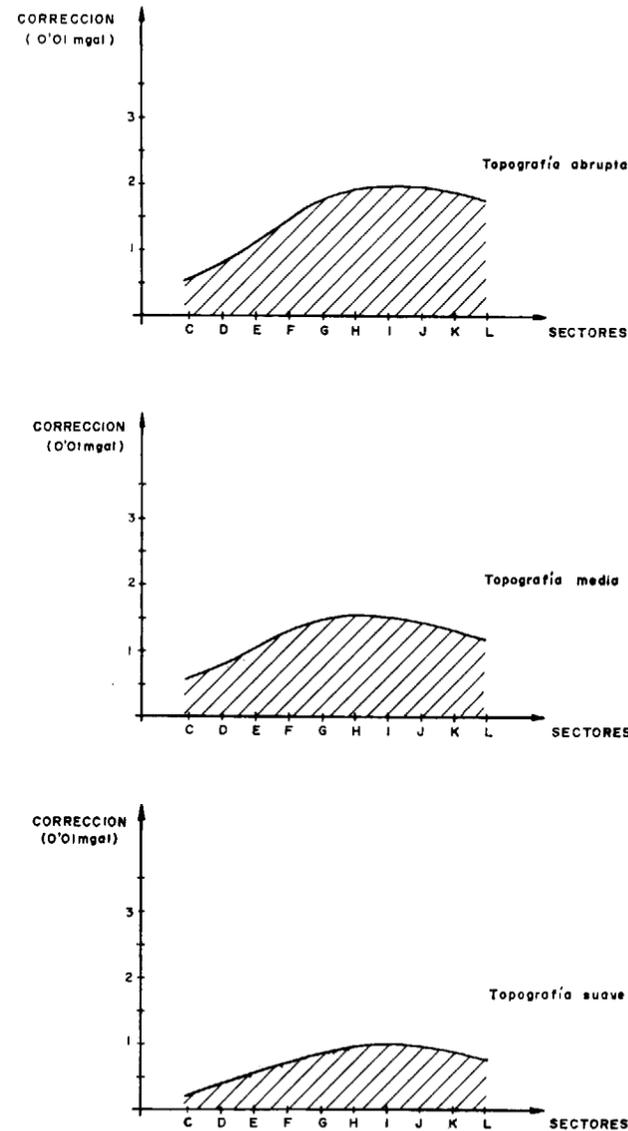


Figura 5.—Errores de corrección topográfica.

En el aspecto interpretativo existe también un compromiso importante por parte del geofísico, que en ningún caso puede limitarse a presentar como resultado final de su trabajo un mapa de Bouguer. La interpretación cuantitativa de anomalías es necesaria, pero siempre con el apoyo geológico capaz de dar sentido físico a unos resultados asépticos por sí mismos.

Naturalmente propugnamos la aplicación selectiva del método gravimétrico en la Faja pirítica, pero siempre teniendo muy presentes los condicionantes topográficos y planteando su aplicación

sobre aquellas zonas donde la presencia de anomalías conductoras aporte un mayor grado de interés.

En cualquier caso es una cuestión discutible si el método base en una prospección en la Faja ha de ser el gravimétrico o ha de tener carácter complementario. Cada caso particular puede condicionar el establecimiento de unas preferencias que quedan al margen del presente trabajo.

4. NUEVOS METODOS GEOFISICOS

Podría resumirse el objetivo fundamental de la actual investigación geofísica de la Faja pirítica en la localización de heterogeneidades conductoras a profundidades del orden, o mayores de 200 metros, y con una cobertera de baja resistividad en muchos casos.

Entendemos que son dos los métodos de superficie aplicables al respecto y pretendemos reseñar alguna de sus características fundamentales en orden a tratar de que su divulgación contribuya a potenciar su aplicación, desde el convencimiento de su utilidad:

- Método de la polarización inducida magnética.
- Método electromagnético de dominio de tiempos.

De este último existe una variante para su aplicación sobre sondeos mecánicos de indudable interés y que será objeto del oportuno comentario.

4.1. POLARIZACION INDUCIDA MAGNETICA

Las corrientes de polarización inducida (SEIGEL, 1974) que se establecen en los medios rocosos polarizables dan origen a dos métodos básicos de prospección:

- a) Polarización inducida clásica (PI), cuando se estudia únicamente el campo eléctrico asociado a las citadas corrientes.
- b) Polarización inducida magnética (MIP), cuando se deducen aspectos del medio a través de la medida del campo magnético asociado a las corrientes de polarización.

A pesar de que ambos métodos se apoyan en el mismo fenómeno, existen diferencias significativas entre ellos tanto en la teoría como en la práctica. Tales diferencias se traducen en ventajas relativas de uno u otro, dependiendo de los aspectos particulares del problema considerado.

En este sentido la ventaja más significativa del método MIP, en su facilidad para aportar información cuando existe un recubrimiento conductor, cuyo efecto es sobradamente conocido limitando enormemente la penetración de los métodos eléctricos y electromagnéticos clásicos. Desgraciadamente esta circunstancia es frecuente en la Faja pirítica y se da siempre que se investiga bajo el Culm.

Complementariamente, el método MIP presenta otros dos aspectos importantes de cara a la prospección de sulfuros. Por una parte su respuesta es únicamente representativa de inhomogeneidades laterales en las propiedades eléctricas del medio considerado. Si éste estuviera uniformemente estratificado, siendo los únicos contrastes de resistividad los existentes entre capas, no cabría esperar ningún tipo de respuesta del sistema. Las masas sulfurosas de la Faja representan siempre una heterogeneidad lateral, consecuentemente queda justificada la aplicación del método en este sentido. En segundo lugar conviene señalar que las medidas del MIP tienen un carácter prácticamente puntual, ya que la dimensión del sensor magnético es muy reducida, a diferencia de la PI clásica en que la distancia entre electrodos de recepción provoca el que en cada lectura se engloben efectos con la consiguiente pérdida de detalle. En otras palabras, el poder resolutivo del método MIP es sensiblemente mayor que el de la PI convencional. No obstante, la capacidad de resolución de ésta puede incrementarse reduciendo la distancia entre electrodos de recepción, aunque con la consiguiente pérdida de intensidad en la señal.

La aplicación del método se realiza haciendo circular una corriente a través de dos electrodos situados sobre el terreno y midiendo el campo magnético debido a la corriente eléctrica establecida en el mismo. Se ilustra el fenómeno en la figura 6, siendo el campo magnético observado resultante de dos partes:

- a) campo primario debido al flujo de corriente de excitación, y
- b) campo magnético causado por las características polarizables del terreno.

Tal como se representa en la figura 7, la respuesta es realmente compleja, ya que las corrientes que genera tal campo magnético difieren en polaridad en las distintas regiones del espacio y esto se traduce en cambios de signo en la respuesta del MIP. No existen publicadas colecciones de curvas patrón, sobre modelos sencillos, sino ejemplos dispersos, como, por ejemplo, los presentados por HOWLAND-ROSE et al. (1980).

Para la toma de datos de campo se establece el dispositivo emisor de forma tal que las líneas de corriente sean sensiblemente paralelas al rumbo esperado de las supuestas masas conductoras y situando los electrodos lo más próximo posible a los horizontes de interés si éstos afloran.

A lo largo de perfiles perpendiculares a la línea de unión entre los electrodos de emisión se mide el campo magnético horizontal a intervalos tan apretados como el detalle requerido por la investigación imponga.

4.1.1. Parámetros del método

Independientemente de que se trabaje en dominio de tiempos o dominio de frecuencias existe un dato básico, que es el *campo magnético primario normalizado* H_N , definido también como la amplitud normalizada.

$$H_N = \frac{H_p}{H_{norm}} \times 100$$

donde,

H_p = campo magnético primario observado,
 H_{norm} = campo magnético correspondiente a un medio uniforme y que puede ser obtenido a través de las expresiones siguientes (EDWARDS, 1974):

$$(H_p)_x = \frac{I_y}{4\pi(x^2 + y^2)}$$

$$(H_p)_y = \frac{I_x}{4\pi(x^2 + y^2)}$$

Como regla general, H_N presenta un máximo sobre las heterogeneidades conductoras para modelos geológicos sencillos.

4.1.1.1. Dominio de frecuencias

Habitualmente es en esta modalidad como se realizan la mayoría de las prospecciones por ra-

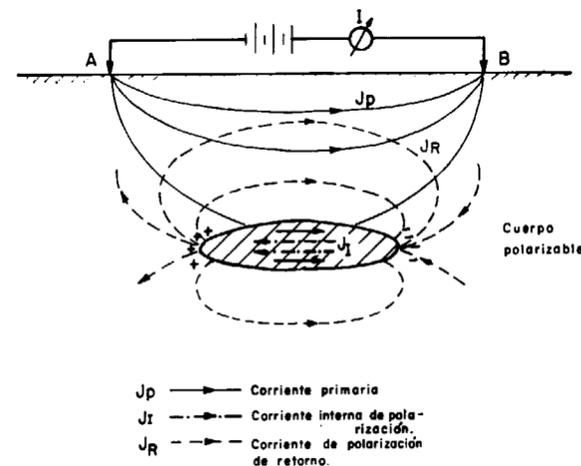


Figura 6.—Distribución de corrientes en torno a un cuerpo polarizable.

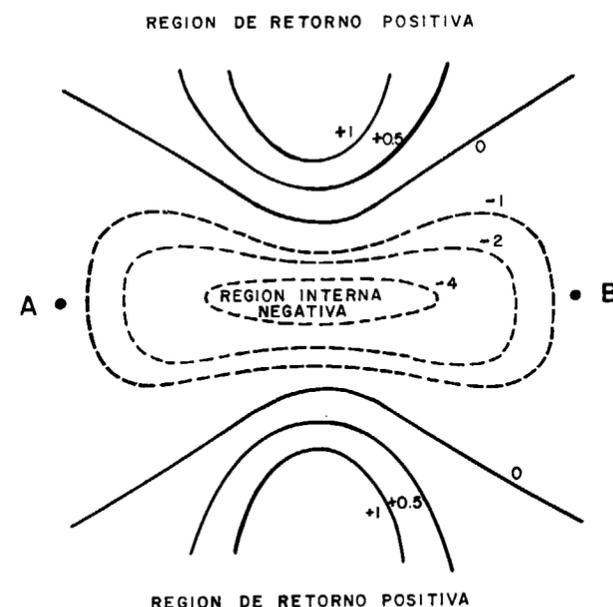


Figura 7.—Componente horizontal del campo magnético de polarización, H_s perpendicular a la línea que une los electrodos de emisión.

zones que no viene al caso comentar (SEARA, 1982).

Los parámetros medidos en el dominio de frecuencias están relacionados con la variación de la resistividad compleja con la frecuencia, y son dos fundamentalmente: desfase relativo (RPS) y efecto de frecuencia porcentual (PFE), que se definen por las expresiones que comentamos a continuación:

$$RPS = 3\theta_f - \theta_{3f}$$

siendo θ_f y θ_{3f} los desfases correspondientes a la frecuencia fundamental y al tercer armónico de la onda cuadrada de excitación. De forma aproximada puede utilizarse el valor 2θ en la región comprendida entre la frecuencia fundamental y el tercer armónico:

$$PFE = \frac{A_1 - 3A_3}{3A_3} \times 100$$

A_1 y A_3 son las amplitudes de la fundamental y del tercer armónico de la onda cuadrada recibida.

La presencia de cuerpos polarizables se manifiesta mediante valores negativos de PFE y positivos de RPS.

En zonas donde existen heterogeneidades conductoras de considerable dimensión, o bien en las proximidades de los electrodos de emisión, donde el campo primario H_p presenta un acusado gradiente, es interesante representar los campos secundarios originados por las corrientes de polarización definidos como cambio en cuadratura H_{sq} y cambio en fase ΔH_{sp} . Las expresiones que definen ambos parámetros son:

$$H_{sq} = \frac{H_p}{I} \times \text{sen} \frac{RPS}{2} \times K_1$$

$$H_{sp} = \frac{H_p}{I} \times \frac{PFE}{100} \times K_2$$

(en miligammas por amperio)

Sintetizando el tipo de respuesta que, a nivel teórico, puede deducirse sobre un modelo geológico sencillo, puede observarse la figura 8 que correspondería a una mineralización filoniana de sulfuros semimasivos encajada en materiales de conductividad media-baja.

4.1.1.2. Dominio de tiempos

Aunque su empleo es ciertamente limitado, conviene conocer la forma de presentación de resultados cuando se trabaja en esta modalidad. Son dos los parámetros que se manejan, ligados ambos por la relación:

$$H_{si} = (H_p/I) \times m_i \times 1.000$$

(en miligammas/amp.)

H_{si} representa el transitorio normalizado respecto a la intensidad de excitación y correspondiente a la rebanada i de la curva de descarga, y m_i la cargabilidad aparente medida sobre la misma rebanada.

Usualmente se representan tanto las variaciones de m_i como las de H_{si} , siendo estas últimas generalmente más sencillas para su interpretación.

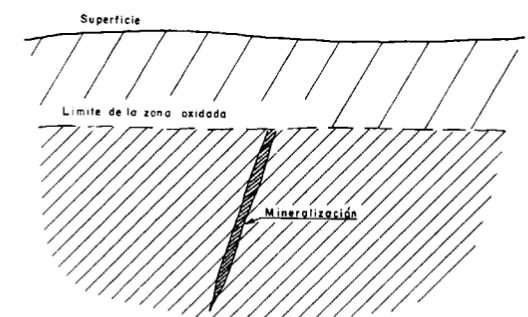
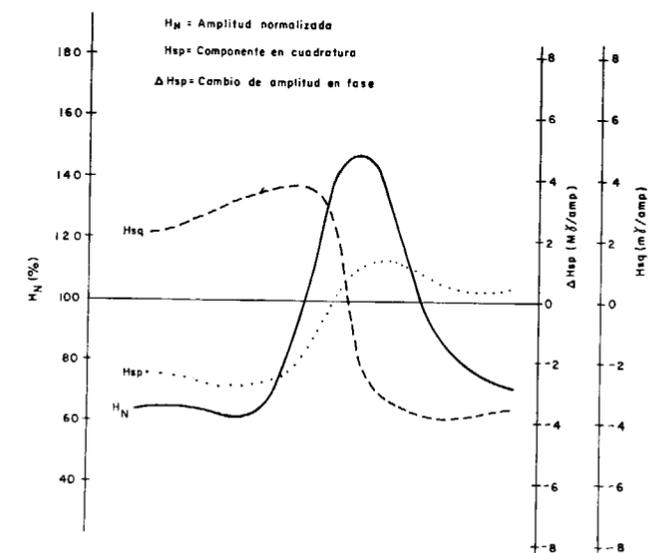


Figura 8.—Respuesta tipo en el dominio de frecuencias.

La mayor utilidad de los valores de m_i está en la posible reconstrucción y análisis de la curva de descarga, ya que cuando éstas presentan una pequeña constante de tiempo se asocian a causas productoras con reducido tamaño de partícula. El caso contrario se da cuando la curva de descarga tiene una constante de tiempo grande, pudiendo valorarse esta circunstancia a través de relaciones tales como:

$$m_{i+n} - m_i,$$

o bien,

$$(m_{i+n} - m_i)/m_i.$$

No puede darse ninguna regla general respecto al estilo y comportamiento de las curvas de Hsi en relación con una posible zona mineralizada. En el citado trabajo de HOWLAND-ROSE (1980) se presentan ejemplos significativos al respecto.

De cualquier forma, lo más importante en este sentido es la presencia de una anomalía, independientemente de su signo, que interpretada conjuntamente con el apoyo de otros datos geofísicos o geológicos permita alcanzar los objetivos básicos de todo trabajo de prospección: obtener la información precisa en cada fase para optimizar las siguientes.

4.2. METODO ELECTROMAGNETICO DE DOMINIO DE TIEMPO

En diversas referencias bibliográficas y en argot geofísico se define normalmente como «transient» o «pulse». Su aplicación en la Unión Soviética a lo largo de más de quince años, así como en Occidente en los últimos dos o tres, ha demostrado sus enormes posibilidades en la detección de elementos conductores merced a su alta capacidad resolutive en presencia de ruido geológico y la gran penetración que puede alcanzar aún en ambientes conductores (KAUFMAN, 1978).

La explicación de las características básicas del sistema puede hacerse mediante la figura 9: A través del adecuado transmisor, se introduce en el terreno una señal en la que se diferencian dos periodos, según ésta sea cero o distinta a cero. De acuerdo con la Ley de Faraday, cuando la corriente en el transmisor varía con el tiempo, aparece una inducción electromagnética en el medio afectado. Tal inducción genera corrientes de Eddy,

tanto en la roca encajante como en el posible elemento conductor, y estas corrientes, que varían con el tiempo, dan origen a un campo magnético secundario que también depende del tiempo y que puede medirse como una fuerza electromotriz (fem) a través de las bobinas receptoras del sistema adecuado. Estas medidas se realizan durante el período en que la señal de excitación pasa por cero.

De una forma simplificada, la fem medida puede considerarse como suma de los componentes, que corresponden respectivamente al efecto de la roca encajante y del supuesto objetivo conductor.

$$fem_{rec.} = fem_{rc} + fem_{obj.}$$

En orden a valorar adecuadamente los resultados de un caso determinado se hace preciso disponer de los medios matemáticos convenientes para separar ambos efectos. Hoy, el tema está resuelto y a modo de ejemplo incluimos en la figura 10 la respuesta correspondiente a un medio uniforme. Análogamente puede calcularse la correspondiente a medios estratificados con mayor o menor complejidad, representándose la fem a lo largo de perfiles separando las dos compo-

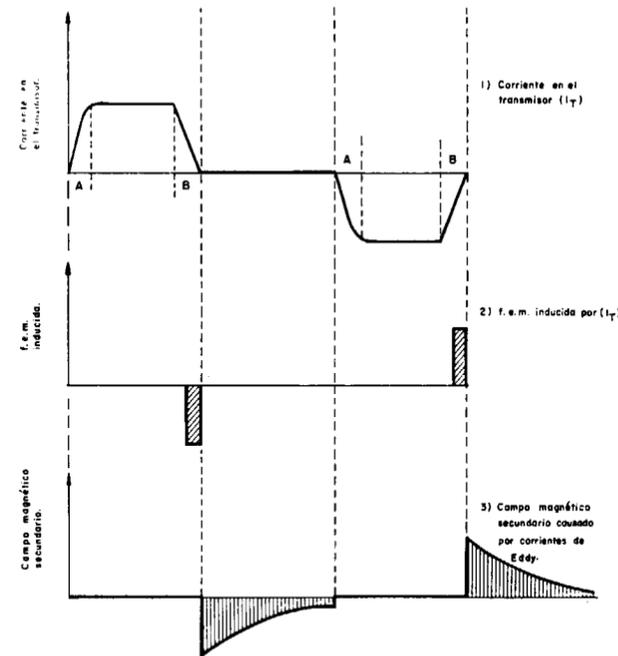


Figura 9.—Relaciones básicas del método electromagnético de dominio de tiempos.

nentes debidas al campo magnético vertical B_z y al horizontal B_x .

Sobre la citada figura puede observarse que la fem debida a B_x pasa por cero sobre el centro del bucle emisor, presentando un máximo y un mínimo a ambos lados del bucle y tendiendo a cero al incrementar la distancia. La fem debida a B_z tiene un mínimo en correspondencia con el centro del bucle emisor, dos máximos a ambos lados y tiende a cero al alejarse del mismo.

Cuando se incrementa el tiempo al que se toman las lecturas, manteniéndose el estilo de las curvas, éstas se hacen más suaves.

Respecto al comportamiento de la fem debida a los conductores confinados, existen algunas comunicaciones importantes (MCNEILL, 1982, y KAUFMAN, 1978), siendo las principales ideas las que se exponen a continuación y que parten del hecho fundamental de que las corrientes de inducción tienden a distribuirse hacia el interior del cuerpo conductor al incrementarse el tiempo transcurrido desde el establecimiento de las citadas corrientes.

Todas las componentes del campo magnético secundario pueden expresarse como una suma de exponenciales:

$$H(t) = H_0 \sum^n d_n \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_n}\right)$$

siendo:

$H(t)$ la componente del campo magnético secundario,

H_0 la correspondiente de campo primario,

τ_i son constantes de tiempo que dependen de los parámetros geoelectrónicos del cuerpo mineralizado y de su forma y dimensiones, tomando el mismo valor para cualquier componente del campo magnético,

t es el tiempo transcurrido desde que la señal emisora se hace cero hasta que se toma la medida correspondiente,

d_i son parámetros relacionados con las dimensiones del conductor, así como con su posición relativa respecto a transmisor y receptor.

A lo largo de una respuesta transitoria típica pueden distinguirse tres zonas características (figura 11):

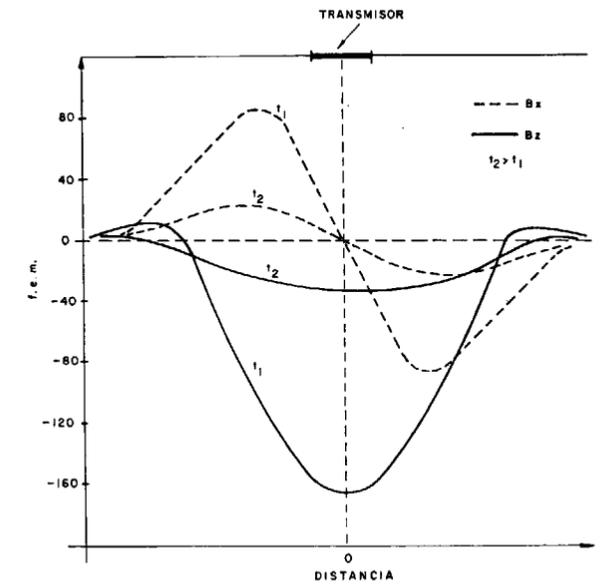


Figura 10.—Comportamiento de la f.e.m. sobre un medio uniforme.

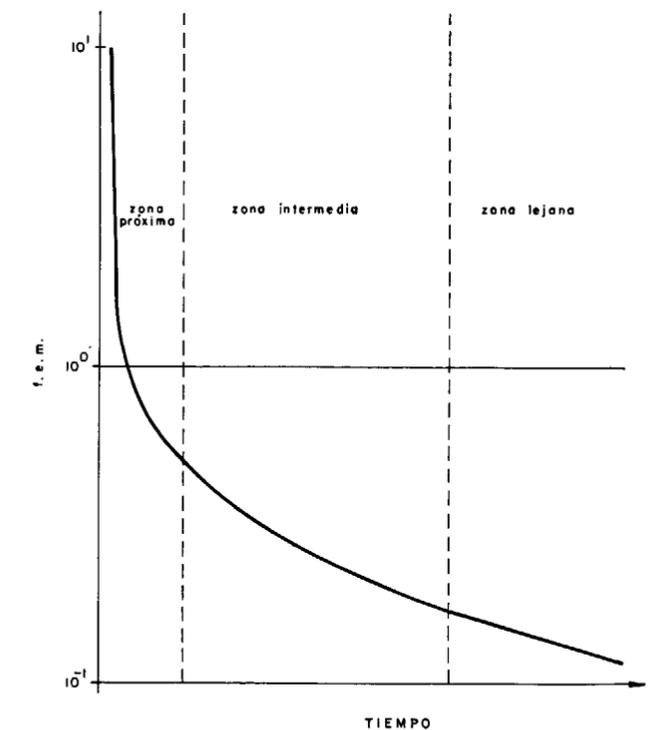


Figura 11.—F.e.m. originada por corrientes en un elemento conductor, en función del tiempo.

- a) Zona próxima;
- b) Zona intermedia, y
- c) Zona lejana.

En la zona próxima el campo magnético puede expresarse como:

$$H(t) = H_0 \sum^n d_n = d_1 + d_2 + \dots + d_n$$

lo que nos viene a indicar que éste no depende de la resistividad del supuesto elemento conductor. Físicamente la justificación radica en el hecho de que las corrientes inducidas se concentran principalmente en la superficie del mismo.

Al pasar al estado intermedio, el comportamiento de cualquier componente viene dado por la expresión:

$$H(t) = H_0 d_1 \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) \quad \text{para } t > \tau_1$$

de la que pueden deducirse las siguientes conclusiones:

- 1.ª $H_0 d_1$ depende de los parámetros geométricos del objetivo conductor y de las posiciones de emisor y receptor.
- 2.ª El factor $(-t/\tau_1)$ es función de las características geoelectricas del elemento conductor y del tiempo.

Desde el punto de vista físico, la justificación de esta expresión radica en el hecho de que al aumentar el tiempo las corrientes inducidas tienden a distribuirse hacia el interior de la heterogeneidad conductora.

Al pasar a la zona lejana, la fem medida en la bobina receptora y debida a las corrientes de Eddy en el objetivo es de la forma:

$$fem = \mu H_0 M \frac{d_1}{\tau_1} \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right)$$

siendo:

μ la susceptibilidad magnética,

M el momento receptor,

τ_1 puede obtenerse como pendiente de la curva en la zona lejana, es decir, en función no del valor absoluto de la señal, sino de su variación temporal.

Por otra parte, τ_1 depende de factores geométricos y de conductividad del objetivo y puede determinarse mediante cálculo para formas geométricas sencillas.

Una vez definido este parámetro se puede calcular la variación espacial de la fem inducida en cuerpos conductores confinados a lo largo de perfiles representativos.

Puede observarse en la figura 12 cómo esta respuesta es a veces ciertamente similar a la correspondiente a un medio homogéneo y aquí radica uno de los argumentos fundamentales de los críticos del método: Probable ambigüedad en la separación de los efectos debidos a un medio homogéneo de aquellos otros originados por heterogeneidades conductoras. Únicamente a través de cálculos complejos puede salvarse esta dualidad, pero actualmente las posibilidades de la informática son muy amplias y cabe mirar esperanzadoramente al futuro en este campo.

No conocemos ningún trabajo realizado en España por el método que comentamos y consecuentemente hemos de limitarnos a señalar que la mayoría de las aplicaciones publicadas se refieren a mineralizaciones metálicas masivas o filonianas situadas por debajo de 200-300 metros de profundidad (HOESTRA, P., 1982; CRONE, D., 1981; etc.).

Poco más hay que decir, en consecuencia, respecto a las posibilidades del método dentro de los actuales objetivos en la Faja pirítica.

4.2.1. Electromagnético de dominio de tiempo en sondeos

Esta variante, desarrollada en Canadá en los últimos años, permite conocer la entidad de un conductor metálico atravesado por un sondeo, o bien la localización de tal conductor cuando el sondeo no le intersecta y se sitúa en sus proximidades.

No vamos a entrar en aspectos teóricos del método porque básicamente quedaron comentados en el apartado anterior, únicamente pretendemos señalar sus características más destacables y que entendemos son del mayor interés.

Efectivamente, el método es capaz de diferenciar, para una masa dada, atravesada por el son-

considerables produce un campo secundario intenso y sobre una amplia gama de frecuencias, cosa que no sucede para pequeñas mineralizaciones y esta es otra de las características importantes que este método es capaz de poner de manifiesto.

La aplicación práctica del método se realiza estableciendo en superficie un bucle emisor de dimensiones variables en función de la profundidad a investigar (un bucle de 100x100 m. es suficiente para profundidades de 500 m.), a través del que se hace circular una corriente primaria de una frecuencia determinada midiéndose el campo secundario a través del adecuado dispositivo que se corre a lo largo del sondeo.

Generalmente el estudio completo del entorno de un sondeo se realiza por medidas sucesivas, en las que se varía la situación del bucle emisor hasta un máximo de cinco posiciones (ver figura 13). De esta forma puede definirse los aspectos geométricos más relevantes del hipotético conductor. Cuando éste es de tipo tabular la respuesta del método cambia en amplitud, pero no en su forma general, cada vez que se modifica la posición del emisor. Por el contrario, en cuerpos irregulares pueden darse variaciones sensibles tanto en la amplitud como en la forma de la respuesta proporcionada por el sistema.

Para el estudio detallado de un área determinada, la forma habitual de trabajo consiste en utilizar las respuestas obtenidas en varios sondeos para una misma posición del emisor y por comparación entre ellas deducir las conclusiones oportunas teniendo presentes los modelos sencillos que se incluyen en la figura 14 y cuyas características son las siguientes: Los sondeos tipo 1 que atraviesan la parte central de conductor presentan una amplia anomalía positiva con una ligera inflexión sobre la vertical del centro de la masa.

Cuando el sondeo toca a ésta en su extremo se puede apreciar en la respuesta del método una aguda anomalía negativa que refleja fielmente la posición del conductor. Es el caso del sondeo 2 en la citada figura.

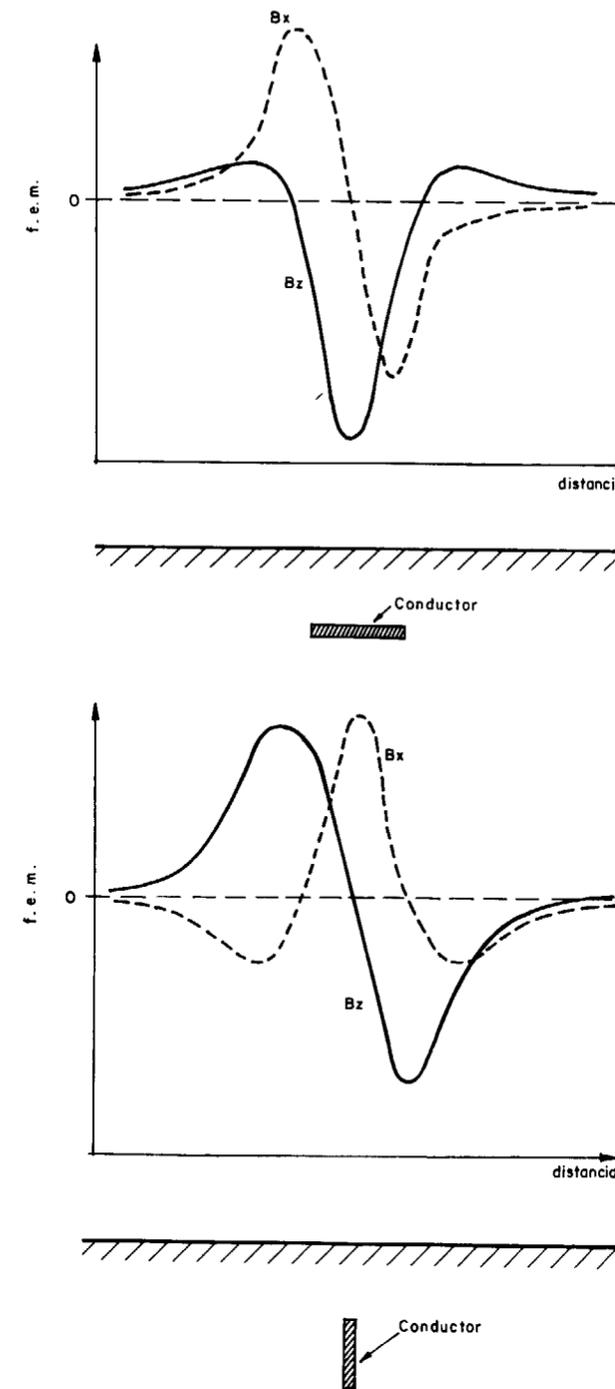


Figura 12.—F.e.m. inducida en conductores confinados.

deo sobre el que se aplica, si tal sondeo se encuentra en la zona central o en los bordes de la misma. Si la masa metálica es de dimensiones

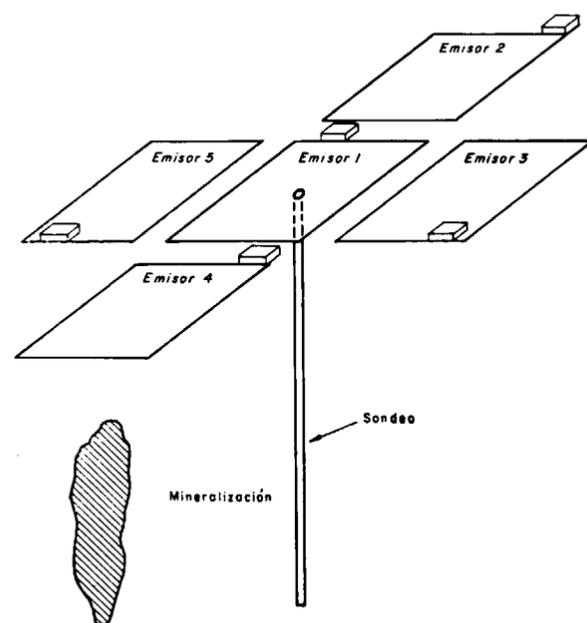


Figura 13.—Dispositivos de medida en el método «EM transient» en sondeos.

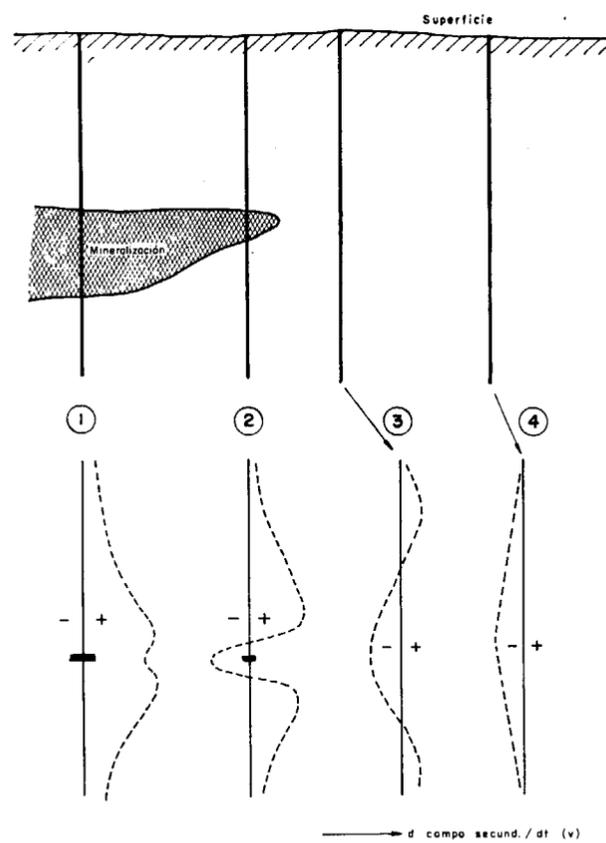


Figura 14.—Respuestas tipo del método «EM transient» en sondeos.

Para los sondeos situados fuera del conductor lo más característico es la presencia de una anomalía negativa tanto más débil cuanto más alejado esté. Si se sitúa a cierta proximidad, tal anomalía aparece flanqueada por dos positivas.

Durante la ejecución práctica de una prospección determinada es habitual el muestreo del campo secundario en diferentes tiempos, presentándose conjuntamente toda la serie de respuestas que normalmente mantienen su estilo y varían su intensidad en función del tiempo.

Existen casos muy interesantes en las escasas referencias bibliográficas sobre el sistema. A título de ejemplo por su espectacularidad se podría citar la detección en Dufaut (Canadá) de una masa situada entre dos sondeos distantes 120 m., y de 1.000 m. cada uno. La masa se encuentra a 1.060 m. de profundidad y tiene una corrida de 87 m.

En función de todas las características señaladas, consideramos que su empleo sobre sondeos profundos es fundamental en orden a hacer que la inversión que éstos conllevan nos permita obtener el máximo de información objetiva con un coste adicional despreciable.

Pudiendo disponerse de este tipo de herramientas resulta difícilmente defendible la idea de limitar los resultados de una campaña de sondeos a la simple descripción litológica de sus testigos, aunque vaya complementada por los adecuados análisis químicos, petrográficos o de cualquier otro tipo.

5. CONSIDERACIONES FINALES

La idea fundamental que ha animado las escasas páginas del presente trabajo no es otra que tratar de romper una cierta inercia existente actualmente en la aplicación de la prospección geofísica dentro de la investigación minera de la Faja pirítica.

Por una parte, es obvio que se hace poca geofísica; algunas compañías privadas son una honrosa excepción; pero no es menos grave que una parte importante de la que se realiza aplica técnicas de muy dudosa efectividad respecto a los objetivos que hoy se plantean. No significa esto, ni mucho menos, que no puedan ser útiles en otros casos.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Complemento necesario a una crítica constructiva es la oferta de soluciones y en esta línea situamos la breve descripción de los métodos de Polarización Inducida Magnética (MIP) y Electromagnético de dominio de tiempos.

No vale la pena comentar que la exposición de los aspectos teóricos podría extenderse y ganar en detalle y claridad y también podría hablarse de las características de los equipos que el mercado ofrece y de otros aspectos intrascendentes. Sin embargo, esta publicación no va dirigida a geofísicos (que suponemos perfectamente al día de los temas tratados), sino a profesionales del área de la investigación minera, a los que a veces no llega la suficiente información respecto a una herramienta tan necesaria como es la Geofísica.

Es mi esperanza que se me enjuicie desde esta perspectiva para que los fallos de este trabajo sean disculpados y se valore fundamentalmente la buena voluntad informativa.

AGRADECIMIENTO

A todo sufrido lector capaz de aguantar hasta aquí.

CRONE, D.: *The use of high-powered pulse EM methods in deep exploration for conductive bodies*. Crone Geophysies Ltd., Informe interno (1981).
 FEBREL: *Mapa geológico de España 1:50.000. Hoja núm. 959, Calañar*. IGME (1966).
 FRASER, D. C.: *Contour map presentation of dipole-dipole induced polarization data*. Geophysical Prospecting número 29, págs. 639-651 (1981).
 HOESTRA, P.: *Exploration for conductive targets with transient electromagnetic system*. 52th Meeting SEG, Dallas (1982).
 HOWLAND-ROSE et al: *Some recent magnetic induced polarization developments*. Geophysics V, 45, págs. 37-54 (1980).
 KAUFFMAN, A.: *Frecuency and transient responses of electromagnetic field created by currents in confined conductors*. Geophysics V, 43, págs. 1002-1010. (1978).
 LOTARIO: *Informe interno del Centro de Estudios Geotérmicos de AGIP*. San Donato (Milán) (1978).
 MCNEILL, J. D.: *Applications of transient electromagnetic techniques*. 52th Meeting SEG, Dallas (1982).
 MWENIFUMBO, C. J.: *Interpretation of mise-a-la-mase data for vein type bodies*. Thesis. University of Western Ontario (1980).
 SEARA, J. L.: *Comunicación personal* (1982).
 SEIGEL, H.: *The magnetic induced polarization method*. Geophysics V, 39, págs. 321-339 (1974).
 STRAUSS et al: *La Faja Pirítica Hispano-Portuguesa y el papel de la Geología en su prospección minera*. Industria Minera, núm. 149, págs. 3-12 (1974).

Recibido: Marzo 1983

GEOTECNIA

Análisis del sistema poroso en materiales graníticos

Por J. ORDAZ (*); R. M. ESBERT (*) y L. M. SUAREZ DEL RIO (*)

RESUMEN

Se estudia el sistema poroso de tres variedades de granitos industriales de Galicia. El análisis cualitativo de poros y microfisuras se realiza mediante técnicas microscópicas específicas (fluorescencia en luz transmitida y microscopía electrónica de barrido, fundamentalmente). Se correlacionan dichas observaciones directas con medidas de algunas propiedades físicas (porosidad, permeabilidad, etc.). Las microcavidades en las plagioclasas son analizadas en relación a su alteración. Se deduce que la durabilidad potencial de estos granitos es, en gran medida, función de la densidad de microfisuración y del grado de conectividad del sistema poroso.

ABSTRACT

Pore system of three industrial granite varieties from Galicia (NW of Spain) is studied. Qualitative analysis of pores and microfissures is carried out by means of specific microscopical techniques (light-transmitted fluorescence and scanning electron microscopy, basically). Those direct observations are correlated with measures of some physical properties (porosity, permeability, etc.). Microcavities in plagioclase are analyzed according to their alteration. It is deduced that potential durability of these granites is mainly dependent of the microfissuration density and the pore system's connectivity.

1. INTRODUCCION

Este estudio presenta un análisis detallado de aquellas características propias de los materiales rocosos, a escala de «roca matriz», de mayor influencia respecto a su durabilidad, y que condicionan, asimismo, su ulterior utilización como material de construcción, especialmente con fines ornamentales.

Características petrográficas como la mineralogía, la textura y el grado de alteración son descritas de forma detallada debido a su influencia en el control de dicha durabilidad, resaltando que, desde el punto de vista físico del comportamiento del material rocoso, los espacios vacíos, como componentes texturales, son tanto o más importantes que los propios minerales. De aquí que la caracterización detallada del sistema poroso resulte imprescindible para cualificar la evolución futura del material puesto en obra.

(*) Departamento de Petrología y Geoquímica, Facultad de Geología. Universidad de Oviedo.

Se resaltan de manera especial aquellas técnicas microscópicas específicas (por ejemplo, microscopía de fluorescencia y microscopía electrónica de barrido) idóneas para la observación del «espacio poroso», haciendo especial énfasis en los procesos de preparación de muestras, encaminados a conseguir una visualización óptima de dichos vacíos.

Estas observaciones son complementadas con medidas de propiedades físicas elementales, referidas fundamentalmente a la absorción y circulación de fluidos por el interior de la roca, y por tanto, relacionadas directamente con su alterabilidad potencial.

Para la aplicación de los criterios que se acaban de exponer se han seleccionado tres granitoides hercínicos de Galicia, utilizados como rocas industriales y que reciben los nombres de Granitos Albero, Gallo y Guitiriz. Sus canteras están situadas, respectivamente, en Tuy, Gondomar (Pontevedra) y Guitiriz (Lugo).

2. DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA DE LOS MATERIALES

En este apartado se hace referencia a aspectos petrográficos de importancia petrofísica, dejando el análisis de los espacios vacíos y sus relaciones con la petrografía para el apartado 5.

2.1. Granito Albero

Como el análisis modal indica (tabla I) se trata, en realidad, de una leucogranodiorita. Su color es gris blanquecino, y la textura es granuda heterogranular de grano medio (el 95 por 100 de los granos poseen tamaños entre 0,5 y 8 mm.).

El cuarzo, anhedral y con extinciones ondulantes y en mosaico, tiene bordes sinuosos e interpenetrados, sobre todo en los contactos homofásicos.

La microclina está pertitzada, y la plagioclase ($A_{n 6-10}$), ligeramente alterada a sericita, muestra crecimientos epitáxicos de mica, a la vez que presenta una incipiente microclinización progresiva.

TABLA I
Análisis modales de los granitoides

Mineralogía	Porcentajes (%)		
	Albero	Gallo	Guitiriz
Cuarzo	33,8	33,5	32,3
Microclina	12,4	29,8	22,9
Plagioclase	28,7	27,2	31,8
Moscovita	23,4	5,8	10,1
Biotita	1,0	2,4	2,4
Clorita	—	0,9	—
Accesorios	0,8	0,5	0,5

La moscovita, que aparece en un porcentaje muy elevado (casi el 25 por 100 de la composición mineralógica global), tiene bordes simplectíticos de reacción con el feldespato potásico. Aparece con dos tamaños bien diferenciados: grandes cristales, de hasta 7 mm., y pequeños cristales menores de 0,4 mm., como crecimientos epitáxicos en plagioclase (fig. 1).

2.2. Granito Gallo

Es un granito de color gris amarillento y textura granuda heterogranular de grano medio (99

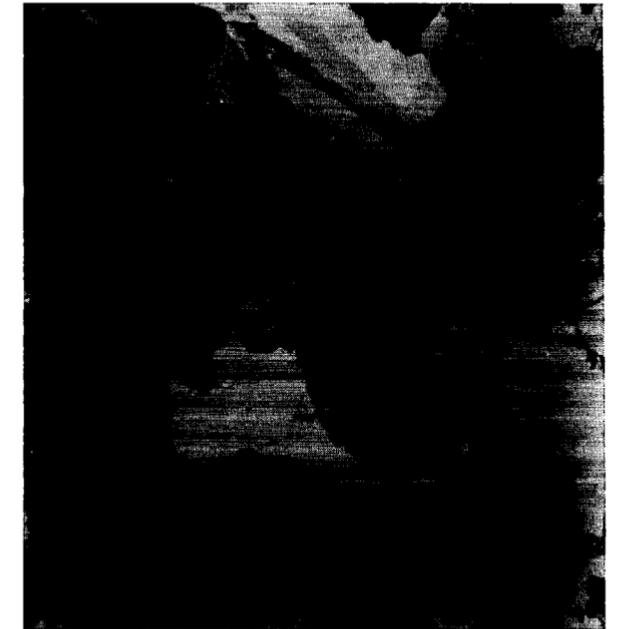


Figura 1.—Aspecto de la textura de la granodiorita Albero. N.C.×13.

por 100 de los granos entre 0,5-8 mm.). La cohesión entre los granos minerales es baja.

El cuarzo, anhedral, suele presentarse en asociados policristalinos, con extinciones ondulantes y en mosaico.

La microclina, con tendencia subidiomórfica, muestra intercrecimientos pertíticos y es el mineral más desarrollado. Más de la mitad de los granos tienen tamaños entre 4 y 8 mm., y pueden presentar texturas poiquilíticas.

La plagioclase ($A_{n 8-10}$) está más alterada que la microclina y presenta maclas polisintéticas distorsionadas por microfallas que evidencian los esfuerzos tectónicos a los que se vio sometida la roca.

La moscovita es heterométrica, con dos tamaños bien definidos: 0,5 mm. dentro de plagioclase, y 1,5 mm. en el resto de la roca.

La biotita está total o parcialmente alterada a clorita (fig. 2).

2.3. Granito Guitiriz

Se trata de un granito de dos micas, gris claro, con textura heterogranular de grano fino. El ta-

2. DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA DE LOS MATERIALES

En este apartado se hace referencia a aspectos petrográficos de importancia petrofísica, dejando el análisis de los espacios vacíos y sus relaciones con la petrografía para el apartado 5.

2.1. Granito Albero

Como el análisis modal indica (tabla I) se trata, en realidad, de una leucogranodiorita. Su color es gris blanquecino, y la textura es granuda heterogranular de grano medio (el 95 por 100 de los granos poseen tamaños entre 0,5 y 8 mm.).

El cuarzo, anhedral y con extinciones ondulantes y en mosaico, tiene bordes sinuosos e interpenetrados, sobre todo en los contactos homofásicos.

La microclina está pertitizada, y la plagioclasa ($A_n 6-10$), ligeramente alterada a sericita, muestra crecimientos epitáxicos de mica, a la vez que presenta una incipiente microclinización progresiva.

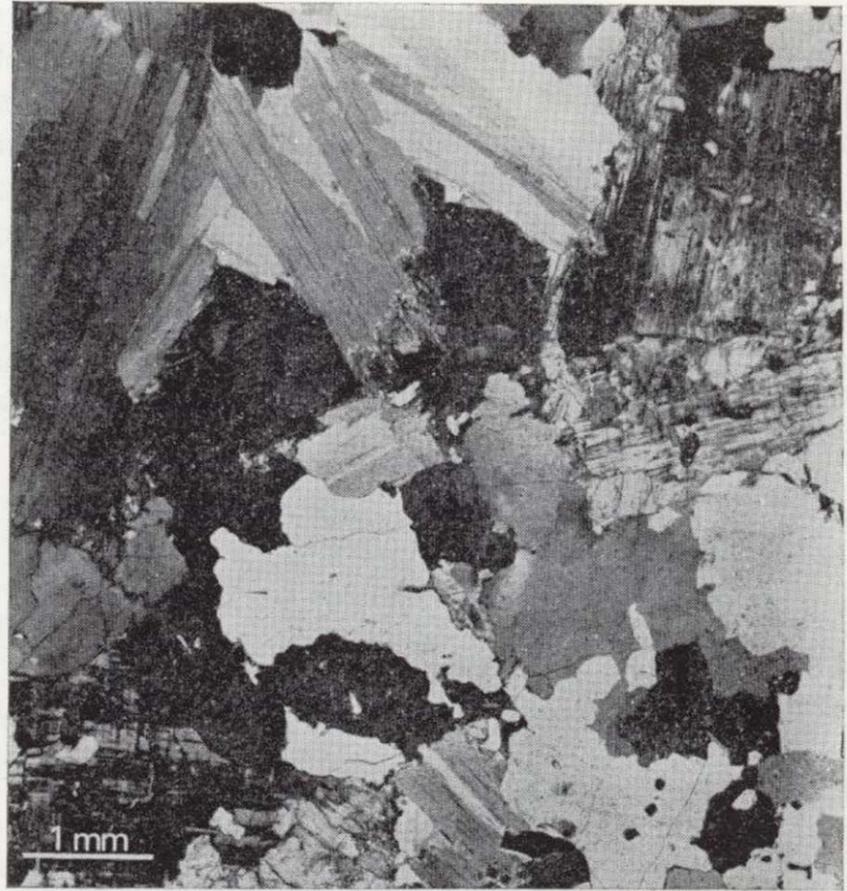


Figura 1.—Aspecto de la textura de la granodiorita Albero. N.C.×13.

TABLA I

Análisis modales de los granitoides

Mineralogía	Porcentajes (%)		
	Albero	Gallo	Guitiriz
Cuarzo	33,8	33,5	32,3
Microclina	12,4	29,8	22,9
Plagioclasa	28,7	27,2	31,8
Moscovita	23,4	5,8	10,1
Biotita	1,0	2,4	2,4
Clorita	—	0,9	—
Accesorios	0,8	0,5	0,5

La moscovita, que aparece en un porcentaje muy elevado (casi el 25 por 100 de la composición mineralógica global), tiene bordes simplectíticos de reacción con el feldespato potásico. Aparece con dos tamaños bien diferenciados: grandes cristales, de hasta 7 mm., y pequeños cristales menores de 0,4 mm., como crecimientos epitáxicos en plagioclasa (fig. 1).

2.2. Granito Gallo

Es un granito de color gris amarillento y textura granuda heterogranular de grano medio (99

por 100 de los granos entre 0,5-8 mm.). La cohesión entre los granos minerales es baja.

El cuarzo, anhedral, suele presentarse en asociados policristalinos, con extinciones ondulantes y en mosaico.

La microclina, con tendencia subidiomórfica, muestra intercrecimientos pertíticos y es el mineral más desarrollado. Más de la mitad de los granos tienen tamaños entre 4 y 8 mm., y pueden presentar texturas poiquilíticas.

La plagioclasa ($A_n 8-10$) está más alterada que la microclina y presenta maclas polisintéticas distorsionadas por microfallas que evidencian los esfuerzos tectónicos a los que se vio sometida la roca.

La moscovita es heterométrica, con dos tamaños bien definidos: 0,5 mm. dentro de plagioclasas, y 1,5 mm. en el resto de la roca.

La biotita está total o parcialmente alterada a clorita (fig. 2).

2.3. Granito Guitiriz

Se trata de un granito de dos micas, gris claro, con textura heterogranular de grano fino. El ta-



Figura 2.—Aspecto de la textura del granito Gallo.
N.C.×13.

maño medio de grano es menor que en las rocas anteriores (el 98 por 100 de los granos están situados entre 0,25 y 4 mm.).

El cuarzo, con extinciones ondulantes y en mosaico orientado, tiende a formas equidimensionales y no suele aparecer, como sucedía en las rocas anteriormente descritas, formando asociaciones policristalinas.

La microclina es también alotriomórfica, está ligeramente alterada y muestra algunas pertitas difusas.

La plagioclasa ($A_{n 5-10}$), con tendencia subidio-mórfica, está ligeramente zonada mostrando una alteración selectiva de las zonas más cálcicas (núcleos de los cristales). En los contactos plagioclasa-microclina se forman mirmequitas escasamente desarrolladas.

La moscovita y la biotita, con una orientación notable, aparecen asociadas de tal manera que un grano de mica puede estar formado conjuntamente por moscovita y biotita (fig. 3).

3. PROPIEDADES FISICAS

El volumen del espacio poroso fue medido, para los granitos estudiados, en base a la porosidad

abierta y la porosidad total. La *porosidad abierta* o efectiva, n_0 , es decir, el volumen de vacíos intercomunicados en relación con el volumen total de roca, se midió a partir del método de la balanza hidrostática, siguiendo las sugerencias establecidas por la ISRM (1979).

La *porosidad total*, n , o relación entre el volumen de vacíos (intercomunicados o no) y el volumen total de roca, se calculó a partir de la densidad aparente de la roca seca y del peso específico de los granos minerales. Los resultados de porosidad obtenidos, junto con el *grado de saturación*, S_r , o de relleno de los poros (relación entre la porosidad abierta y la total, expresada en porcentaje), y el resto de propiedades físicas medidas, se muestra en la tabla II.

El *contenido en humedad de saturación*, i_s , se midió por saturación libre en agua de las muestras durante cinco días, tiempo considerado como suficiente para alcanzar una saturación prácticamente completa.

Para la medición de la *permeabilidad* (intrínseca o específica), R_a , al aire, se utilizó un permeámetro discontinuo de carga variable, descrito en otro trabajo (SUÁREZ DEL RÍO, 1982), empleándose pro-



Figura 3.—Aspecto de la textura del granito Guitiriz.
N.C.×13.



Figura 2.—Aspecto de la textura del granito Gallo. N.C.×13.

maño medio de grano es menor que en las rocas anteriores (el 98 por 100 de los granos están situados entre 0,25 y 4 mm.).

El cuarzo, con extinciones ondulantes y en mosaico orientado, tiende a formas equidimensionales y no suele aparecer, como sucedía en las rocas anteriormente descritas, formando asociaciones policristalinas.

La microclina es también alotriomórfica, está ligeramente alterada y muestra algunas pertitas difusas.

La plagioclasa ($A_{n 5-10}$), con tendencia subidiomórfica, está ligeramente zonada mostrando una alteración selectiva de las zonas más cálcicas (núcleos de los cristales). En los contactos plagioclasa-microclina se forman mirmequitas escasamente desarrolladas.

La moscovita y la biotita, con una orientación notable, aparecen asociadas de tal manera que un grano de mica puede estar formado conjuntamente por moscovita y biotita (fig. 3).

3. PROPIEDADES FISICAS

El volumen del espacio poroso fue medido, para los granitos estudiados, en base a la porosidad

abierta y la porosidad total. La *porosidad abierta* o efectiva, n_0 , es decir, el volumen de vacíos intercomunicados en relación con el volumen total de roca, se midió a partir del método de la balanza hidrostática, siguiendo las sugerencias establecidas por la ISRM (1979).

La *porosidad total*, n , o relación entre el volumen de vacíos (intercomunicados o no) y el volumen total de roca, se calculó a partir de la densidad aparente de la roca seca y del peso específico de los granos minerales. Los resultados de porosidad obtenidos, junto con el *grado de saturación*, S_r , o de relleno de los poros (relación entre la porosidad abierta y la total, expresada en porcentaje), y el resto de propiedades físicas medidas, se muestra en la tabla II.

El *contenido en humedad de saturación*, i_s , se midió por saturación libre en agua de las muestras durante cinco días, tiempo considerado como suficiente para alcanzar una saturación prácticamente completa.

Para la medición de la *permeabilidad* (intrínseca o específica), R_a , al aire, se utilizó un permeámetro discontinuo de carga variable, descrito en otro trabajo (SUÁREZ DEL RÍO, 1982), empleándose pro-



Figura 3.—Aspecto de la textura del granito Guitiriz. N.C.×13.

betas cilíndricas de 5 cm. de diámetro y esbeltez 2,2, previamente secadas a estufa.

De los resultados obtenidos se deduce que el granito más poroso (Gallo) es también el que mayor capacidad de absorción de agua y permeabilidad al paso de fluidos exhibe, muy por encima de los valores representativos de los otros dos (Albero y Guitiriz), sobre todo en el caso de la permeabilidad, que es superior en un orden de magnitud. Por otra parte, los altos valores del grado de saturación (especialmente en el granito Guitiriz), indican que la conectividad entre los canales parece ser grande, y que la mayor parte de los vacíos son accesibles a los fluidos.

TABLA II

Propiedades físicas	Roca		
	Albero	Gallo	Guitiriz
Porosidad abierta, n_0 (%)	2,02	4,86	1,89
Porosidad total, n (%)	2,51	5,21	1,92
Cont. en humedad de sat., i_s (porcentaje)	0,77	1,93	0,73
Grado de saturación, S_r (%) ...	80,4	93,4	98,4
Permeabilidad (aire), R (mdcy).	0,20	2,48	0,16

4. TECNICAS DE OBSERVACION

4.1. Técnicas utilizadas

Para la observación del espacio poroso de las rocas seleccionadas se ha utilizado una combinación de técnicas, que incluye:

- a) Estudio de láminas delgadas, por microscopía óptica de polarización en luz transmitida y reflejada.
- b) Estudio de láminas delgadas impregnadas con colorante fluorescente, por microscopía óptica de fluorescencia con luz transmitida.
- c) Estudio de muestras de rocas en superficie de fractura, por microscopía electrónica de barrido (S.E.M.).
- d) Estudio de muestras de roca, en superficie pulida, con desbaste manual o adelgazamiento mediante «bombardeo iónico» (*ion thinning*) al S.E.M.

Para el reconocimiento de la red de microfisuras, resultó especialmente útil la microscopía de fluorescencia. Por otro lado, el S.E.M., dado su gama de aumentos, poder de resolución y profundidad de campo, constituyó la técnica más apro-

piada para la observación directa de la geometría de los poros y *cracks*, y de sus relaciones espaciales. En cualquier caso, se requiere una adecuada preparación de las muestras, encaminada a resaltar aquellos aspectos de interés relacionados con los espacios vacíos y, a su vez, evitar la introducción de posibles modificaciones y defectos inducidos («artefactos») que puedan dificultar su interpretación (RICHTER y SIMMONS, 1977; MONTOTO, 1983).

4.2. Preparación de muestras

Las muestras estudiadas con microscopía de fluorescencia fueron impregnadas a presión (de hasta 100 Kg/cm², previamente a la obtención de láminas delgadas, con resina epoxy (diluida con estirolo monómero) coloreada con rodhamina B.

Las muestras pulidas utilizadas para su observación al S.E.M., de aproximadamente 1 cm² de superficie, fueron cortadas mediante una sierra de baja velocidad y deformación. A continuación, las muestras se desbastaron sucesivamente con carborundum 600, 800 y 1000; seguidamente se pulieron con pasta de diamante de 30 μ m, 9 μ m y 3 μ m, y por último, fueron finalmente pulimentadas con alúmina «alpha» de 0,3 μ m. El tiempo empleado para los desbastes y pulidos, en cada etapa, fue de cinco a diez minutos. Entre cada etapa las muestras se limpiaron mediante ultrasonidos. Antes del metalizado, algunas de ellas fueron sometidas a adelgazamiento por haz de iones (de 5 Kv y 30° de inclinación), técnica específicamente utilizada para eludir la formación de «artefactos» (BRACE *et al.*, 1972). Finalmente, las muestras se metalizaron con una fina capa de oro-paladio (de aproximadamente 3 μ m de espesor) por el método de «sputtering».

5. ANALISIS DEL ESPACIO POROSO

5.1. Observaciones microscópicas

La porosidad *sensu lato* de las rocas graníticas se debe al conjunto de poros y microfisuras existentes en el material. Sin embargo, la asignación porcentual de cada uno de estos grupos de microcavidades a la porosidad total resultante es, a menudo, problemática, por cuanto en la mayoría de rocas cristalinas la gama de configuraciones de los espacios vacíos es muy extensa y variable, y una distinción neta entre éstos no siempre re-

sulta sencilla. No obstante, y a efectos meramente prácticos, se puede establecer una distinción convencional, basada en relaciones dimensionales a partir de su observación con las técnicas microscópicas antes descritas, entre aquellas cavidades más o menos equidimensionales (poros) y las más elongadas (*cracks* o microfisuras). En este sentido, SPRUNT y BRACE (1974) distinguen dos tipos de *microcavidades*, que denominan HARC y LARC, según que el «aspect ratio» α , o relación entre la mínima y la máxima abertura de las mismas, sea alto (superior a 10^{-1}) o bajo (entre 10^{-1} y 10^{-4}), respectivamente.

Desde el punto de vista morfológico, los poros pueden presentar contornos redondeados, elipsoidales, agudos, irregulares, etc., estar aislados o interconectados entre sí o con microfisuras. Su tamaño es variable, si bien en las rocas graníticas su orden de magnitud es observable, en muchos casos, únicamente con el microscopio electrónico. Habitualmente, se distingue entre *macroporos* y *microporos*. En este trabajo se han considerado microporos aquellos poros que, observados en sección, presentan un diámetro inferior a $115 \mu\text{m}$, y macroporos los de diámetro superior.

Las microfisuras suelen tener longitud variable, desde algunas pocas micras hasta algunos milímetros. Por su relación con los granos minerales se distinguen:

- a) *Microfisuras intragranulares*, cuando se sitúan dentro de los cristales y no suelen excederles.
- b) *Intergranulares*, cuando se desarrollan a lo largo de los bordes de grano.
- c) *Transgranulares*, si afectan en su recorrido a más de un grano mineral.

Su desarrollo viene condicionado fundamentalmente por los defectos cristalinos y por el grado de cohesión entre las fases minerales y por otras discontinuidades existentes en el material rocoso (fig. 4).

Por lo que se refiere a los granitos estudiados, los poros de cualquier tamaño y forma se encuentran preferentemente en el seno de la plagioclasa (ESBERT *et al.*, 1978) (fig. 5).

Es probable que gran número de estos poros, especialmente los microporos, se hayan formado durante la génesis de la roca (MONTGOMERY y BRACE, 1975). Estos poros tienen una gran significa-

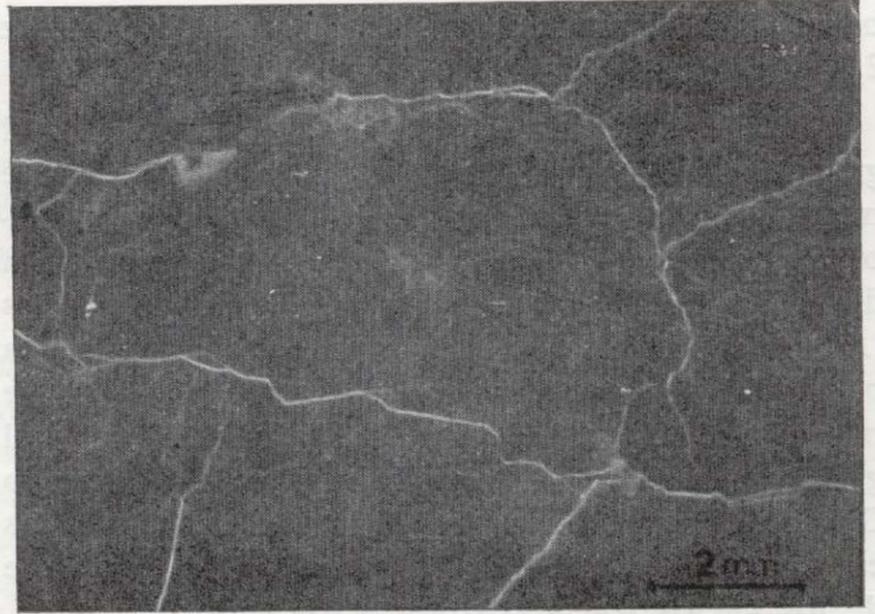


Figura 4.—Red de microfisuración, asociada a granos de cuarzo, de carácter fundamentalmente intergranular. Granito Albero. (Microscopía de fluorescencia.)

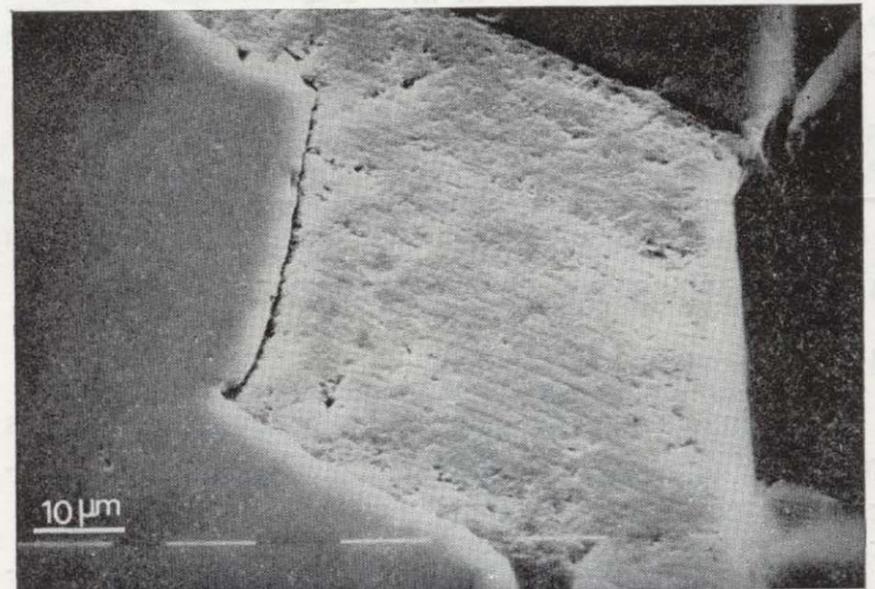


Figura 5.—Elevada presencia de poros en el seno de la plagioclasa y alteración selectiva de la misma. Granito Guitiriz. (S.E.M.)

ción en el proceso de alteración de las plagioclasas, puesto que facilitan la circulación de fluidos por su interior. En efecto, las soluciones circulantes alteran químicamente a las plagioclasas transformándolas en hidromicas y degradándolas también físicamente. Esta degradación comporta un incremento de la superficie específica y, a su vez, favorece la aceleración del proceso. Progresivamente, las cavidades preexistentes se ven agrandadas, aprovechando en muchos casos direcciones cristalográficas de debilidad de las plagioclasas (planos de exfoliación, de macla, etc.). En último término,

puede alcanzarse un elevado grado de deterioración mineral (figs. 6 y 7).

Como resultado de dicho proceso, aparece una alteración selectiva de las plagioclasas respecto del resto de los minerales constituyentes. Este fenómeno no se manifiesta en las tres clases de granitos estudiados.

Relacionados con el cuarzo aparecen, también, algunos microporos localizados en su interior, o bien en los bordes de grano, preferentemente en los contactos heterofásicos cuarzo-feldespatos potásico. Su número, no obstante, es bajo, por lo que seguramente no intervienen de forma significativa en el conjunto de la porosidad (fig. 8).

Las microfisuras son, en estas rocas, las discontinuidades que controlan más directamente el espacio poroso. En todos los granitos estudiados

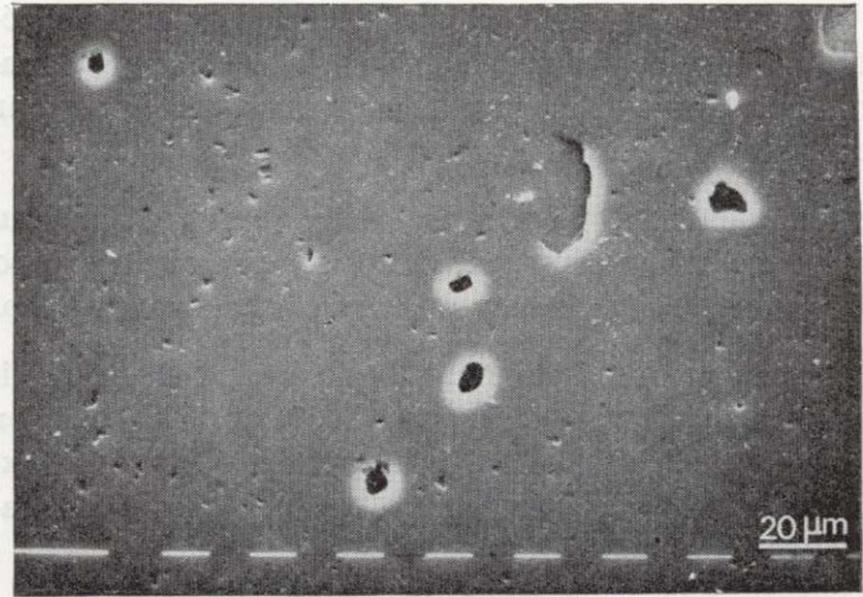
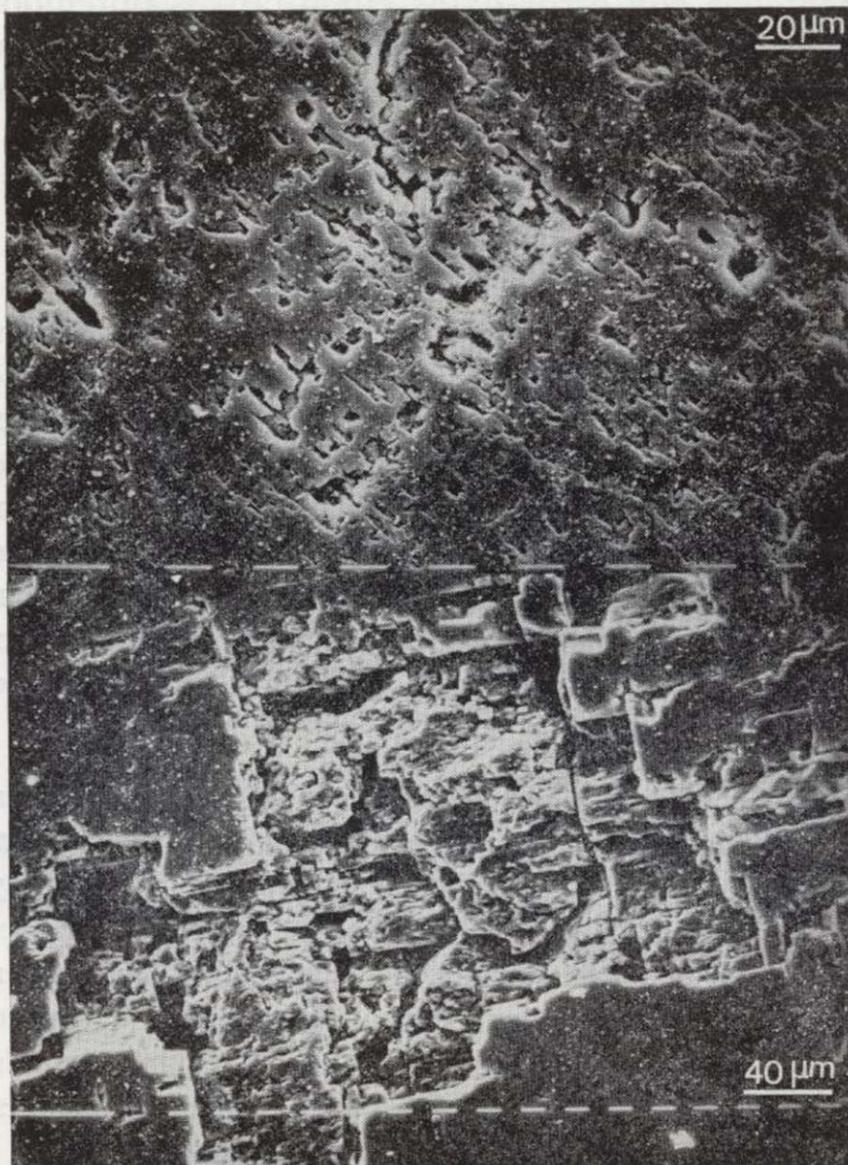


Figura 8.—Microporos equidimensionales en el interior de un cristal de cuarzo. Resaltan dos gamas de tamaños bien diferenciados. Granito Guitiriz. (S.E.M.)

aparece una compleja y bien desarrollada red de microfisuración, la cual alcanza su máxima densidad en el granito Gallo. Muchas de las microfisuras son abiertas, siendo también el Gallo el que presenta microfisuras de este tipo con aberturas mayores. Otras veces las fisuras son cerradas o neomineralizadas. Las más frecuentes son las de carácter inter y transgranular (fig. 9).



Figuras 6 y 7.—Dos aspectos de la porosidad en el seno de la plagioclasa. Arriba: Alineaciones de poros según los planos de exfoliación del cristal. Abajo: Microcavidades en plagioclasa, asociadas a un avanzado estado de deterioración mineral. Granito Gallo. (S.E.M.)

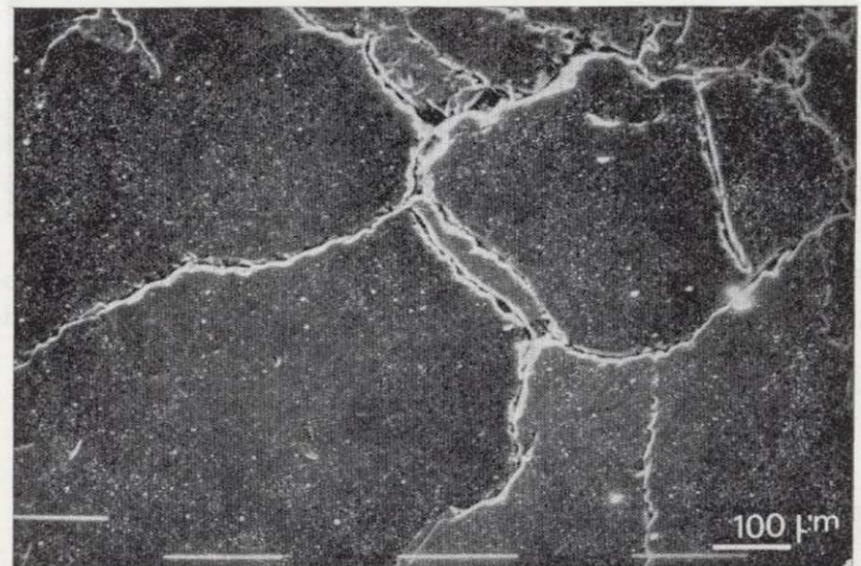


Figura 9.—Red de microfisuración inter y transgranular. Granito Guitiriz. (S.E.M.)

En estas rocas graníticas, las inclusiones existentes dentro de algunos de sus minerales constituyen, a veces, núcleos de microfisuración, debido a la concentración de tensiones que se genera a su alrededor, a causa de las diferencias de comportamiento elástico de un mineral respecto al otro.

En el Guitiriz existe una microfisuración anisótropa, con una dirección preferencial que se manifiesta con carácter transgranular e intragranular en sus cristales de cuarzo.

En el Albero, la mayor parte de sus microfisuras, que son intergranulares, se desarrollan a lo largo de los contactos heterofásicos cuarzo-mica.

Puede también afirmarse que la red de microfisuración está condicionada, en muchos casos, por planos de debilidad del material (por ejemplo, exfoliaciones, bordes de grano, etc.) y por las alineaciones de poros (fig. 10).

En las plagioclasas zonadas (núcleo rico en calcio, borde rico en sodio) las microfisuras se desarrollan habitualmente siguiendo la zonación.

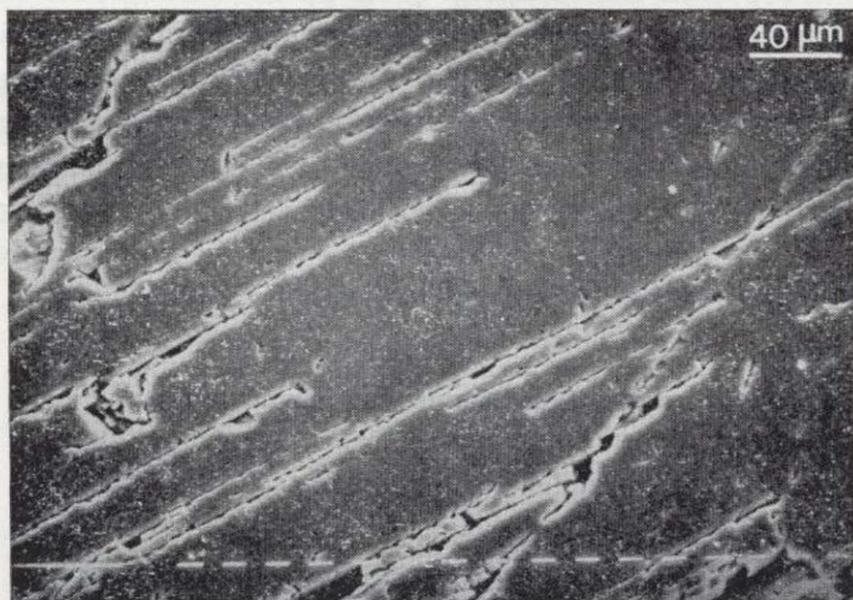


Figura 10.—Microfisuras paralelas en un cristal de plagioclasa, siguiendo la dirección de exfoliación. Granito Guitiriz. (S.E.M.)

5.2. Correlación con propiedades físicas

El análisis del espacio poroso viene a corroborar los valores obtenidos de las propiedades físicas medidas en estos materiales graníticos (tabla II). Así, el elevado valor de la porosidad (tanto abierta como total) del granito Gallo, en relación a los restantes, se debe fundamentalmente a su tupida red de microfisuración, como ya se ha descrito. Esta microfisuración es, también, la principal responsable de la capacidad de retención de agua por parte de este material rocoso. A su vez, el grado de conectividad entre los diversos

espacios vacíos (poros y microfisuras) viene constatado por la medida de la permeabilidad al aire que, como puede observarse, es la más alta de los tres tipos graníticos descritos.

Por lo que se refiere al Albero y al Guitiriz, se observa que los valores de porosidad abierta y permeabilidad son similares; sin embargo, la porosidad total en el primero excede en algo más de un 25 por 100 al segundo. Si tenemos en cuenta que el grado de saturación del Albero es más bajo que el del Guitiriz, resulta evidente que una parte significativa de los espacios vacíos en el granito Albero no están comunicados entre sí. Esto se confirma, también, a partir del análisis del espacio poroso.

Se espera que, en un futuro próximo, y como continuación de este trabajo, dichas correlaciones, así como los aspectos cualitativos de las porosidades anteriormente descritas, puedan ser complementadas con otros datos cuantitativos obtenidos a partir de medidas de porosimetría por inyección de mercurio, y técnicas de cuantificación mediante proceso digital de imágenes microscópicas.

5.3. Influencia sobre la alterabilidad

La incidencia de poros y microfisuras, inherentes al material, sobre la alterabilidad potencial de estos granitos, parece evidente. En principio, aquellos tipos rocosos que presentan mayor desarrollo de poros y microfisuras y un mayor grado de conectividad entre ellos, como es el caso del granito Gallo, serán también los que potencialmente sean más meteorizables. Por otra parte, el nivel de alteración inicial de la roca es ya, de por sí, otro condicionante a tener en cuenta.

Desde el punto de vista de la evaluación de la alterabilidad, PÉRAMI y THÉNOZ (1968), establecen un límite de permeabilidad al aire de 0,10 mdcy para la roca «matriz» o «intacta», por debajo del cual puede considerarse al material granítico, a efectos de durabilidad, como «inalterable»; por lo que, según este criterio, el granito Gallo sería relativamente más proclive a la meteorización a corto plazo que el Albero y el Guitiriz.

6. CONCLUSIONES

De las distintas observaciones y mediciones rea-

En el Guitiriz existe una microfisuración anisótropa, con una dirección preferencial que se manifiesta con carácter transgranular e intragranular en sus cristales de cuarzo.

En el Albero, la mayor parte de sus microfisuras, que son intergranulares, se desarrollan a lo largo de los contactos heterofásicos cuarzo-mica.

Puede también afirmarse que la red de microfisuración está condicionada, en muchos casos, por planos de debilidad del material (por ejemplo, exfoliaciones, bordes de grano, etc.) y por las alineaciones de poros (fig. 10).

En las plagioclasas zonadas (núcleo rico en calcio, borde rico en sodio) las microfisuras se desarrollan habitualmente siguiendo la zonación.

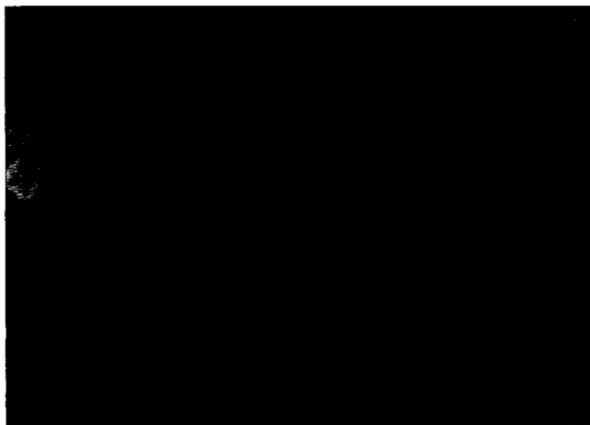


Figura 10.—Microfisuras paralelas en un cristal de plagioclasa, siguiendo la dirección de exfoliación. Granito Guitiriz. (S.E.M.)

5.2. Correlación con propiedades físicas

El análisis del espacio poroso viene a corroborar los valores obtenidos de las propiedades físicas medidas en estos materiales graníticos (tabla II). Así, el elevado valor de la porosidad (tanto abierta como total) del granito Gallo, en relación a los restantes, se debe fundamentalmente a su tupida red de microfisuración, como ya se ha descrito. Esta microfisuración es, también, la principal responsable de la capacidad de retención de agua por parte de este material rocoso. A su vez, el grado de conectividad entre los diversos

espacios vacíos (poros y microfisuras) viene constatado por la medida de la permeabilidad al aire que, como puede observarse, es la más alta de los tres tipos graníticos descritos.

Por lo que se refiere al Albero y al Guitiriz, se observa que los valores de porosidad abierta y permeabilidad son similares; sin embargo, la porosidad total en el primero excede en algo más de un 25 por 100 al segundo. Si tenemos en cuenta que el grado de saturación del Albero es más bajo que el del Guitiriz, resulta evidente que una parte significativa de los espacios vacíos en el granito Albero no están comunicados entre sí. Esto se confirma, también, a partir del análisis del espacio poroso.

Se espera que, en un futuro próximo, y como continuación de este trabajo, dichas correlaciones, así como los aspectos cualitativos de las porosidades anteriormente descritas, puedan ser complementadas con otros datos cuantitativos obtenidos a partir de medidas de porosimetría por inyección de mercurio, y técnicas de cuantificación mediante proceso digital de imágenes microscópicas.

5.3. Influencia sobre la alterabilidad

La incidencia de poros y microfisuras, inherentes al material, sobre la alterabilidad potencial de estos granitos, parece evidente. En principio, aquellos tipos rocosos que presentan mayor desarrollo de poros y microfisuras y un mayor grado de conectividad entre ellos, como es el caso del granito Gallo, serán también los que potencialmente sean más meteorizables. Por otra parte, el nivel de alteración inicial de la roca es ya, de por sí, otro condicionante a tener en cuenta.

Desde el punto de vista de la evaluación de la alterabilidad, PÉRAMI y THÉNOZ (1968), establecen un límite de permeabilidad al aire de 0,10 mdcy para la roca «matriz» o «intacta», por debajo del cual puede considerarse al material granítico, a efectos de durabilidad, como «inalterable»; por lo que, según este criterio, el granito Gallo sería relativamente más proclive a la meteorización a corto plazo que el Albero y el Guitiriz.

6. CONCLUSIONES

De las distintas observaciones y mediciones rea-

lizadas en los granitos seleccionados se pueden extraer las siguientes conclusiones:

1. El análisis del sistema poroso de los materiales graníticos resulta imprescindible, tanto para una correcta interpretación de aquellas propiedades físicas (porosidad, permeabilidad, etc.) que se hallan directamente influenciadas por el conjunto de los espacios vacíos de la roca, como para una evaluación de su grado de meteorización actual o una eventual predicción de su alterabilidad futura.
2. El examen cualitativo de poros y microfisuras se ve particularmente facilitado por el uso de técnicas microscópicas específicas (como la fluorescencia por luz transmitida y la electrónica de barrido), que permiten una eficaz observación directa de sus características geométricas y de sus interrelaciones espaciales. En este sentido, resulta aconsejable el empleo de técnicas adecuadas de preparación de las muestras a observar, que no introduzca «artefactos» (por ejemplo, la utilización del adelgazamiento por bombardeo iónico).
3. En términos generales, la porosidad de los materiales graníticos se debe fundamentalmente a su red de microfisuración. No obstante, las microcavidades intercomunicadas (poros y microporos), preferentemente localizadas en el interior de los cristales de plagioclasa, juegan también un papel significativo en el conjunto del sistema poroso de los granitos, ejerciendo una acción decisiva en los procesos de alteración química y degradación física de los citados minerales.
4. De los tres tipos graníticos estudiados, el más alterado (Gallo) es el que exhibe una mayor abundancia de cavidades y fisuras, con elevado grado de interconectividad. Cuantitativamente, su mayor porosidad y permea-

bilidad, con respecto a los otros dos tipos (Guitiriz y Albero), es un reflejo de la configuración, densidad y carácter de su sistema poroso. Asimismo, su durabilidad es, por esta causa, potencialmente más baja que la de los otros dos granitos.

BIBLIOGRAFÍA

- BRACE, W. F.; SILVER, E.; HADLEY, K., y GOETZE, C.: *Cracks and pores: a closer look*. Science, 178, pp. 162-163 (1972).
- ESBERT, R. M.; GRANDA, J.; ORDAZ, J., y SUÁREZ DEL RÍO, L. M.: *Nota previa sobre la interpretación textural de la porosidad de algunas rocas graníticas de Galicia*. Trabajos de Geología, Universidad de Oviedo, vol. 10, pp. 173-182 (1978).
- INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS: *Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties, and swelling and slaking-durability index properties*. J. A. FRANKLIN (Coordinator). Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., vol. 16, pp. 141-156 (1979).
- MONTGOMERY, C. W.; BRACE, W. F.: *Micropores in plagioclase*. Contr. Mineral. Petrol., vol. 52, pp. 17-28 (1975).
- MONTOTO, M.: *Petrophysics: The petrographic interpretation of the physical properties of rocks*. Proc. 5 th. Congr., Int. Soc. Rock Mechanics, Melbourne (Australia), abril 1983, in litt. (1983).
- PÉRAMI, R.; THÉNOZ, B.: *Permeabilité et porosité des roches*. Rev. de L'Industrie Minérale, número especial (mayo), pp. 38-47 (1968).
- RICHTER, D.; SIMMONS, G.: *Microcracks in crystal igneous rocks: microscopy*. The Earth's Crust: Its Nature and Physical Properties, Geophys. Monogr. Serv. 20, A.G.U., Washington, D.C., pp. 149-180 (1977).
- SPRUNT, E. S.; BRACE, W. F.: *Direct observation of microcavities in crystalline rocks*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., vol. 11, pp. 139-150 (1974).
- SUÁREZ DEL RÍO, L. M.: *Estudio petrofísico de materiales graníticos geomecánicamente diferentes* (Tesis Doctoral). Departamento de Petrología y Geoquímica, Universidad de Oviedo, 241 pp. (1982).

Recibido: Abril de 1983

ESTUDIO DE MINERALES Y ROCAS

Génesis de las mineralizaciones de cobre en las capas rojas triásicas del sector de Navas de San Juan (Provincia de Jaén)

Por J. TORRES-RUIZ (1) y J. FERNANDEZ (2)

RESUMEN

Las mineralizaciones de cobre del sector de Navas de San Juan se encuentran enclavadas dentro de las capas rojas triásicas («red beds») situadas en el borde sureste de la Meseta Ibérica, las cuales descansan discordantemente sobre materiales metamórficos e ígneos pertenecientes al macizo Hercínico. Dichas rocas triásicas forman un conjunto predominantemente detrítico, depositado en un marco sedimentario correspondiente a un sistema fluvial de baja sinuosidad.

La mineralización, constituida por crisocola, azurita y malaquita, y con una morfología estratoligada, se localiza en un tramo esencialmente arenoso, con intercalaciones de limos y arcillas, depositado en un subambiente de un canal fluvial secundario. Estas rocas contienen pequeñas cantidades de restos vegetales dispersos, los cuales están frecuentemente «limonizados» o llevan asociados abundantes óxidos de hierro.

Dentro del tramo mineralizado, las menas de cobre se presentan en distintas situaciones, esencialmente con carácter intersticial, bien de forma intergranular o rellenando pequeñas venas y fracturas. Con frecuencia corroen a los principales constituyentes de la arenisca (cuarzo, feldspatos y dolomita). Los carbonatos básicos de cobre se concentran preferentemente junto a/o en las proximidades de las zonas con restos vegetales.

El estudio mineralógico y textural pone de manifiesto que los minerales de cobre se han formado en una etapa muy avanzada de la evolución de la roca, durante un proceso epigenético o diagenético tardío, y a partir de soluciones con unas características hidrodinámicas y fisicoquímicas distintas de las que presentan las soluciones intersticiales que dieron lugar a las principales transformaciones diagenéticas tempranas de las rocas de caja.

El cobre deriva de meteorización y lixiviación de los depósitos de sulfuros primarios cercanos, existentes en los materiales del zócalo Hercínico, y fue transportado por las soluciones de drenaje de dichos materiales. Tales soluciones se infiltraron y migraron a través de los cuerpos porosos, fundamentalmente en sentido lateral. La formación de los minerales de cobre en determinados niveles de facies de canal se debió a la creación en ellos de unas barreras fisicoquímicas, a causa de sus peculiares características físicas y a la interacción de las soluciones portadoras del cobre con los minerales de la roca de caja.

ABSTRACT

The copper deposits from Navas de San Juan occur in the triassic red beds lying upon the metamorphic and igneous materials of the Iberian Hercinian massif and are located in the southeast fringe of such massif. These red beds constitute a predominantly detrital ensemble laid down in a fluvial system environment of low sinuosity.

The mineralization, consisting of chrysocolla, azurite and malaquite, shows a strata-bound morphology. It occurs in a level, composed mainly of sandstone with interbedded silts and clays, which was deposited in a secondary fluvial channel subenvironment. These rocks contain small amounts of scattered vegetable debris, which are often «limonitized» or bear associated abundant iron oxides.

Within the mineralized bed, copper ores occur following different patterns, essentially interstitial in character (intergranular or filling little fractures). They often corrode the main constituents of sandstones (quartz, feldspars and dolomite). The basic copper carbonates being preferentially concentrated in/or near the vegetable debris bearing zones.

Mineralogical and textural study reveals that the copper ores originated in a advanced stages of the

(1) Departamento de Cristalografía y Mineralogía, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, y Departamento de Investigaciones Geológicas, C. S. I. C., Universidad de Granada.

(2) Departamento de Estratigrafía, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, y Departamento de Investigaciones Geológicas, C. S. I. C., Universidad de Granada.

rock evolution, during an epigenetic or late diagenetic process, and formed from solutions with physicochemical and hydrodynamic characteristics different from those which gave rise to the main early diagenetic transformation in the host rocks.

Copper is considered to be derived from weathering and leaching of the neighbouring primary sulphide deposits in the Hercinian basement materials, and was transported by drainage solutions of these zones. These solutions percolated and migrated laterally through the porous levels. The formation of copper ores in determinate levels of channel fluvial facies resulted from the creation of physicochemical barriers in them, determined by their particular physical characteristics and the interaction of the copper bearing solutions with the host rock minerals.

INTRODUCCION

Las capas rojas triásicas («red beds») del borde sureste de la Meseta Ibérica constituyen un afloramiento que se extiende, con una dirección NE-SO, desde Bailén hasta Alcaraz y desde este pueblo hacia Valdepeñas, según una dirección E-O, ocupando parte de las provincias de Jaén, Ciudad Real y Albacete (fig. 1).

Desde el punto de vista geológico, estos materiales descansan en posición horizontal a subhorizontal y discordantemente sobre materiales es-

tratificados y plegados del Paleozoico y, localmente, sobre rocas plutónicas pertenecientes al batolito de Santa Elena. Las capas rojas triásicas son fosilizadas por materiales pertenecientes a distintas unidades geológicas: a) materiales calizodolomíticos del Mesozoico del macizo Ibérico, en su extremo N y NE; b) materiales Mesozoicos y Cenozoicos pertenecientes a la zona Prebética, por el S y SE, y c) materiales detríticos Neógenos de la Depresión del Guadalquivir, en su extremo SO (fig. 1).

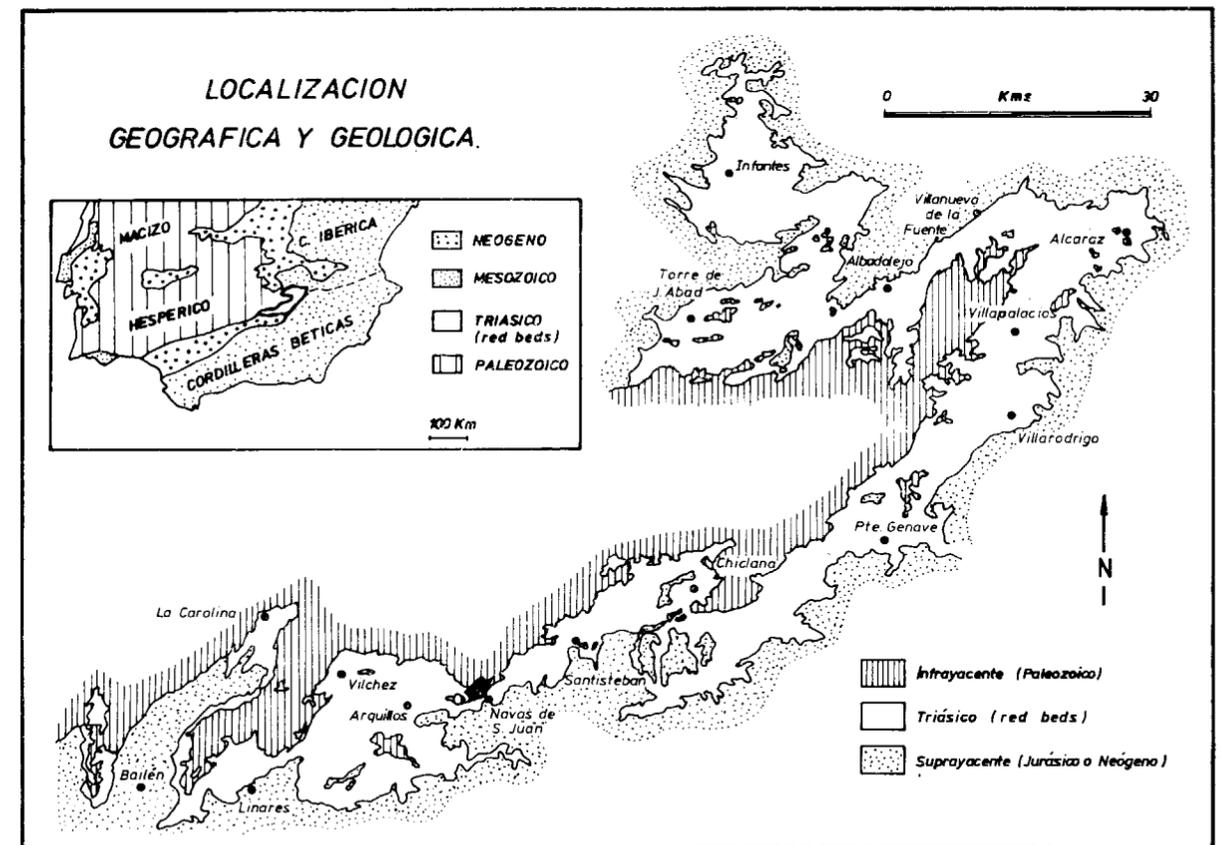


Figura 1.—Localización geográfica y geológica.

Litológicamente, estas facies de capas rojas son un conjunto de rocas predominantemente detrítico, constituido por areniscas, limos y arcillas, con algunos delgados niveles carbonatados. Destaca en su base un episodio conglomerático y a techo un episodio evaporítico.

En numerosos puntos de la región ocupada por estos materiales se han observado indicios de cobre (fundamentalmente azurita y malaquita) de escaso interés económico. Especial mención merece la zona situada en las inmediaciones del pueblo de Navas de San Juan (Jaén), en donde existen labores mineras antiguas, en explotación hasta principios de este siglo (Mina de El Ahondillo). Recientemente, esta zona ha sido objeto de un estudio (FERNÁNDEZ y PÉREZ GARCÍA, en prensa), en el que se establece el marco sedimentológico de las rocas encajantes de la mineralización y se esbozan algunas ideas sobre la posible génesis de la misma.

El presente trabajo tiene por objeto dar a conocer los resultados de nuevos estudios enfocados fundamentalmente a las mineralizaciones de cobre. Dichos estudios nos han permitido poner de manifiesto la presencia de importantes cantidades de crisocola, no descrita con anterioridad, así como de otros importantes datos que contribuyen a la clarificación de la génesis de la mineralización y la enmarcan dentro de la evolución de las rocas de su contexto.

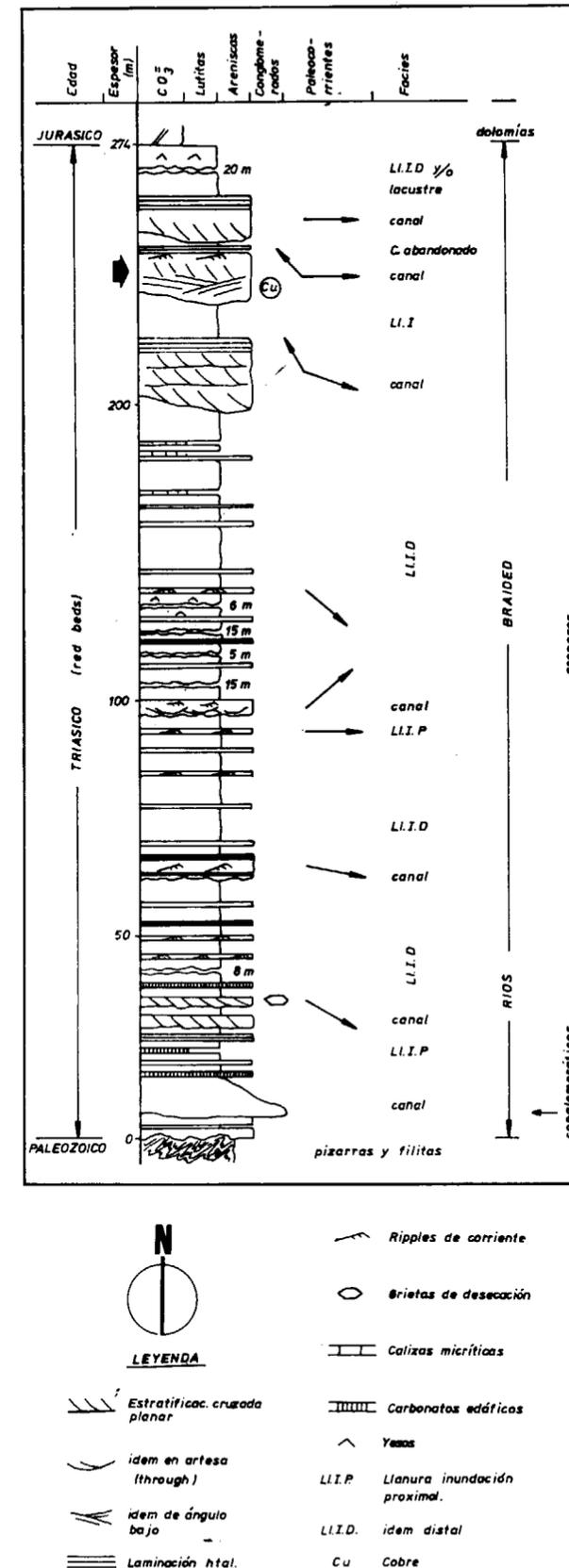
CONTEXTO GEOLOGICO LOCAL

La serie estratigráfica esquematizada en la figura 2 ha sido levantada al SO de Santisteban del Puerto y puede considerarse representativa del sector comprendido entre dicho pueblo y el de Navas de San Juan. En síntesis, consta de un conglomerado basal, un tramo constituido por alternancias de areniscas, limos y arcillas con algunos niveles carbonatados, y hacia el techo un tramo de lutitas con yesos. El sustrato de esta serie triásica está constituido por pizarras del Carbonífero y al techo por dolomías jurásicas o por calizas bioclásticas y areniscas del Mioceno, según los puntos.

En relación con el ambiente sedimentario de esta serie triásica, FERNÁNDEZ (1977) y DABRIO y FERNÁNDEZ (1980) distinguen distintas facies se-

dimentarias, referidas a diferentes subambientes de depósito, dentro de un marco general sedimentario de un sistema fluvial de tipo «braided», desarrollado sobre un zócalo Hercínico, en unas condiciones climáticas de tipo árido. De forma simplificada, dicho ambiente sedimentario y su evolución a través del tiempo puede resumirse de la siguiente manera: sobre los materiales paleozoicos se instala un sistema fluvial conglomerático, a favor del cual se depositan gravas y conglomerados (correspondientes a barras longitudinales de ríos trenzados) y materiales finos (arenas y limos) depositados fuera de los canales activos en épocas de crecida, o en los propios canales durante las etapas de caída de flujo. Sobre estos materiales se instala un sistema fluvial arenoso de baja sinuosidad, que es el responsable del depósito de la casi totalidad de la serie triásica y en el que se diferencian varios grupos de facies correspondientes a distintos subambientes: facies de canal, facies de llanura de inundación proximal y facies de llanura de inundación distal (fig. 2). Al final de la sedimentación triásica, y en puntos alejados de la influencia de los canales fluviales, se desarrollan zonas lacustres en las que se depositan lutitas con yesos. En el conjunto de la formación detrítica predomina el color rojo debido a la presencia de abundantes óxidos de hierro formando parte de la matriz o cemento intersticial. En menor proporción existen tramos de colores blanco-grisáceos, rosados o ligeramente verdosos.

La mineralización de El Ahondillo se localiza en un tramo esencialmente arenoso, de color blanco-grisáceo-verdoso (figs. 3 y 4). Su potencia es de 4 a 6 metros y está constituido por la superposición de numerosas secuencias de energía decreciente a techo, puestas de manifiesto por el tamaño de grano y por el tipo de estructuras sedimentarias. De muro a techo estas secuencias constan de arena fina con estratificación cruzada, en «sets» cuyo espesor se sitúa en torno a 30 cm., limos con laminación horizontal o cruzada, y arcillas. Este tramo se interpreta como depositado en un canal secundario activo solamente en épocas de crecida del flujo de agua, en las que la corriente desarrolla megaripples en arenas finas, y al final de las cuales (fases de decrecida de flujo) tiene lugar el asentamiento de las fracciones más finas en condiciones de energía progresivamente más baja: limos con estructuras de pequeña escala y finalmente arcillas.



Dispersos en estas rocas hay restos vegetales carbonizados, los cuales, generalmente, están «limonizados» o llevan asociados abundantes óxidos de hierro. Con frecuencia se presentan como acumulaciones de hojas y/o ramas, depositadas en forma de finas películas (de menos de 1 mm. a unos 2 cm. de espesor) dispuestas a lo largo de las superficies de estratificación (figs. 5 y 6). De manera más esporádica, también se encuentran como gruesos troncos, de hasta 15-20 cm., depositados muy aislados unos de otros.

El tramo mineralizado (canal secundario) difiere del resto de los depósitos de canal circundantes (correspondientes a canales principales) en sus características granulométricas, estructuras y secuencias sedimentarias y, obviamente, en su significado sedimentológico. Estos últimos presentan mayor tamaño de grano (arena media-gruesa) y estructuras y secuencias sedimentarias de mayor escala, todo ello reflejo de condiciones de mayor energía. Como consecuencia de ello, el tramo mineralizado presenta una menor porosidad que el resto de depósitos de canal de su entorno, hecho que, como veremos más adelante, tuvo una importante influencia en la localización de la mineralización.

MORFOLOGIA DE LA MINERALIZACION

En su conjunto, la mineralización muestra una morfología estratoligada. Dentro del tramo mineralizado, los minerales de cobre no muestran una distribución homogénea sino que se encuentran preferencialmente concentrados en determinadas zonas y/o lechos. Asimismo, las mayores concentraciones de cada uno de los minerales de cobre (crisocola, azurita y malaquita) tienden a presentarse separadas espacialmente, aunque sea a muy pequeña escala.

— Azurita y malaquita generalmente se encuentran concentrados en lechos diferentes o en distintas zonas dentro de un mismo lecho. Cuando la escala de diferenciación es muy pequeña, en las zonas de tránsito de uno a otro mineral, se observa que los contactos entre ambos son muy

Figura 2.—Serie estratigráfica de los materiales que constituyen las capas rojas triásicas, con la especificación de los principales ambientes y subambientes de depósito.

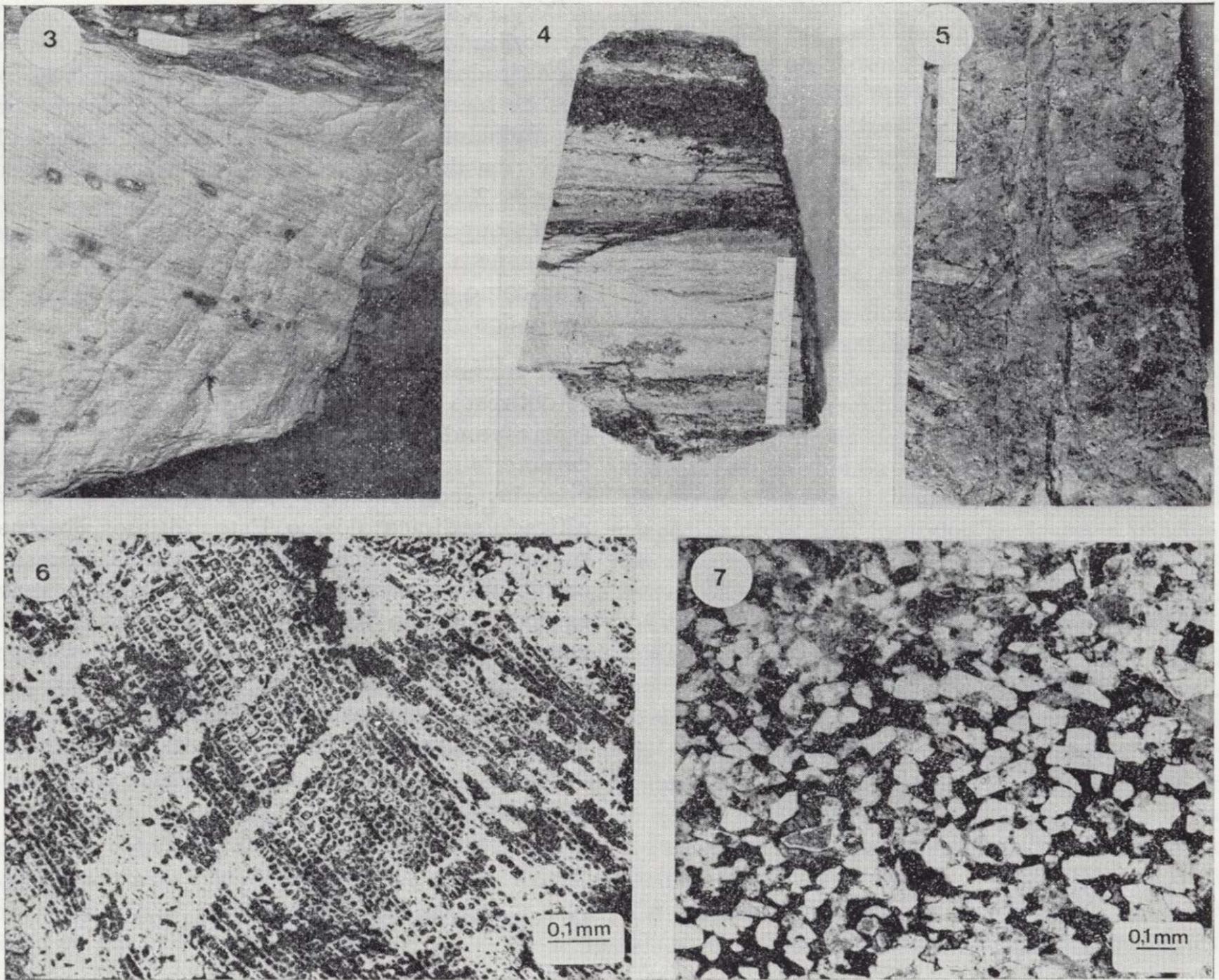


Figura 3.—Nivel mineralizado. Se observa que la roca de caja está constituida por una secuencia de energía decreciente de muro a techo. Las formas amigdalares corresponden a concentraciones diferenciales de crisocola intersticial.

Figura 4.—Muestra de mano perteneciente a una zona mineralizada. Las partes oscuras presentan altas concentraciones de azurita y/o malaquita. En la parte superior de la fotografía las concentraciones de carbonatos de cobre se disponen en lechos paralelos a la estratificación, mientras que en el centro de la fotografía se observan concentraciones de finas venas que cortan a las superficies de estratificación. Las partes claras contienen abundante crisocola intersticial.

Figura 5.—Detalle de una de las láminas con concentraciones de restos vegetales, dispuestas paralelamente a la estratificación.

Figura 6.—Restos vegetales reemplazados por limonita (goethita esencialmente), conservándose perfectamente las texturas celulares. Las fracturas que atraviesan estos restos vegetales limonitizados están rellenas por malaquita. Luz reflejada. Nícoles paralelos.

Figura 7.—Nivel de arenisca constituido esencialmente por granos de cuarzo y feldspatos, cementados por calcita y malaquita (negro). Algunos feldspatos muestran un núcleo detrítico alterado y un borde limpio de recrecimiento. Luz transmitida. Nícoles paralelos.

nítidos y limpios. En el conjunto de la roca predomina la azurita. Ambos minerales se encuentran en las siguientes situaciones:

a) Concentrados junto a/o en las inmedia-

ciones de restos vegetales limonitizados o con abundantes óxidos de hierro asociados. Una detallada observación visual, sobre todo en los troncos limonitizados, pone de manifiesto que los car-

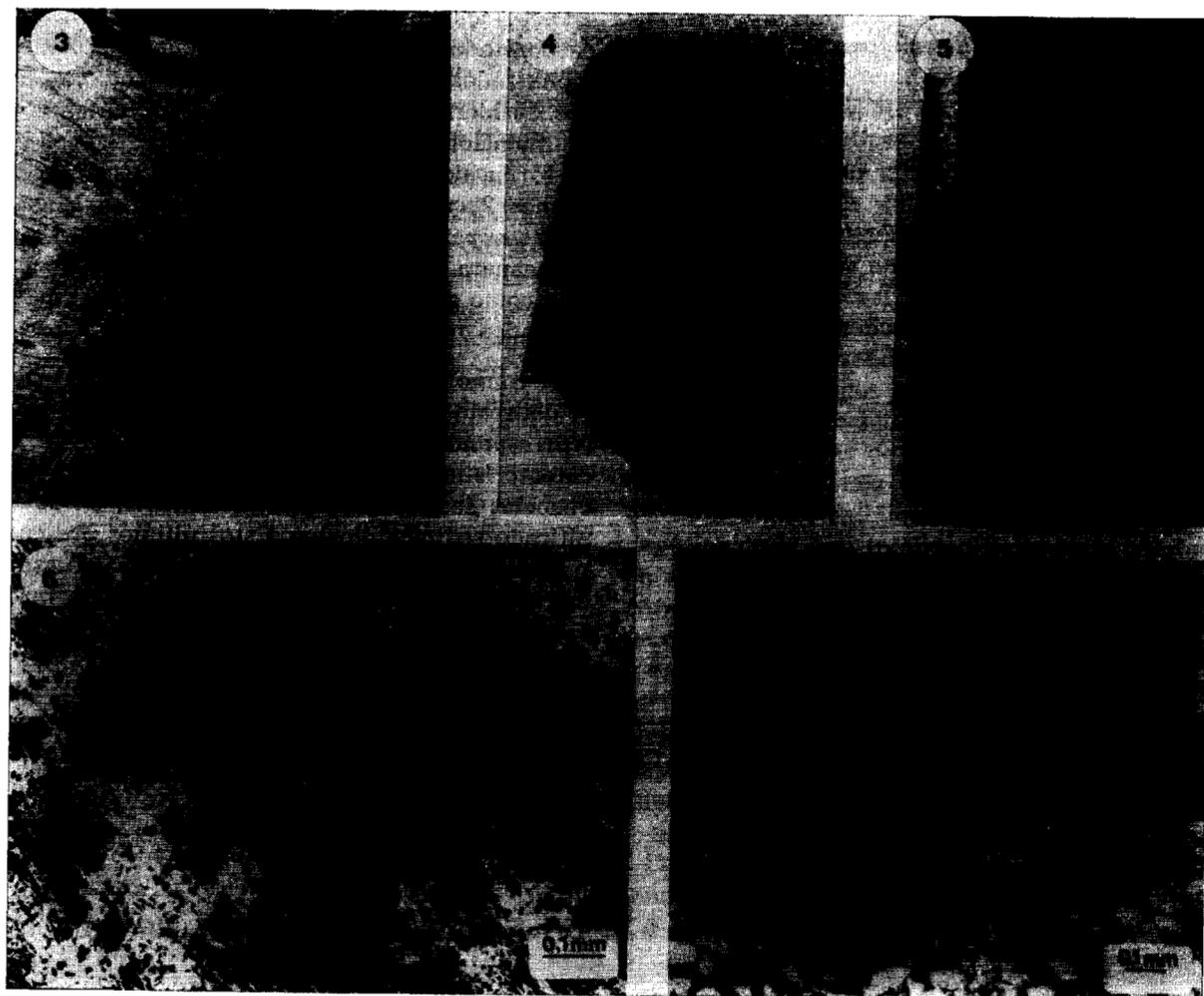


Figura 3.—Nivel mineralizado. Se observa que la roca de caja está constituida por una secuencia de energía decreciente de muro a techo. Las formas amigdalares corresponden a concentraciones diferenciales de crisocola intersticial.

Figura 4.—Muestra de mano perteneciente a una zona mineralizada. Las partes oscuras presentan altas concentraciones de azurita y/o malaquita. En la parte superior de la fotografía las concentraciones de carbonatos de cobre se disponen en lechos paralelos a la estratificación, mientras que en el centro de la fotografía se observan concentraciones de finas venas que cortan a las superficies de estratificación. Las partes claras contienen abundante crisocola intersticial.

Figura 5.—Detalle de una de las láminas con concentraciones de restos vegetales, dispuestas paralelamente a la estratificación.

Figura 6.—Restos vegetales reemplazados por limonita (goethita esencialmente), conservándose perfectamente las texturas celulares. Las fracturas que atraviesan estos restos vegetales limonitizados están rellenas por malaquita. Luz reflejada. Nícoles paralelos.

Figura 7.—Nivel de arenisca constituido esencialmente por granos de cuarzo y feldespatos, cementados por calcita y malaquita (negro). Algunos feldespatos muestran un núcleo detrítico alterado y un borde limpio de recrecimiento. Luz transmitida. Nícoles paralelos.

nítidos y limpios. En el conjunto de la roca predomina la azurita. Ambos minerales se encuentran en las siguientes situaciones:

a) Concentrados junto a/o en las inmedia-

ciones de restos vegetales limonitizados o con abundantes óxidos de hierro asociados. Una detallada observación visual, sobre todo en los troncos limonitizados, pone de manifiesto que los car-

bonatos básicos de cobre cristalizan en las cavidades y fracturas de dichos troncos. La morfología de estas concentraciones viene, pues, determinada por la disposición de los restos vegetales.

b) Como apretadas concentraciones de finísimas y alargadas venas, con espesores de conjunto comprendidos entre 1 mm. y unos 2 cm. Dichas agrupaciones de venas, con frecuencia, tienden a disponerse con sus máximas dimensiones subparalelas a las superficies de estratificación, si bien, en detalle, cortan claramente a las estructuras sedimentarias con ángulos muy variables.

c) Como pequeñas concentraciones intersticiales aisladas unas de otras y con una disposición de conjunto que «a grosso modo» sigue tanto la laminación horizontal como los «sets» de estratificación cruzada.

d) En forma de finas costras que tapizan las paredes de fracturas, por lo general muy verticales.

— La crisocola se presenta esencialmente con un carácter intersticial cementando los niveles de arenisca. La presencia de significativas cantidades de este mineral le confiere a la roca un color verde azulado claro. Aunque en general se encuentra según niveles, su distribución no es homogénea. Así, unas veces se concentra en finos lechos paralelos a la estratificación, confiriéndole a la roca un bandeado de color, con alternancia de lechos grises y lechos verdosos, y otras veces se concentra en determinados puntos dando formas amigdalares que se disponen siguiendo las direcciones de la laminación (fig. 3). Con menor frecuencia, también se presenta tapizando las paredes de pequeñas fracturas. Conviene señalar que, aunque la crisocola no había sido identificada y descrita en anteriores estudios sobre esta mineralización, su abundancia en el conjunto de la roca es mayor que la de los carbonatos básicos de cobre.

PETROGRAFIA DE LOS NIVELES MINERALIZADOS

Este estudio petrográfico se centra en los niveles de arenisca que son los que contienen la gran mayoría de los minerales de cobre. Los lechos de limos y arcillas intercalados sólo mues-

tran pequeñas cantidades de azurita y malaquita bien asociadas a restos vegetales o en finas venas.

Las areniscas presentan unos porcentajes de granos y de matriz muy variables de unos niveles a otros. En conjunto, los valores más frecuentes se pueden estimar comprendidos entre los siguientes márgenes:

	%
Granos	50-80
Matriz (1)	20-50

Tomando como referencia la clasificación de PETTIJOHN (1954), estas rocas se pueden catalogar como grauvacas feldespáticas.

Para facilitar el estudio óptico se han realizado diversas tinciones sobre láminas delgadas: los feldespatos se han teñido con cobaltonitrito sódico, cloruro de bario y solución de Amaranto, según el método de BOONE y WHEELER (1968), y los carbonatos se han teñido con rojo de alizarina y ferricianuro potásico según el método de EWAMY (1963).

Granos detríticos

1) Cuarzo

Su proporción media oscila alrededor del 60-70 por 100 del total de los granos. El tamaño varía entre 50 y 300 micras y sus formas más frecuentes son subangulosas a subredondeadas (figs. 7 a 9). La mayoría de los cristales muestran extinción ondulante y en los cristales alargados su máxima dimensión no coincide con el eje c cristalográfico. Aunque en muy escasa proporción, se observan algunos granos con inclusiones de diminutos cristales de apatito y/o rutilo. Cuando están englobados o en contacto con el cemento dolomítico, los granos de cuarzo están corroídos por la dolomita, sobre todo en sus bordes. En menor extensión, algunos granos también están corroídos por crisocola intersticial. Sólo de forma muy esporádica y puntual, se aprecian algunos ligeros recrecimientos de cuarzo sobre los granos detríticos, con idéntica orientación óptica, puestos de manifiesto por la presencia de diminutas inclu-

(1) Se entiende aquí como matriz tanto la de origen detrítico como el cemento de precipitación química.

siones separando la zona recrecida de la parte central correspondiente al núcleo detrítico.

2) *Feldespato potásico*

Constituye entre el 20 y el 30 por 100 de los granos como valores más frecuentes. Sus tamaños oscilan entre 100 y 400 micras y las formas varían desde subangulosas o subredondeadas hasta euédrales con predominio de estas últimas. El estudio óptico pone de manifiesto la existencia tanto de ortosa como de microclina, en proporciones variables de unas zonas a otras, aunque en conjunto predomina la ortosa. Los cristales de este último mineral en su mayoría se presentan sin maclar y sólo un pequeño porcentaje muestra la macla de Carlsbad. Por el contrario, los cristales de microclina presentan la típica macla en enrejado (figura 8).

La gran mayoría de los granos muestran un borde euédral de recrecimiento, el cual queda muy bien diferenciado de los núcleos detríticos debido tanto a la existencia de ligeras diferencias de orientación óptica, como debido a los efectos de la meteorización sufrida por los núcleos, lo que hace que éstos se presenten algo sucios y alterados frente a los bordes de recrecimiento que aparecen frescos y limpios (figs. 7 a 9).

Muchos cristales están parcialmente corroidos por dolomita y sobre todo por crisocola. Este reemplazamiento afecta fundamentalmente a los núcleos y se realiza a partir de los bordes de cristales, fracturas y planos de exfoliación (fig. 9).

3) *Plagioclasas*

Su proporción es muy escasa. En las muestras estudiadas su porcentaje no sobrepasa en ningún caso el 2 ó 3 por 100 de los granos. Las formas y tamaños de los granos son similares a los del feldespato potásico y como aquél muestran un borde de recrecimiento. Presentan maclas polisintéticas según la ley de la albita y su composición corresponde a la de términos albita-oligoclasa. Las tinciones selectivas efectuadas parecen evidenciar la existencia de una parcial potasificación de las plagioclasas, ya que éstas se tiñen ligeramente con la tinción selectiva del feldespato potásico.

4) *Fragmentos de rocas*

Son muy escasos y en ningún caso su propor-

ción sobrepasa el 2 ó 3 por 100 de los granos. Están constituidos casi exclusivamente por granos redondeados de cuarcitas con tamaños medios de 100 a 300 micras. Los cristales de cuarzo que los forman presentan tamaños del orden de 20-40 micras y muestran bordes indentados y textura granoblástica.

5) *Fragmentos de restos vegetales*

En el conjunto de estas rocas constituyen una pequeña fracción, siendo muy difícil de cuantificar ya que sus concentraciones se hallan dispersas y con una distribución heterogénea. Como ya se ha comentado anteriormente, se presentan de varias formas: como acumulaciones de hojas y ramas, formando delgadas láminas paralelas a la estratificación, como diminutas partículas dispersas y, más esporádicamente, como gruesos troncos muy aislados unos de otros. En la mayoría de estos vegetales carbonizados se observan muy bien las huellas de la estructura vegetal. Generalmente, llevan asociados abundantes óxidos de hierro (esencialmente goethita), los cuales, con relativa frecuencia, reemplazan parcial o totalmente a los restos más consistentes (troncos) conservándose muy bien la estructura interna celular (fig. 6).

6) *Minerales pesados*

Su proporción es muy escasa, oscilando por término medio entre el 0,5 y el 1 por 100. Por orden de abundancia se han detectado los siguientes minerales: mica incolora, hematites, rutilo, turmalina, biotita, clorita y zircón. Aunque en ínfima cantidad, merece destacarse la presencia de diminutas partículas de oro, presentes fundamentalmente entre los restos vegetales carbonizados y limonitizados. Los tamaños más frecuentes de estas partículas son inferiores a 10 micras, si bien se han encontrado varias de tamaños máximos en torno a 60 micras.

Matriz detrítica

Su proporción es extremadamente variable de unas muestras a otras. En algunas constituye hasta el 50-60 por 100 de la roca, mientras que en otras no llega al 5 por 100. Mediante estudios de difracción de rayos X se pone de manifiesto que esta fracción está constituida esencialmente por



illita (más del 90-95 por 100), por muy escasa proporción de clorita y por trazas de caolinita, datos estos ya publicados para estas rocas en otras zonas próximas (SANTOS FRANCÉS et al., 1976).

Principales rasgos texturales de la fracción detrítica

Las rocas estudiadas son fina a muy finamente granudas y muestran una buena clasificación granulométrica en los distintos niveles. Los tamaños más frecuentes de los granos oscilan entre 100 y 200 micras, con un tamaño medio en torno a 150 micras. Las formas de los granos varían desde subangulosas y subredondeadas a euédrales, si bien es necesario señalar que esta característica está muy influenciada por procesos postdeposicionales y por la naturaleza de los distintos minerales. Así, mientras que los granos de cuarzo son subangulosos a subredondeados, los feldespatos muestran una tendencia al idiomorfismo ya en los núcleos detríticos, característica ésta que se acusa enormemente en los recrecimientos autígenos de los cristales. También de gran importancia, otro proceso postdeposicional que influye en la morfología de los granos es la existencia de reemplazamientos de los granos de cuarzo y de feldespato tanto por dolomita como por crisocola.

En general, estas rocas han sufrido un grado de compactación relativamente bajo a moderado. La mayor parte de los contactos entre granos son de tipo tangencial y en menor proporción rectilíneos. Son muy escasos los de tipo cóncavo-convexo y excepcionales las líneas de sutura bien desarrolladas, caracteres estos últimos típicos de disolución por presión. No obstante, los efectos de la compactación quedan puestos de manifiesto por la rotura de granos y por la presencia de cristales de mica y clorita doblados adaptándose a la forma de los granos de cuarzo y de feldespato.

Cemento de precipitación química y otros minerales autígenos

El cemento de precipitación química se presenta en proporciones muy variables según niveles y zonas, pudiendo alcanzar en algunos casos unos valores máximos del orden del 30-40 por 100 de la roca. Está constituido fundamentalmente por dolomita, crisocola y por carbonatos básicos

de cobre. En menor porcentaje existen también óxidos de hierro hidratados. Otros minerales autígenos son: cuarzo, feldespatos y óxidos de manganeso.

1) *Cuarzo y feldespatos autígenos*

Como ya se ha comentado al hablar de los granos detríticos, se presentan como recrecimientos. En el cuarzo son raros, mientras que en los feldespatos están muy extendidos.

2) *Oxidos de hierro*

Se presentan bien de forma intergranular o reemplazando a los restos vegetales. Están constituidos esencialmente por goethita.

3) *Oxidos de manganeso*

Se encuentran con formas dendríticas tapizando las paredes de pequeñas fracturas.

4) *Dolomita*

Es el mineral más abundante del cemento y está presente en la totalidad de las muestras, encontrándose dispersa en la roca (fig. 8) y en cantidades muy variables según las zonas. Como patrón general, su abundancia está en relación inversa con la de la matriz detrítica arcillosa. Generalmente se presenta como agregados de cristales con texturas equigranulares y formas que varían desde anhedrales a subeuédrales. Los tamaños más frecuentes de cristales están comprendidos entre 0,1 y 0,6 mm. Dentro de algunos cristales se observan numerosas y diminutas inclusiones de óxidos de hierro y/o materia orgánica, dispuestas ordenadamente en zonas concéntricas de secciones rómbicas euédricas, marcando sucesivas etapas del crecimiento y confiriéndole a los cristales una estructura interna zonada. En ocasiones, debido a procesos de recristalización, esta estructura definida por las inclusiones queda sobreimpuesta a diferentes cristales.

El estudio textural pone claramente de manifiesto que la cristalización de la dolomita se produce con posterioridad a los recrecimientos diagenéticos del cuarzo y los feldespatos. Durante su formación se produce una corrosión de los granos de cuarzo y feldespato en los bordes y a partir de pequeñas fracturas.

5) *Crisocola*

Su existencia ha sido confirmada mediante la realización de un análisis químico (tabla 1), previa separación de los demás constituyentes mediante un separador isodinámico y líquidos densos. Tanto de visu como al microscopio muestra un color verde azulado claro. Se presenta fundamentalmente como material intersticial cementando los niveles areniscosos (fig. 8). Su proporción es muy variable de unas muestras a otras, pudiendo llegar a constituir, en algunos casos, hasta el 35-40 por 100 del cemento. Como en el caso de la dolomita, su proporción está en relación inversa con la de la matriz detrítica arcillosa. Con frecuencia se encuentra como pequeños agregados fibrosos generalmente criptocristalinos, dispuestos con estructura radial, dando formas esferulíticas con unos tamaños medios de diámetro comprendido entre 50 y 100 micras (fig. 8). También se presenta como masas sin forma definida y como finas costras alrededor de otros minerales (fig. 10). De forma más esporádica se encuentra tapizando las paredes de pequeñas fracturas.

TABLA 1

Análisis químico de crisocola (*) (en %).

SiO ₂	38,98
CuO	36,03
H ₂ O+ 100°	12,66
H ₂ O- 100°	8,08
Al ₂ O ₃	1,91
Fe ₂ O ₃	0,84
MgO	2,04
CaO	0,66
Na ₂ O	0,00
K ₂ O	0,14
TOTAL	101,34

(*) El concentrado obtenido contiene pequeñas impurezas de filosilicatos.

SiO₂ ha sido determinado por gravimetría, los restantes óxidos por adsorción atómica.

Su grado de cristalinidad, aunque variable de unos puntos a otros, es en general muy bajo. Este hecho viene corroborado por el bajísimo poder reflectante mostrado en su difractograma de rayos X.

El estudio de las relaciones texturales con los demás componentes de la roca evidencia que su formación ocurre con posterioridad a la del cemento dolomítico. Su formación va acompañada de la fuerte corrosión de los cristales de dolomita, cuarzo y sobre todo de los feldespatos (fig. 9).

6) *Azurita y malaquita*

Ambos minerales se presentan tanto intergranularmente como rellenando fracturas y cavidades (figs. 10 a 12). En gran parte se encuentran formando finísimas y alargadas venas (a modo de hilos) en las que los cristales se disponen con formas tabulares, con sus máximas dimensiones perpendiculares a las paredes de las fracturas, dando así texturas en peine.

Como patrón general y aunque a muy pequeña escala (a veces del orden milimétrico), azurita y malaquita se encuentran separados espacialmente, bien presentándose en lechos distintos o con paso lateral de un mineral a otro. En las zonas de tránsito se observa que los contactos entre ambas especies son muy netos y limpios. Estos hechos parecen evidenciar una cristalización contemporánea de ambos minerales.

En su conjunto estos minerales son los últimos en cristalizar en la roca, si bien en algunas zonas su formación se puede solapar con la de la crisocola. Ocasionalmente, en algunas zonas se observa que reemplaza parcialmente a granos de feldespato.

Como ya se ha comentado anteriormente, una gran parte de los carbonatos básicos de cobre se encuentran concentrados junto a/o en las proximidades de las concentraciones de restos vegetales «limonitizados» o con abundantes óxidos de hierro asociados. En estos casos conviene señalar que, contrariamente a lo señalado con anterioridad por FERNÁNDEZ y PÉREZ GARCÍA (en prensa), los restos vegetales están reemplazados exclusivamente por óxidos de hierro (goethita esencialmente), mientras que los carbonatos de cobre se encuentran siempre rellenando huecos y pequeñas fracturas.

A excepción de la presencia de los minerales de cobre descritos, la composición y evolución de las rocas que los contienen es similar a la de otros tramos de facies de canal, con la salvedad de la

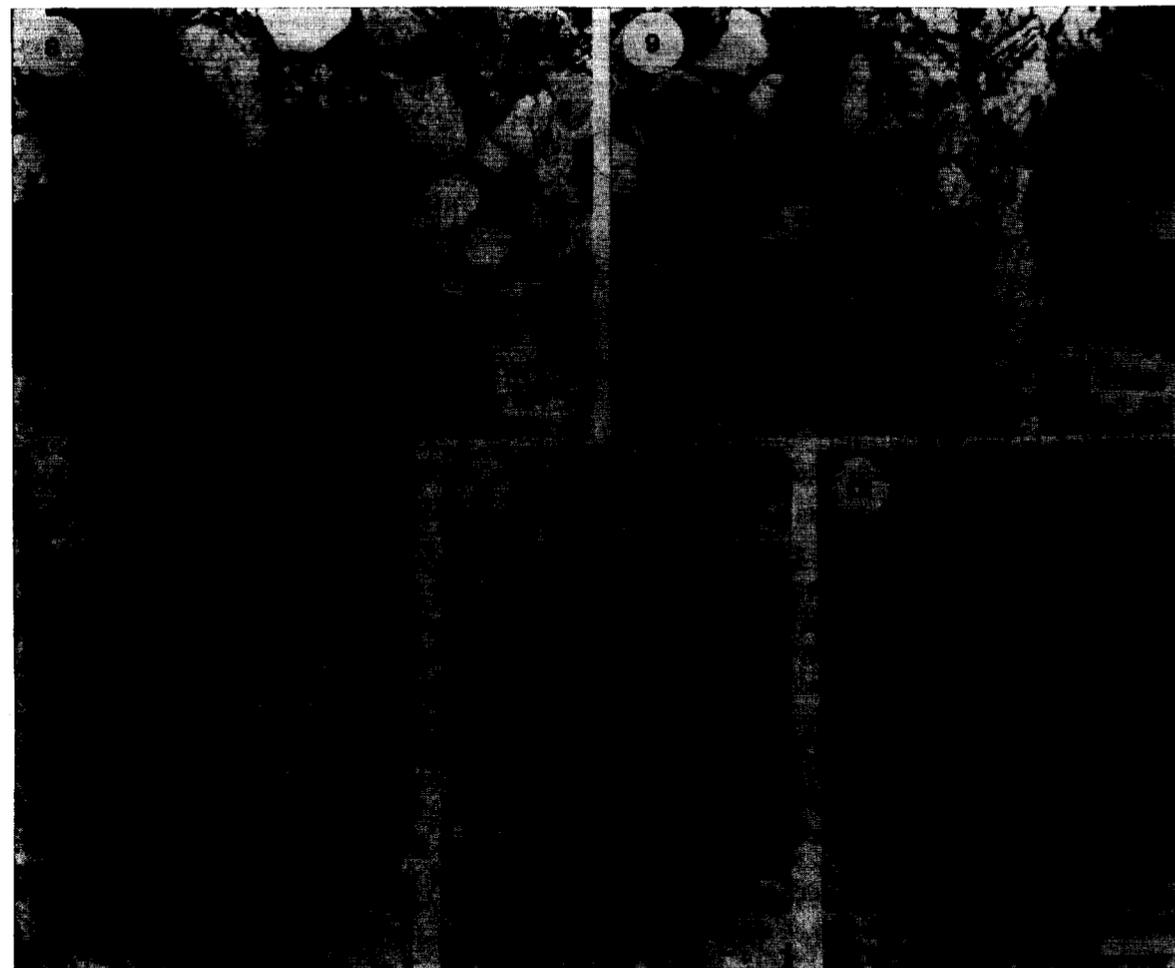


Figura 8.—Granos de cuarzo y de feldespatos cementados por calcita y crisocola. En el centro de la fotografía se observa un cristal de microclina con un borde autógeno de recrecimiento. La crisocola se presenta como esferulitos con estructura fibrosa radiada. Luz transmitida. Nícoles cruzados.

Figura 9.—Crisocola intergranular y reemplazando cristales de feldespato. Luz transmitida. Nícoles paralelos.

Figura 10.—Crisocola en finas costras alrededor de los granos de la arenisca. Malaquita bien cristalizada rellenando una cavidad (parte central y superior de la fotografía). Luz transmitida. Nícoles paralelos.

Figura 11.—Azurita (negro) intergranular y reemplazando parcialmente a los granos de cuarzo y feldespato. Luz transmitida. Nícoles paralelos.

Figura 12.—Finas venas de azurita atravesando un nivel de arenisca. Luz transmitida. Nícoles paralelos.

presencia en estos últimos de abundantes ceolitas (SANTOS FRANCÉS et al., 1976).

avanzada dentro de la evolución de la roca. Dicha evolución puede ser resumida de la siguiente forma:

DISCUSION DE LOS RESULTADOS Y CONSIDERACIONES METALOGENICAS

De acuerdo con lo expuesto en los apartados anteriores, se deduce que la formación de la mineralización se ha producido en una fase muy

Etapa sedimentaria

Depósito de material detrítico procedente de la erosión de los relieves hercínicos circundantes (granos de cuarzo, feldespatos, fragmentos de rocas y minerales pesados, junto con matriz arcillosa y restos vegetales), depositados en un am-

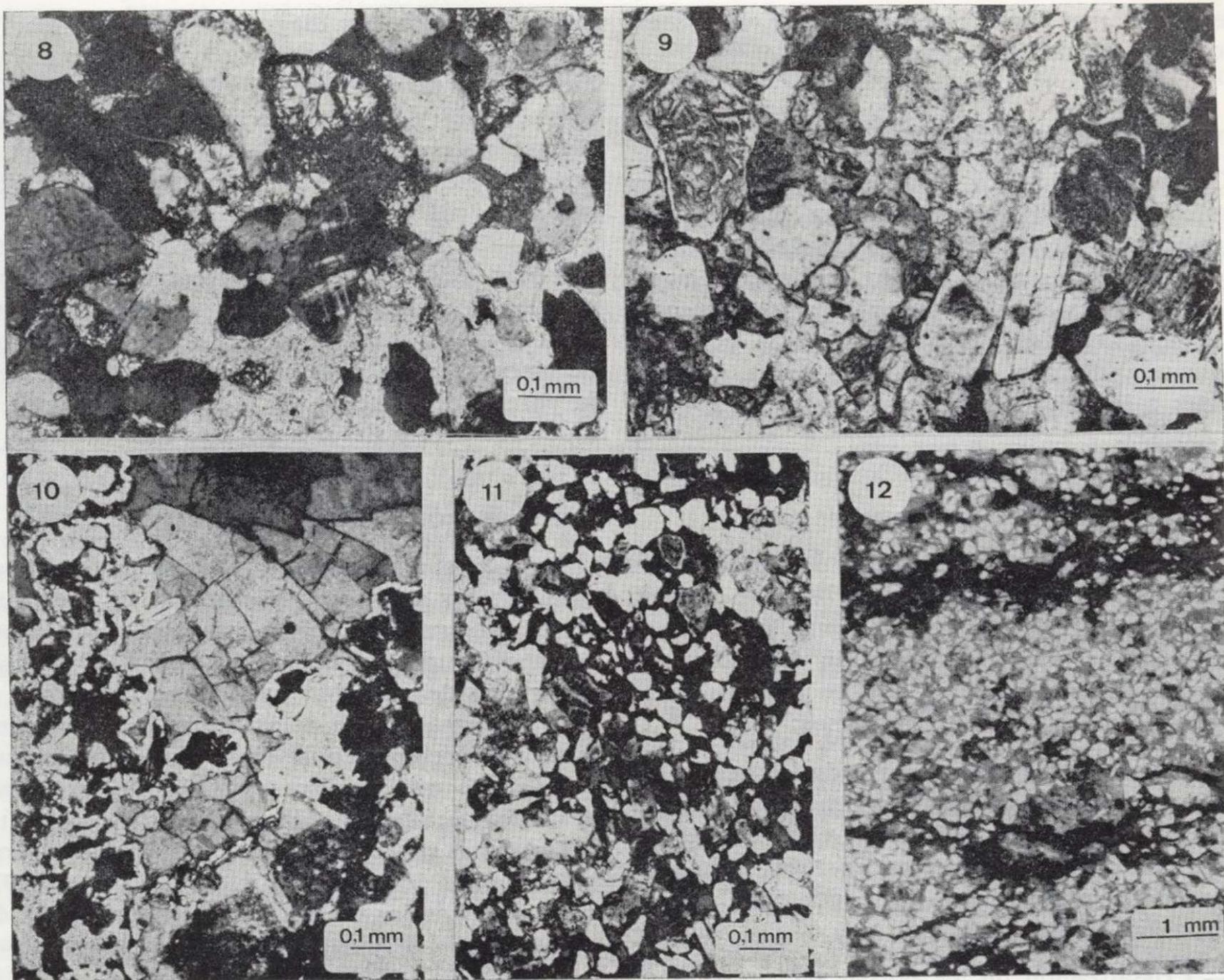


Figura 8.—Granos de cuarzo y de feldspatos cementados por calcita y crisocola. En el centro de la fotografía se observa un cristal de microclina con un borde autógeno de recrecimiento. La crisocola se presenta como esferulitos con estructura fibrosa radiada. Luz transmitida. Nícoles cruzados.

Figura 9.—Crisocola intergranular y reemplazando cristales de feldespato. Luz transmitida. Nícoles paralelos.

Figura 10.—Crisocola en finas costras alrededor de los granos de la arenisca. Malaquita bien cristalizada rellenando una cavidad (parte central y superior de la fotografía). Luz transmitida. Nícoles paralelos.

Figura 11.—Azurita (negro) intergranular y reemplazando parcialmente a los granos de cuarzo y feldespato. Luz transmitida. Nícoles paralelos.

Figura 12.—Finas venas de azurita atravesando un nivel de arenisca. Luz transmitida. Nícoles paralelos.

presencia en estos últimos de abundantes ceolitas (SANTOS FRANCÉS et al., 1976).

DISCUSION DE LOS RESULTADOS Y CONSIDERACIONES METALOGENICAS

De acuerdo con lo expuesto en los apartados anteriores, se deduce que la formación de la mineralización se ha producido en una fase muy

avanzada dentro de la evolución de la roca. Dicha evolución puede ser resumida de la siguiente forma:

Etapa sedimentaria

Depósito de material detrítico procedente de la erosión de los relieves hercínicos circundantes (granos de cuarzo, feldspatos, fragmentos de rocas y minerales pesados, junto con matriz arcillosa y restos vegetales), depositados en un am-

biente de canal fluvial secundario, activo sólo en épocas de crecida del flujo.

Procesos postdeposicionales

Con posterioridad al depósito de los materiales detríticos, el sedimento sufre una serie de importantes transformaciones dentro del campo de la diagénesis en sentido amplio, pudiendo diferenciarse distintas etapas. Tomando como referencia la nomenclatura de BADIOZAMANI (1973), podemos hacer una división entre los procesos pertenecientes a la «diagénesis temprana» y a «diagénesis tardía».

Procesos diagenéticos tempranos

Durante esta etapa, equivalente a los conceptos de «diagénesis» de STRAKHOV (1970) y de BISSELL y CHILINGAR (1967) y que abarca aquellos procesos que conducen a la transformación del sedimento en roca sedimentaria, en las rocas estudiadas se producen los siguientes procesos:

— Reemplazamiento de parte de los restos vegetales por óxidos de hierro hidratados (goethita esencialmente), encontrándose, con frecuencia, muy bien preservadas las estructuras celulares. Esta buena preservación pone de manifiesto la precocidad de este proceso.

— Cristalización de los bordes de recrecimiento sobre los granos detríticos de cuarzo y sobre todo de los feldespatos.

— Precipitación del cemento dolomítico en los intersticios y parcial corrosión de los granos de cuarzo y feldespatos por la dolomita.

— Durante esta fase diagenética, en la matriz arcillosa se producen importantes modificaciones cristalquímicas de los minerales de la arcilla, tal y como han puesto de manifiesto en otros sectores SANTOS FRANCÉS et al. (1976).

A partir de los procesos mencionados y de la asociación mineralógica resultante, se pueden hacer algunas consideraciones sobre las características fisicoquímicas de las soluciones intersticiales. Así, éstas debieron ser alcalinas, bicarbonatadas y muy ricas en sales (con significativas cantidades de K, Ca y Mg). Asimismo, la asociación de óxidos férricos con restos de vegetales limita los márgenes del potencial de oxidación-reducción.

De acuerdo con los diagramas de estabilidad de los sedimentos en función de las condiciones ambientales en términos de pH y Eh (KRUMBEIN y GARRELS, 1952) y de distribución de Eh-pH en ambientes naturales (BAAS BECKING et al., 1960), se pueden estimar como muy probables unos márgenes de pH y Eh comprendidos entre 8 a 10 y 0 a -0,2 mV, respectivamente. Tales márgenes vendrían delimitados por las barreras geoquímicas de los carbonatos cálcico y/o magnésico, materia orgánica y del paso de óxidos a carbonatos de hierro. No obstante, conviene señalar que dada la parcial destrucción de la materia orgánica, el ambiente podría llegar a ser algo más oxidante.

Procesos epigenéticos o diagenéticos tardíos

En una etapa posterior y claramente diferenciada de las anteriores, se produce la formación de los minerales de cobre: crisocola y carbonatos básicos (azurita y malaquita). Aunque es difícil hacer una delimitación precisa, no cabe duda de que la formación de estos minerales se produce cuando el sedimento original ya estaba consolidado como una arenisca y, por tanto, estos procesos formarían parte de la etapa diagenética tardía según el concepto de BADIOZAMANI (1973), equivalente a los de «catagénesis» de STRAKHOV (1970) y de «epigénesis» de BISSELL y CHILINGAR (1967).

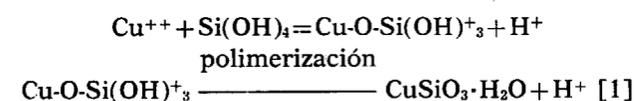
Formación de crisocola

A pesar de que en la actualidad se dispone de numerosos estudios y análisis de crisocolas, aún existen discrepancias sobre su fórmula química y estructura, si bien se admite una variabilidad en su composición y que posee una estructura altamente desordenada. Estas propiedades han conducido a diferentes autores a considerar que la crisocola no se forma como una especie mineral definida químicamente, sino como un hidrogel o precipitado gelatinoso, siendo una solución sólida de CuO , SiO_2 y de H_2O como componentes esenciales, cuya composición en cada caso depende de sus condiciones de formación, habiéndose propuesto diferentes fórmulas (FOOTE y BRADLEY, 1913; SUMIN y LASHEVA, 1951; SUN, 1963, entre otros). En contraposición a estas ideas, VAN OOSTERWYCK-GASTUCHE (1970) considera que la crisocola es una especie mineral de composición definida, correspondiente habitualmente a la fórmula $(\text{Si}_4\text{O}_{10})_2$, $\text{Cu}_8(\text{OH})_{12}$, $8\text{H}_2\text{O}$, aunque también se

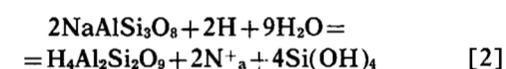
encuentran fórmulas con 0 y $4\text{H}_2\text{O}$. Respecto a su estructura se han propuesto varias hipótesis: a) estructura de tipo esmectita (ROSS y HENDRICH, 1945; CHUKROV y ANOSOV, 1950; SUMIN y LASHEVA, 1951), idea esta criticada por SUN (1963); b) estructura de filosilicato dioctaédrico 1:1 tipo caolinita-antigorita (CHUKROV et al., 1968), y c) estructura en cadena del tipo sepiolita o paligorskita (VAN OOSTERWYCK-GASTUCHE, 1970).

Respecto a sus condiciones de formación, diferentes trabajos de síntesis experimental, junto con las características de los medios naturales donde se presenta, evidencian que la crisocola se puede formar a partir de soluciones con Cu y sílice disuelta (en forma de ácido silícico), o bien a partir de reacciones entre minerales silicatados y soluciones portadoras de Cu, en un medio de pH cercano a la neutralidad (NEWBERG, 1967). Un primer paso de estas reacciones es la formación del complejo hidróxilo metaestable de cobre, $\text{Cu-O-Si}(\text{OH})_3$, que por polimerización flocula dando lugar a la crisocola (ILER, 1955).

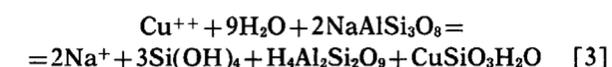
Así, la crisocola se puede formar mediante la siguiente reacción:



Por otra parte, las soluciones portadoras del cobre pueden producir la hidrólisis de minerales silicatados, como por ejemplo:



Combinando las dos ecuaciones [1] y [2]:



Esta última reacción [3] indica que un silicato de cobre amorfo, como la crisocola, puede formarse por reacción sólido-solución a pH constante y, además, que tal reacción es «autocatalítica», ya que la sílice liberada en solución puede combinarse con más cobre para formar adicional silicato de cobre (NEWBERG, 1967). De acuerdo con este autor, tal mecanismo es más idóneo para la formación de la crisocola, ya que tiende a prevenir la sobresaturación de la solución respecto a sulfatos hidróxilos insolubles, y por otra parte si se mantuvieran condiciones ácidas, como es el

caso de la reacción de la ecuación [1], se inhibiría o ocurriría muy lentamente la polimerización del $\text{Cu-O-Si}(\text{OH})_3$ y, por tanto, la formación de la crisocola.

En el caso de la mineralización que nos ocupa, pensamos que la crisocola se ha formado a partir de reacciones entre los minerales silicatados que forman la arenisca y las soluciones portadoras del Cu, además de por las razones teóricas aducidas anteriormente, por la existencia de los siguientes hechos en los niveles mineralizados: a) importante corrosión de cristales de cuarzo y sobre todo de feldespatos por la crisocola, y b) por la presencia de filosilicatos junto a la crisocola (posible caolinita, aún no caracterizada).

Formación de los carbonatos básicos de cobre

Aunque en parte su formación se puede solapar en algunos puntos con la de la crisocola, en su mayor parte cristalizan claramente con posterioridad. Su frecuente aparición junto a/o en las proximidades de restos vegetales, generalmente «limonitizados» o con abundantes óxidos de hierro asociados, parece estar justificada por la concurrencia en estas zonas de los siguientes hechos favorables para su formación: por una parte, la gran capacidad de adsorción de cobre que muestran tanto los óxidos hidratados de hierro como la materia orgánica (KRAUSKOPF, 1956; STRAKOV, 1970; ONG y SWANSON, 1966; WEDEPHEL, 1978, entre otros), poniéndose de manifiesto que, manteniendo constantes las demás variables, el equilibrio de adsorción viene determinado por la cantidad de adsorbente y por la concentración de cobre en solución, y por otra parte, el hecho de la descomposición de la materia orgánica en ambiente oxidante, con producción de CO_2 , crean las condiciones físico-químicas idóneas para la formación de los carbonatos básicos de cobre en estas zonas.

La contemporaneidad de la formación de azurita y malaquita en lechos o zonas diferentes se debe a variaciones locales en los valores de P_{CO_2} . Así, de acuerdo con los diagramas de estabilidad de los compuestos de cobre en el sistema $\text{Cu-CO}_2\text{-O}_2$, en función de P_{O_2} y P_{CO_2} , a 25°C y 1 atmósfera, en solución diluida, la malaquita es la especie estable a altos valores de P_{O_2} y P_{CO_2} de $10^{-3.5}$, mientras que la azurita es la especie estable al

aumentar los valores de P_{CO_2} , o por decrecimiento de la actividad del agua (GARRELS y CHRIST, 1965).

A partir de la asociación mineralógica constituida por crisocola, azurita y malaquita y teniendo en cuenta las consideraciones efectuadas sobre sus condiciones de formación, se deduce que la mineralización se ha producido por la interacción de soluciones ricas en Cu con los constituyentes de las rocas encajantes, formándose los minerales de cobre en un medio claramente oxidante y en condiciones ligeramente alcalinas, próximas a la neutralidad, ya que condiciones fuertemente alcalinas o ácidas desestabilizan a la crisocola.

ORIGEN DEL COBRE Y NATURALEZA DE LAS SOLUCIONES TRANSPORTADORAS

De acuerdo con el contexto geológico en el que están enmarcadas estas mineralizaciones, el origen del cobre no parece problemático. En efecto, dada la inmediata proximidad de las rocas metamórficas e ígneas del zócalo Hercínico, que son las que han aportado los constituyentes detríticos de las rocas encajantes de la mineralización, y el hecho de que en ellas existan numerosos filones de sulfuros de Cu y/o Pb fundamentalmente, parece lógico pensar que estos yacimientos primarios del zócalo sean la fuente de la mineralización aquí estudiada.

De acuerdo con STRAKHOV (1970) y SAMAMA (1973) entre otros, los tres principales aspectos que controlan la génesis de los depósitos estratoligados de Cu, U, Pb y/o Zn en areniscas (tipo sandstone o red beds) están relacionados con: a) el contenido metálico del «zócalo»; b) las características de la meteorización, y c) las peculiaridades paleogeográficas de los ambientes detríticos. Asimismo, como señala STRAKHOV (1970), la distribución de las menas en regiones áridas está controlada principalmente por el carácter petrográfico y régimen tectónico de las áreas de drenaje. Es necesario que las rocas madre tengan un alto contenido en el metal considerado, que esté en una forma fácilmente accesible a la meteorización química y que sea fácilmente movilizable en tales condiciones climáticas. En zonas climáticas áridas, como es el caso que nos ocupa, en las que predominan los fenómenos de erosión mecánica, la meteorización química queda restringida fundamentalmente a la aparición de lu-

gares húmedos en torno a las áreas de drenaje desarrolladas por la existencia de un considerable relieve topográfico. Es en estas áreas donde a través de la meteorización química de yacimientos primarios de sulfuros, el cobre puede pasar a solución en forma de sulfatos solubles. Es por todas estas causas que las areniscas cupríferas usualmente se forman inmediatamente después de las mayores épocas orogénicas, en zonas plegadas o en las partes de plataforma adyacentes, en cualquier caso frente a un fondo de marcada actividad tectónica (SAPOZHNIKOV, 1948; FEOKTISTOV y KOCHIN, 1972).

En nuestra opinión, la génesis de las mineralizaciones estudiadas está condicionada por un marco geológico similar al descrito anteriormente (figura 13). El cobre procedería de la meteorización de los yacimientos primarios de sulfuros del zócalo Hercínico, de los que sería lixiviado en las zonas de oxidación y transportado esencialmente como sulfatos solubles por las aguas de drenaje. Estas aguas, que inicialmente presentarían un carácter marcadamente ácido, debido a la naturaleza de los procesos de oxidación de los sulfuros, se infiltrarían a través de determinados cuerpos porosos migrando esencialmente en sentido lateral. De esta forma irían neutralizándose a causa de su interacción con los constituyentes de las rocas encajantes y los minerales de cobre se formarían al crearse en determinadas zonas unas barreras fisicoquímicas idóneas. En nuestro caso tales barreras están constituidas por la menor porosidad que muestran las facies de canal secundario y por la interacción de las soluciones portadoras del cobre con los constituyentes mineralógicos de tales rocas.

Si bien la gran mayoría de los depósitos de cobre de tipo «sandstone» o «red beds» están constituidos sobre todo por sulfuros, formados, por tanto, en un ambiente reductor, concentraciones de crisocola y carbonatos básicos de cobre se encuentran con relativa frecuencia en la zona de oxidación desarrollada sobre tales depósitos primarios de sulfuros, así como en niveles de rocas detríticas adyacentes, como son los casos de Sierra Nacimiento en Nuevo Méjico (WOODWARD et al., 1974), Chuquicamata en Chile (NEWBERG, 1967) y Mina Inspiración en Arizona (ALLEN et al., 1971) entre otros. En algunos casos, como en Chuquicamata, se han producido «migraciones laterales» muy importantes del cobre, encontrándose las con-

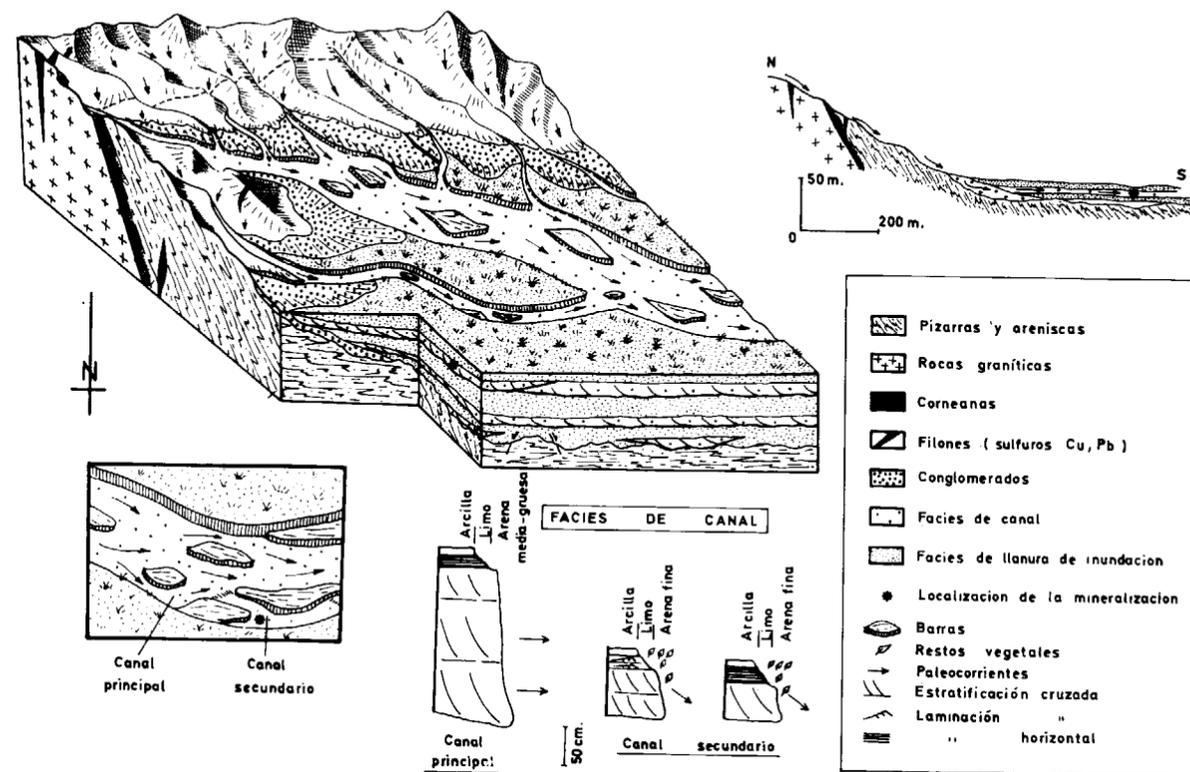


Figura 13.—Esquema interpretativo de la génesis de la mineralización. Esquema interpretativo de los depósitos de Cu estrato-ligados en capas rojas triásicas en el sector de Navas de San Juan (Provincia de Jaén).

centraciones de crisocola y carbonatos básicos de cobre a distancias de hasta 4 km. de la mineralización primaria, constituida en este caso concreto por un yacimiento de tipo «porphyry copper».

Agradecimientos

Los autores agradecen a los Dres. J. Linares y F. Huertas, así como al Profesor Dr. M. Rodríguez Gallego, la ayuda prestada durante la elaboración de este trabajo. Asimismo, a la Profesora Dra. P. Fenoll Hach-Alí la lectura crítica del manuscrito.

BIBLIOGRAFIA

BAAS BECKING, L. G. M.; KAPLAN, I. R., and MOORE, D.: *Limits of the natural environment in terms of pH and oxidation-reduction potentials.* J. Geol., v. 68, 243-284 (1960).
 BADIOZAMANI, K.: *The Dorag Dolomitization model.* Ap-

plication to the Middle Ordovician of Wisconsin. Journ. Sediment. Petrol., 43, 4:965-984 (1973).
 BISSELL, H. J., and CHILINGAR, V.: *Classification of sedimentary carbonate Rocks.* In: *Carbonate Rocks. Origin, occurrence and classification* (G. V. Chilingar, H. J. Bissell and R. W. Fairbridge, editors). Developments in sedimentology. 9A Elsevier Publishing Company, Amsterdam, 87-169 (1967).
 BOONE, G. M., and WHEELER, E. P.: *Staining for cordierite and feldspars in thin section.* Am. Mineralogist., 53, 327-331 (1968).
 CHUKROV, F. V., and ANOSOV, F. J. A.: *Nature of Chrysocolla.* Zapiski Vsesoyuz Mineral. Obsch., 79, 127-136 (ver Chem. Abs. 44, 7724) (1950).
 CHUKROV, F. V.; ZUYAGIN, B. B.; ERMILOVA, L. P.; GOESHKOV, A. I., and RUDNITSKAYA, E. S.: *The relation between Chrysocolla, Medmonite and copper Hallosyte.* Proceeding of the international Clay Conference, vol. I, 141-150 (1969).
 EWAMY, B. D.: *The application of a chemical staining technique to a study of dolomitization.* Sedimentology, 2, 164-170 (1963).
 FEOKTISTON, V. P., and KOCHIN, G. G.: *Certain distinc-*

- tions in localization of stratified deposits of copper. *Inser. Geology Rev.*, 14, 1138-1146 (1972).
- FERNÁNDEZ, J.: *La sedimentación triásica en el borde sur-este de la Meseta*. Tesis, Publicaciones Univ. Granada, 173 pp. (1977).
- FERNÁNDEZ, J., y DABRIO, C. J.: *Facies y secuencias en sedimentos fluviales triásicos*. Abstract. vol. de Resúmenes del IX Congreso Nacional de Sedimentología. Publicaciones Univ. Salamanca (1980).
- FERNÁNDEZ, J., y PÉREZ GARCÍA, L. C.: *Las mineralizaciones de cobre en ríos arenosos de baja sinuosidad (Triásico al N de la provincia de Jaén, España)*. *Bol. Geol. y Minero* (en prensa).
- FOOTE, H. W., and BRADLEY, W. M.: *On solid solution in minerals. IV. The composition of amorphous minerals as illustrated by chrysocolla*. *Am. Jour. Sci.* 4th ser., 36, 180-184 (1913).
- GARRELS, R. M., and CHRIST, C. I.: *Solutions minerals and equilibria*. Harper and Row, New York, 450 pp. (1965).
- ILIER, R. K.: *The colloid chemistry of silica and silicates*. Cornell University Press, Ithaca, New York, 324 pp. (1955).
- KRAUSKOPF, K. B.: *Factors controlling the concentrations of thirteen rare metals in seawater*. *Geochim. Cosmochim. Acta* 9, 1 (1956).
- KRUMBEIN, W. C., and GARRELS, R. M.: *Origin and Classification of chemical sediments in terms of pH and oxidation-reduction potentials*. *J. Geol.*, 1-33 (1952).
- NEWBERG, D. W.: *Geochemical implications of chrysocolla-bearing alluvial gravels*. *Econ. Geol.*, 62, 932-956 (1967).
- ONG, H. L., and SWANSON, V. E.: *Adsorption of copper by peat, lignite and bituminous coal*. *Econ. Geol.*, 61, 1214 (1966).
- PETTIJOHN, F. J.: *Classification of sands-tones*. *Jour. Geol.*, v. 62, 360-365 (1954).
- ROSS, C. S., and HENDRICH, S. B.: *Minerals of the montmorillonite group*. V. S. Geol. Survey Prof. Paper, 205-B, 23-79 (1945).
- SAMAMA, J. C.: *Ore deposits and continental weathering: A contribution to the problem of geochemical inheritance of heavy metal contents of basement areas and of sedimentary basins*. In: *Ores in Sediment*. Ed. by G. C. Amstutz and A. J. Bernard, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg New York, 247-266 (1973).
- SANTOS FRANCÉS, F.; FERNÁNDEZ, J., y LINARES, J.: *Estudio mineralógico de una serie triásica en Alcaraz (Albacete)*. *Estudios Geol.*, 32, 241-247 (1976).
- SAPOZHNIKOV, D. G.: *Cupriferous sand-tones in the western part of central kazakstan*. *Tr. Inst. Geol. nauk. Akad. Nauk SSSR, ser. geol.*, núm. 93 (núm. 28) (1948).
- STRAKHOV, N. M.: *Principles of lithogenesis*. Plenum Publishing Corporation. New York. Oliver & Boyd. Edinburgh., 577 pp. (1970).
- SUMIN, G., and LASHEVA, L. I.: *New modification of chrysocolla of the plancheite type from Mednorddyansk in the Ural*. *Trudy Mineral. Muzeya, Akad. Nauk. SSSR*, 3, 106-121 (ver *Chem. Abs.*, 49, 12220) (1951).
- SUN, M. S.: *The nature of chrysocolla from Inspiration Mine, Arizona*. *Am. Mineralogist*, 48, 649-658 (1963).
- VAN OOSTERWYCK-GASTUCHE, M. C.: *La structure de la Chrysocolle*. *C. R. Acad. Sc. Paris*, t. 271, ser. D, 1837-1840 (1970).

Recibido: Mayo 1983

INFORMACION

Teodoro Ardemans, hidrogeólogo ilustrado de principios del siglo XVIII

Por FERNANDO LOPEZ VERA (*)

RESUMEN

TEODORO ARDEMANS (1664-1726), además de arquitecto, pintor, ingeniero, administrador y autor de unas conocidas ordenanzas municipales de Madrid, fue un hidrogeólogo experto, que identificó el origen de la contaminación urbana de las aguas e hizo notables aportaciones en la construcción de pozos, distribución y legislación de aguas.

ABSTRACT

TEODORO ARDEMANS (1664-1726), architect and water expert, recognized problems of ground-water pollution, well construction, water distribution, and water law. He is also noted for his achievements in architecture and the writing of the first comprehensive building code for Madrid.

INTRODUCCION

TEODORO ARDEMANS, LÓPEZ PIÑERO *et al.* (1983), es recordado como un mediocre arquitecto, constructor del palacio de San Ildefonso en la Granja (Segovia), criticado por ser una pobre imitación del palacio de Versalles. También se le cita como un artista de talento modesto, pintor de cámara de Felipe V, del cual no se ha conservado ninguna obra. Mejor memoria ha dejado entre los madrileños por sus ordenanzas municipales, hasta el punto de haberle dedicado una calle.

Dentro, asimismo, de las actividades de carácter municipal, destacan sus obras en el sistema de abastecimiento y saneamiento del agua de la villa y corte de Madrid, que recoge ASÍN, J. O. (1958), pero su verdadero «genio» parece ser que lo muestra en el campo de la *Hidrogeología*, como lo pone por primera vez de manifiesto DAVIS, S. N. (1973).

(*) Departamento de Geología y Geoquímica. Universidad Autónoma de Madrid.

TEODORO ARDEMANS Y SU EPOCA

Utilizando palabras del historiador ANTONIO DOMÍNGUEZ ORTIZ: «la situación de los territorios de la Monarquía española al finalizar el siglo XVII resultaba, en verdad, lamentable; su degradación en todos los órdenes era visible...».

El Imperio, que un siglo antes imponía sus deseos a no pocos pueblos europeos, era un mero fantasma, una simple sombra de lo que había sido. Ni siquiera alguna de las beneficiosas medidas tomadas en los lustros del reinado de Carlos II (reforma monetaria, creación de la junta de comercio...) habían comenzado a dar resultados tangibles que pudieran ser considerados síntomas de un resurgir del que se tenían escasas esperanzas.

También el optimismo de los españoles había entrado en bancarrota en los últimos tiempos de los Austrias. Era el desenlace lógico a la labor de una pésima administración y a los intentos de efectuar una política exterior desproporcionada con los recursos disponibles y cada vez más distanciada de los anhelos e intereses hispánicos.

Cuando el 1 de noviembre de 1700 la muerte de Carlos II puso fin no sólo a su reinado, sino también a la presencia en el trono español de la Casa de Austria, muchos vieron la posibilidad de terminar con la decadencia, ya que se suponía que Felipe de Anjou, el Borbón nombrado apenas un mes antes heredero de la Monarquía, traería nuevos aires a la administración de tan extensos dominios y cambiaría sustancialmente el papel de la misma en el concierto internacional.

Sin embargo, la transición a la nueva dinastía no fue fácil para España. El reconocimiento de Felipe V, nieto de Luis XIV, causó la hostilidad inmediata de diversos países europeos (DÍAZ-PLAJA, F., 1955). La Guerra de Sucesión Española enfrentó a España y Francia como aliados contra otros países como Inglaterra, Austria y Portugal, entre los más importantes. La guerra duró desde 1701 a 1713. Durante este tiempo, Madrid fue ocupado dos veces por ejércitos hostiles, sufriendo graves daños.

Esta guerra no sólo provocó una división internacional, sino que también enfrentó regiones dentro de España; Cataluña, que apoyará al Archiduque de Austria, ofreció una fuerte resistencia, hasta que finalmente fue ocupada Barcelona por las tropas de Felipe V en 1714.

En esta época, turbulenta y de cambios, vivió ARDEMANS en un ambiente cuyas características se recogen con algunas breves pinceladas en la tabla I.

TEODORO ARDEMANS nació en Madrid en 1664, el mismo año en que moría el pintor extremeño Zurbarán. Hijo de un emigrante alemán que prestará sus servicios en la guardia de Palacio y que tenía cierta influencia en la Corte, de la que se benefició TEODORO ARDEMANS, que disfrutó de una educación esmerada, como él mismo describe en la presentación del libro de las Ordenanzas de Madrid (1719):

«Habiendo la divina Providencia destinado mi inclinación desde la primera edad a las artes liberales de la pintura y arquitectura, me hallé de edad de diez y seis años con no pequeños rasgos de aquélla, empezando a estudiar matemáticas, en que proseguí hasta los diez y ocho, y hasta los veinte en el estudio de la arquitectura, perspectiva y óptica, continuando en la práctica de varias trazas doctrinales de este arte en todas especies de fábrica de piedra, albañilería, madera y metales hasta la edad de los veinte y cinco años, en que ocurrió la celebrada obra de la bóveda de crucería de piedra que cubre el coro de la santa iglesia catedral de Granada, para cuya traza y modelo fui elegido entre doce de los más afamados arquitectos, quedando executada, que ella misma lo manifiesta: logrando el título de maestro mayor de aquella catedral, y dexando con esta ocasión executada una nivelación para conducir un torrente de agua á la vega de aquella ciudad, que había de pasar por siete leguas de distancia, por sierras y valles, y asimismo dexando planteadas diferentes fábricas de iglesias de dicho arzobispado. En la edad de veinte y siete años pasé á esta corte, donde se dignó V.S.I. fiarme la traza y perfección de sus casas de ayuntamiento, logrando el título de ausencias y enfermedades de su maestro mayor. En la de treinta me honró el

Emmo. Sr. cardenal Portocarrero con la plaza de maestro mayor de la santa iglesia de Toledo, executándose en ella por sus trazas continuamente las mayores obras de diversas especies. En el año de mil setecientos me continuó V.S.I. su favor con el título de propiedad de la maestría mayor, é inmediatamente con las ausencias y enfermedades de veedor y fontanero mayor; y hallándome con esta condecoración, toda de la protección de V.S.I., me honró el Rey (que Dios prospere) con el título de maestro mayor de sus obras reales; y en el año mil setecientos y cuatro me hizo S.M. su pintor de cámara, cuyos empleos continuó.»

TABLA I

Notas históricas y culturales de la época de TEODORO ARDEMANS.

La sociedad española de la época:

- * A finales del siglo XVII, fuerte degradación en todos los órdenes en los territorios españoles.
- * 1 de noviembre de 1700. Muere Carlos II.
- * Guerra de Sucesión (1705-1713).
- * Tratados de Utrecht de 1714 y Viena en 1725.
- * Reinado de Felipe V (1700 a 1724, primera vez, y 1724 a 1759, segunda vez) y estructuración del estado centralista y abolición de Fueros. Inauguración de una política «ilustrada». Estado centralista.
- * Población total española a comienzos de 1700: alrededor de 8 millones de habitantes.

La cultura del tiempo:

- * Lucha por el control de las Universidades y sometimiento a la corona.
- * Creación de la Academia de la Lengua en 1714, la de Historia en 1738 y la Regia Academia Médica Matritense.
- * Real Gabinete de Historia Natural del Museo de Ciencias Naturales (1752-1766).
- * Fundación de la Gaceta de Madrid, 1661.
- * Diario de los literatos de España. Primer periódico científico y cultural (1737).
- * Decadencia de la pintura, retratistas franceses.
- * Claudio Coello (1621-1693).
- * Gregorio Mayans y Siscar (1699-1781), escritor valenciano. P. Benito Feijóo (1688-1764).

La ciencia y sus representantes:

- * Introducción de la ciencia moderna en nuestra Península: contactos con el extranjero, reformas institucionales, disminución de censura...
- * Separación de los dominios de Ciencia y Tecnología.
- * Berkely (1685-1753). Filósofo y matemático inglés.
- * Leonhard Euler (1707-1783). Matemático de origen suizo.
- * Edmond Halley (1656-1742).
- * Isaac Newton (1643-1727).
- * Giovanni Arduino (1714-1795). Crea la estratigrafía.
- * Martin Lister (1638-1712). Primer cartógrafo geológico.

Uno de sus tutores fue Claudio Coello, artista reconocido por sus contemporáneos en Madrid.

Así, pues, ARDEMANS es encargado de los trabajos en la catedral de Granada en 1688 y en la de Toledo en 1694, bajo la protección del Cardenal Portocarrero, hombre de gran poder, al formar parte del consejo de regencia que se constituyó a la muerte de Carlos II hasta la llegada de Felipe V, aunque prolongue dicho consejo su poder por más tiempo, pues Felipe V asumió el poder a la edad de 17 años.

La obra escrita de TEODORO ARDEMANS se limita a cinco libros:

- *Descripción de las minas de Almadén* (1718), fichado en la Biblioteca Nacional, pero que no hemos podido consultar.
- *Tratado de construcción* (1719).
- *Declaración y extensión sobre las Ordenanzas, que escribió Juan de Torija...* (1719).
- *Ordenanzas de Madrid y otras diferentes, que se practican en las ciudades de Toledo, Sevilla...* (1719).
- *Fluencias de la tierra y curso subterráneo de las aguas...* (1724).

Aquí nos ocuparemos de las dos últimas, donde expone sus ideas hidrogeológicas (figs. 1 y 2).

IDEAS SOBRE LA DINAMICA DEL AGUA SUBTERRANEA DE ARDEMANS

STANLEY DAVIS, en la introducción de su trabajo sobre ARDEMANS, destaca su personalidad más como ingeniero práctico que como científico. Y continúa afirmando que sus estudios sobre aportaciones en la regulación de distancias entre pozos y control sanitario de los mismos son motivo suficiente para colocarle al nivel de las más destacadas figuras por sus aportaciones al amplio campo de la Hidrogeología (tabla II).

TABLA II

El nombre del español TEODORO ARDEMANS es incluido entre los próceres de la hidrogeología en los cursos que se imparten en *The University of Arizona* (Estados Unidos).

HYDROGEOLOGY Historical Notes

Hippocrates (460-375 B.C.).—Described the relation of water quality to health. Water from deep wells is pure.

Titus Lucretius Carus (90-55 B.C.).—Emphasized the importance of evaporation in the hydrologic cycle.

Gaius Plinius Secundus (Pliny the elder) (23-79 A.D.).—Concluded that fresh water floats on sea water in coastal aquifers.

Dominique Argo (1786-1853).—Studied the temperature of water from deep wells.

Alexander von Humboldt (1769-1859).—Related depth of circulation of groundwater to the mean annual temperature of the water.

Charles Darwin (1809-1882).—Described fresh-water lense and marine tides on volcanic islands.

Joseph Boussinesq (1842-1929).—Developed fundamental equations of non-steady flow of ground water (1877) and base-flow recession.

Teodoro Ardemans (1664-1726).—Established regulations to control spacing and sanitation of wells.

Karaji (late 10th and early 11th Century).—Wrote «Exploration for hidden water». This was the first book on ground water.

John Snow (early 19th Century).—Did pioneer work in public health. Proved cholera epidemic was caused by a contaminated well.

Las ideas hidrogeológicas de ARDEMANS, en lo que se refiere al ciclo del agua y movimiento del agua subterránea, tal como las expone en los Caps. 1 y 5 de su libro «Fluencias de la tierra...» (tabla III), estaban ya superadas en su época, pues el ciclo hidrológico subterráneo había sido demostrado ampliamente por PIERRE PERRAUT (1608-1680), EDMÉ MARIOTTE (1620-1684) y EDMUND

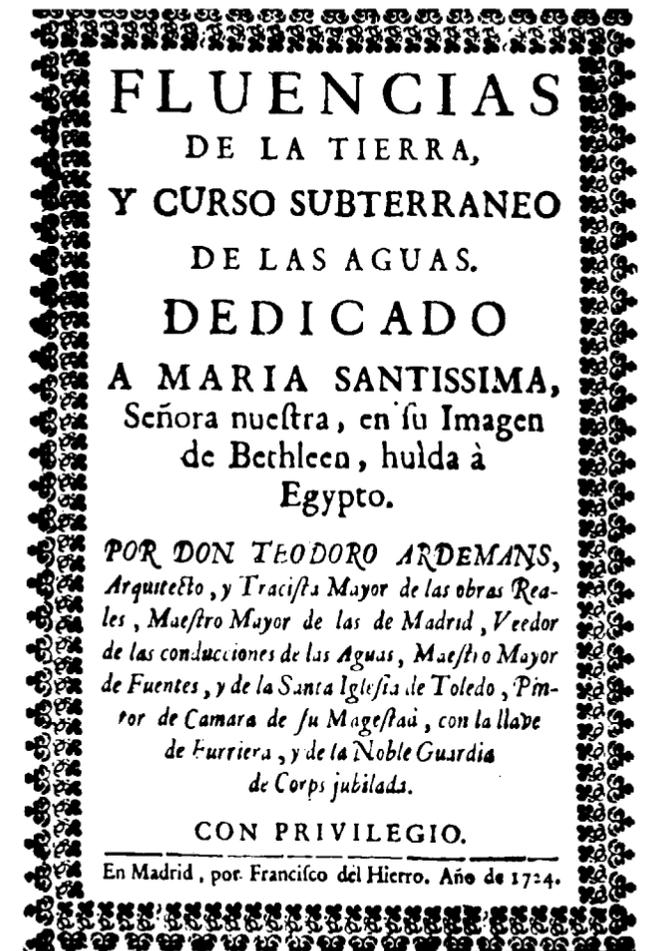


Figura 1.—Portada de la principal obra hidrogeológica de TEODORO ARDEMANS (1724).

AL MAR INMENSO,
 QUE SIRVIÓ DE TRONO,
 AL SOL DIVINO,
 QUE CAMINÓ HECHO CARROZA
 DE LA LUZ ETERNA HUMANADA,
 MARIA SANTISSIMA DE BETHLEFN,
 huida à Egypto, Patrona, y especial Titular de los Artífices Arquitectos, de la Imperial Villa de Madrid.

SI al mar, Señora Divina, corten impetuofas, como à su centro, las aguas, yo me alenté con esta definición de aguas à caminar hasta el profundo abismo de vuestras inmensas olas: medidas las pone mi insuficiencia: entren en el infondable mar

Figura 2.—Dedicatoria, folio 2 de la obra *Fluencias de la tierra y curso subterráneo de las aguas* (1724).

HALLEY (1656-1742), (ROUSE *et al.*, 1957), e incluso en nuestro país ya había sido aceptado por personajes como LIMÓN MONTERO (1697) (LÓPEZ VERA, F., 1982, p. 63).

En cuanto a la prospección de aguas subterráneas (Cap. 6, tabla III), ARDEMANS recopila los usos y criterios de la época y que hoy nos resultan tan folklóricos. Las figuras 3 y 4 muestran algunas ilustraciones tomadas de la obra de ARDEMANS, en los que explica algunos de estos métodos, como la recogida del agua condensada al amanecer (punto de rocío) en vasijas de cobre o vellones de cordero. Sin embargo, estos métodos tienen un gran valor acorde con el pensamiento ilustrado de la época y es que suponen un esfuerzo en la observación de la naturaleza, en oposición a los métodos «sobrenaturales o mágicos» utilizados en la Edad Media y que aún perviven en áreas rurales.

Las argumentaciones y referencias bibliográficas de ARDEMANS se basan fundamentalmente en la autoridad de los autores de la Antigüedad clásica, en especial VITRUVIO, por el que muestra gran fervor, ignorando totalmente a los autores renacentistas y a sus coetáneos.



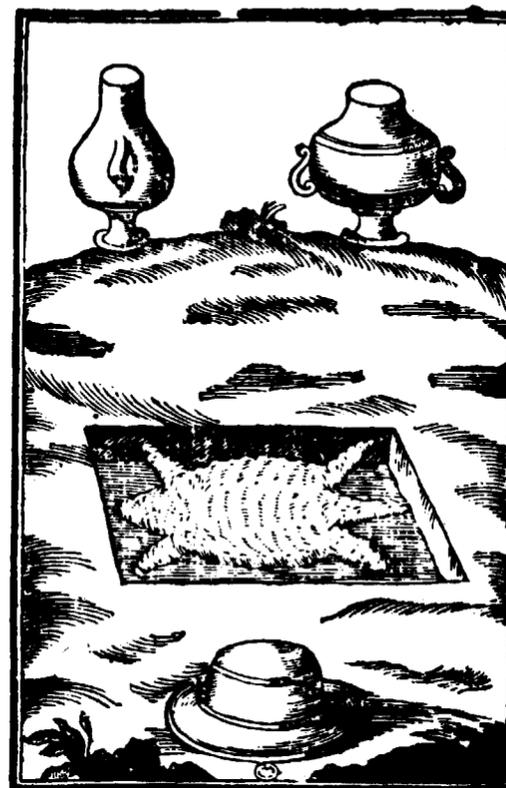
ESTE BORRADOR ES EL QUE PERTENECE AL

Figura 3.—ARDEMANS, en el Cap. VI de *Fluencias de la tierra...*, recopila los criterios en uso en su época para la prospección de aguas subterráneas, muchos de los cuales fueron enunciados por VITRUVIO. En la figura el «hidrogeólogo» observa la evaporación al amanecer a partir de los acuíferos.

TECNOLOGIA DE CAPTACION, CALIDAD, CONDUCCION Y DISTRIBUCION DE AGUAS SUBTERRANEAS

De acuerdo con ASÍN, J. O. (ibídem), la principal fuente de información sobre la tecnología de la construcción de «viajes» de agua en Madrid, son los capítulos 12 y 17 de «Fluencia de la tierra...», de ARDEMANS, junto con los trabajos de CÉSPEDES, A. (1606), y AZNAR DE POLANCO, J. C. (1727). Otros aspectos tecnológicos han sido recogidos y completados por SOLESIO DE LA PRESA, M. T. (1975).

Según ASÍN (ibídem), la ciudad de Madrid debe su nombre a su antiguo sistema de abastecimiento de aguas, a base de galerías filtrantes o «mayrat» construidas inicialmente por los musulmanes. Esta tecnología fue importada de Irán, donde su utilización se remonta a los albores de la historia y posteriormente extendida por todo el mundo del Islam. Asimilada y perfeccionada por los españoles, fue ampliamente utilizada en la mitad sur de la península, si bien el mayor desarrollo lo experimentó Madrid por ser la ciudad de mayor crecimiento que continuó fiel a su antiguo sistema de abastecimiento de agua hasta 1858, año en que entró en servicio el Canal de Isabel II, que trajo las aguas del río Lozoya, e inició un rápido abandono de los «viajes de agua», así conocidos entre los madrileños.



ESTE BORRADOR CORRESPONDE al mismo Capítulo VI, fol. 34.

Figura 4.—Otro criterio de prospección de aguas subterráneas era observar la condensación de humedad en vasijas de cobre o en un vellón de cordero, para indicar la localización más favorable del agua subterránea. ARDEMANS, T., *Fluencias de la tierra...* (1724).

Según SOLESIO DE LA PRESA (1975), la red de los «viajes» de Madrid superó los 127 Km. de longitud, y en este sistema cabía distinguir los siguientes elementos: galerías de captación (sin revestimiento), galerías de conducción (normalmente, revestidas de mampostería), pozos de ventilación (los más antiguos tapados con obra de mampostería y los más modernos en pirámides de granito), áreas de distribución y regulación y, por último, fuentes. Las galerías de captación y conducción presentan secciones muy diferentes según la época de construcción, siendo frecuentes en las galerías de conducción la construcción de canales y tuberías para evitar las fugas de agua en el transporte. Las figuras 5 y 6 muestran algunos de estos elementos. El rendimiento de estas captaciones en el siglo XVIII era del orden de unos 50 litros por segundo, esto es, casi la cuarta parte del caudal que proporcionan algunos de los pozos profundos (unos 500 m.) de los actualmente existentes en los alrededores de Madrid (LLAMAS, M. R., 1976).

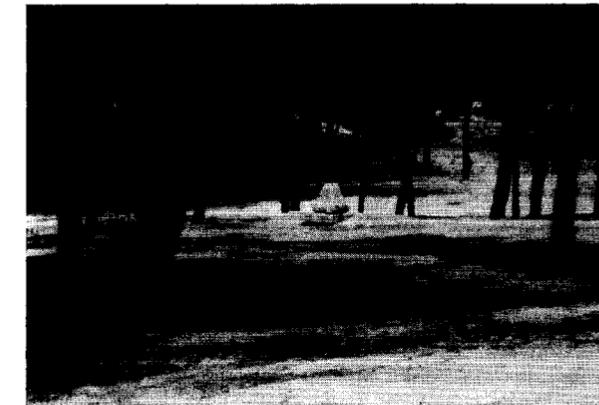
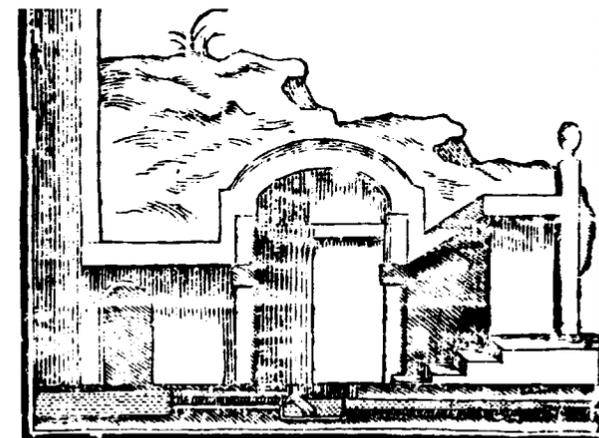


Figura 5.—«Capirote» para tapar un pozo de ventilación de un «viaje de agua», según OLIVER ASINS, J. (1958), pp. 94 a 96. Estos «capirotes» de granito datan de las ampliaciones hechas en los siglos XVII y XVIII. Fotografía tomada en La Dehesa de la Villa, correspondiente posiblemente a un ramal del viaje de la Fuente la Reina.

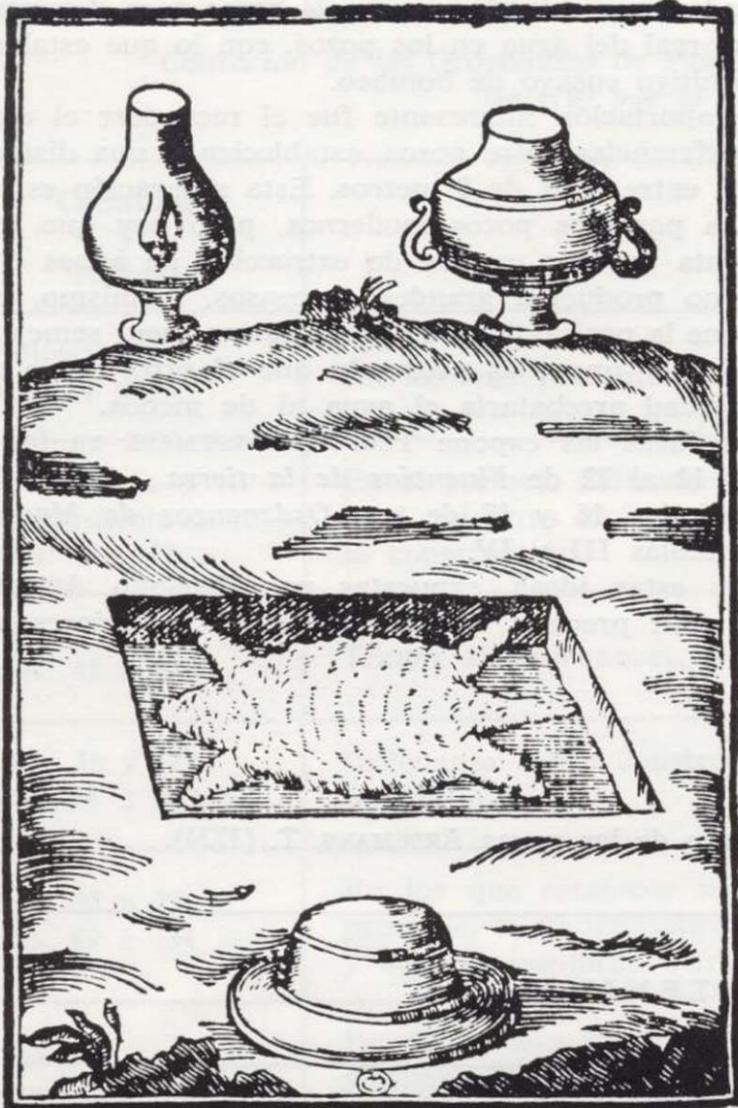


ESTE BORRADOR DE ESTE CORTE DE VN ARCA principal corresponde à la letra A. y al Capítulo VII, fol. 41.

Figura 6.—«Antes de llegar el agua de un viaje a la ciudad, vierte en una o varias «arcas», sucesivas, donde «reposa» y afluyen las aguas de otras minas.» ARDEMANS, T., *Fluencias de la tierra* (1724).

LAS APORTACIONES Y ORIGINALIDAD DE LAS IDEAS DE ARDEMANS

Respecto al quimismo y calidad del agua, las ideas que expone ARDEMANS en el sentido de que la calidad del agua está determinada por los minerales con los que ha estado en contacto, no es totalmente originaria de él, pues autores anteriores como LIMÓN MONTERO (LÓPEZ VERA, F., 1982) estudiaron con detalle este efecto. Así, pues, con-



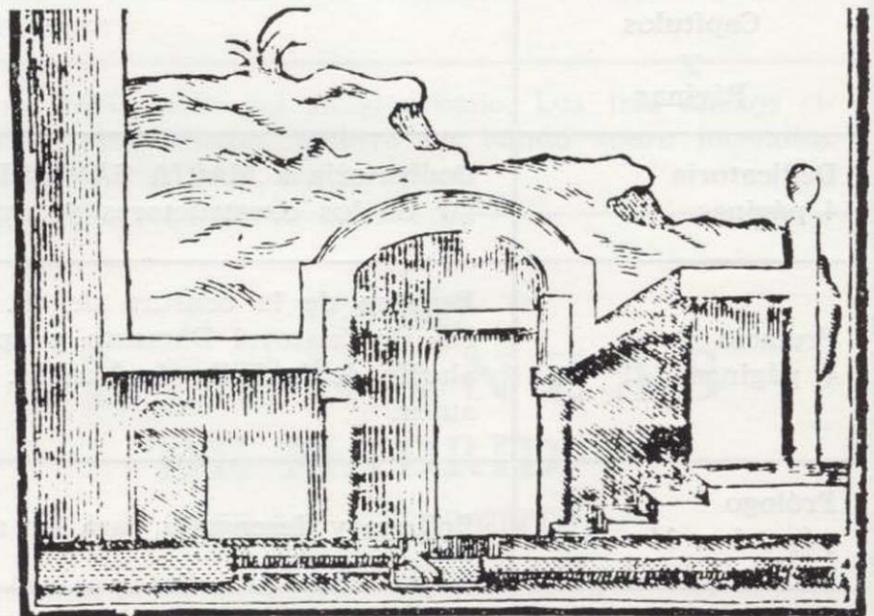
ESTE BORRADOR CORRESPONDE al mismo Capítulo VI. fol. 34.

Figura 4.—Otro criterio de prospección de aguas subterráneas era observar la condensación de humedad en vasijas de cobre o en un vellón de cordero, para indicar la localización más favorable del agua subterránea. ARDEMANS, T., *Fluencias de la tierra...* (1724).

Según SOLESIO DE LA PRESA (1975), la red de los «viajes» de Madrid superó los 127 Km. de longitud, y en este sistema cabía distinguir los siguientes elementos: galerías de captación (sin revestimiento), galerías de conducción (normalmente, revestidas de mampostería), pozos de ventilación (los más antiguos tapados con obra de mampostería y los más modernos en pirámides de granito), áreas de distribución y regulación y, por último, fuentes. Las galerías de captación y conducción presentan secciones muy diferentes según la época de construcción, siendo frecuentes en las galerías de conducción la construcción de canales y tuberías para evitar las fugas de agua en el transporte. Las figuras 5 y 6 muestran algunos de estos elementos. El rendimiento de estas captaciones en el siglo XVIII era del orden de unos 50 litros por segundo, esto es, casi la cuarta parte del caudal que proporcionan algunos de los pozos profundos (unos 500 m.) de los actualmente existentes en los alrededores de Madrid (LLAMAS, M. R., 1976).



Figura 5.—«Capirote» para tapar un pozo de ventilación de un «viaje de agua», según OLIVER ASINS, J. (1958), pp. 94 a 96. Estos «capirote» de granito datan de las ampliaciones hechas en los siglos XVII y XVIII. Fotografía tomada en La Dehesa de la Villa, correspondiente posiblemente a un ramal del viaje de la Fuente la Reina.



ESTE BORRADOR DE ESTE CORTE DE VN ARCA principal corresponde à la letra A. y al Capítulo VII. fol. 41.

Figura 6.—«Antes de llegar el agua de un viaje a la ciudad, vierte en una o varias "arcas", sucesivas, donde "reposa" y afluyen las aguas de otras minas.» ARDEMANS, T., *Fluencias de la tierra* (1724).

LAS APORTACIONES Y ORIGINALIDAD DE LAS IDEAS DE ARDEMANS

Respecto al quimismo y calidad del agua, las ideas que expone ARDEMANS en el sentido de que la calidad del agua está determinada por los minerales con los que ha estado en contacto, no es totalmente originaria de él, pues autores anteriores como LIMÓN MONTERO (LÓPEZ VERA, F., 1982) estudiaron con detalle este efecto. Así, pues, con-

sideramos que las aportaciones en el campo de la hidroquímica y el de las relaciones de la calidad del agua con sus usos, por ejemplo, en la ebullición de los vegetales, eran ideas conocidas en su época.

Algo muy distinto ocurre en el saneamiento e hidráulica de captaciones, terrenos en los que no conocemos antecedentes a sus ideas. Así vemos cómo estableció la necesidad de distanciar los pozos de abastecimiento de los pozos negros y sumideros de aguas usadas, determinando una distancia mayor de cinco metros entre ambos. También reconoció claramente los peligros por la contaminación del agua subterránea a partir de pozos negros y sumideros, así como la potencialidad de ser fuente de enfermedades las aguas subterráneas contaminadas. Adelantándose más de un siglo a la plena identificación de epidemias de cólera con la contaminación de pozos, como la ocurrida en Londres en el siglo XIX. Relacionó a su vez el descenso del agua en los pozos con las extracciones

efectuadas, aconsejando esperar 24 horas para determinar el nivel real del agua en los pozos, con lo que estableció un primitivo ensayo de bombeo.

Otra aportación interesante fue el reconocer el efecto de interferencias entre pozos, estableciendo una distancia mínima entre ellos de 8 metros. Esta separación es muy pequeña para los pozos modernos, pero hay que tener en cuenta que los medios de extracción de aguas de la época no producían grandes descensos. Asimismo, establece que la profundidad de pozos vecinos será semejante, pues de ser uno más profundo que el otro, el de más profundidad arrebataría el agua al de menos.

Estas ideas las expone TEODORO ARDEMANS en los capítulos 12 al 22 de *Fluencias de la tierra...* (1724) y en los capítulos 16 y 17 de sus *Ordenanzas de Madrid...* (1719), tablas III y IV.

Todas estas ideas, expuestas por TEODORO ARDEMANS (1724), eran precisas en los momentos posteriores a la

TABLA III

Contenido de Fluencias de la tierra y curso subterráneo de las aguas. ARDEMANS, T. (1724).

Capítulos y Páginas	CONTENIDO
Dedicatoria 4 páginas	Dedicatoria a MARIA SANTISIMA DE BELEN, huida a Egipto, patrona y especial titular de los constructores y arquitectos de la Villa de Madrid.
Prefacio 4 páginas	Permiso de la censura del R. P. F. Francisco Garcés; licencia del Inquisidor Ordinario D. Cristoval Damasto y aprobación de Gabriel Valenciano, prof. de arquitectura y alarife de la Villa de Madrid. Privilegio, fe de erratas y tasas. Décimas en honor del autor.
Prólogo págs. 1 a 14	Prólogo y desengaño para los artifices en los que incluye algunos datos autobiográficos.
Caps. 1 a 5 págs. 15 a 33	En los que explica el ciclo hidrológico, interpretando el origen de las aguas continentales, como procedentes del mar en un continuo flujo y reflujo subterráneo.
Cap. 6 págs. 34 a 40	Dedicado a criterios de captación de las aguas subterráneas, siguiendo criterios de autores de la antigüedad clásica, especialmente Vitruvio.
Caps. 7 a 11 págs. 41 a 79	Dedicado a la hidroquímica, calidad y depuración de las aguas subterráneas.
Caps. 12 a 27 págs. 80 a 148	Dedicado a las obras de captación, conducción y almacenamiento de aguas en especial subterráneas y pluviales. Técnica de construcción de viajes de agua.
Caps. 28 a 32 págs. 149 a 232	Se trata del acabado de pozos, norias y viajes de aguas y obras de distribución.
Anexos págs. 233 a 278	Informes sobre política hidráulica para abastecimiento y caudales y saneamiento de los mismos.

TABLA IV

Contenido de las Ordenanzas de Madrid y otras diferentes. ARDEMANS, TEODORO. Reedición de 1790 por la Viuda de Barco López. Madrid.

Capítulos y Páginas	CONTENIDO
Prólogo del autor. 4 págs.	En los que presenta su currículum y autobiografía.
Un prefacio y tres proemiales págs. 1 a 42	En el prefacio defiende los intereses profesionales de los arquitectos en el primer proemial, mientras en los proemiales segundo y tercero establece normas organizativas para la construcción.
Caps. 1 a 15 págs. 43 a 84	Tratan de ordenanzas urbanísticas, referentes a construcción de casas.
Caps. 16 y 17 págs. 84 a 88	Ordenanza sobre construcción de pozos y norias de abastecimiento; estanques y pozos negros.
Caps. 18 a 27 págs. 89 a 134	En los que establece normas sobre instalaciones artesanales e industriales. Así como provisión y características de materiales para obras. Mantenimiento de fuentes públicas y normas sanitarias para los «fontaneros».
Anexos págs. 135 a 159	En el primero establece criterios de calificación del suelo urbano. Los tres anexos siguientes son adiciones posteriores de esta edición, incluye un bando sobre incendios y nombre de arquitectos, pintores, escultores, etc., de la época.

Guerra de Sucesión en que Madrid había visto quebrarse su abastecimiento de agua, así como otros servicios municipales. La oportunidad-necesidad hicieron que ARDEMANS tuviera que enfrentarse a la construcción de nuevos pozos y galerías, así como las estructuras de distribución de agua, su reparación y ampliación. La experiencia adquirida en estos trabajos quedó plasmada en sus *Ordenanzas Municipales...* (fig. 7), que fueron una cantera de sabiduría en materia municipal durante todo el siglo XVIII.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a D. SANTOS MADRAZO, profesor del Departamento de Historia Moderna de la Universidad Autónoma de Madrid, la revisión del manuscrito, así como sus ideas y sugerencias.

Figura 7.—Las *Ordenanzas de Madrid*, publicadas por ARDEMANS, T. (1719), tuvieron vigencia por más de un siglo. Portada de la reedición hecha en Madrid en 1790 por la viuda de Barco López.

R 155850
ORDENANZAS DE MADRID, Y OTRAS DIFERENTES

Que se practican en las ciudades de Toledo y Sevilla, con algunas advertencias á los alarifes y particulares, y otros capítulos añadidos á perfecta inteligencia de la materia; que todo se cifra en el gobierno político de las fábricas.

DEDICADO A LA MUY NOBLE, LEAL Y CORONADA VILLA DE MADRID

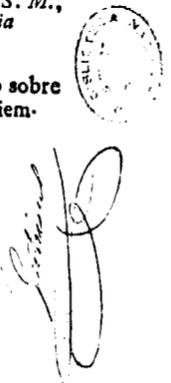
Por D. Teodoro Ardemans, arquitecto y tracista mayor de las obras reales, maestro mayor de las de Madrid, veedor de las conducciones de las aguas, maestro mayor de fuentes y de la santa iglesia de Toledo, pintor de cámara de S. M., con la llave de Furierea, y de la noble guardia de Corps jubilada.

Aumentado en esta última impresión el bando sobre incendios, publicado en Madrid en 8 de noviembre del año de mil setecientos noventa.



MADRID: MDCCCXX.

POR LA VIUDA DE BARCO LOPEZ



BIBLIOGRAFIA

ARDEMANS, TEODORO: *Declaración y extensión sobre las Ordenanzas, que escribió Juan de Torija...* Madrid, Francisco del Hierro, 1719, 16 hojs.+288 pp. (1719).

ARDEMANS, TEODORO: *Ordenanzas de Madrid y otras diferentes, que se practican en las Ciudades de Toledo, Sevilla...* Madrid, Viuda del Barco López, 1719, 162 pp. Hay ed. de 1720 a 1820, esta última aumentada con un Bando sobre incendios, publicado en Madrid el 8 de noviembre de 1790. Otras eds. de 1866 y 1921 (1719).

ARDEMANS, TEODORO: *Fluencias de la tierra y curso subterráneo de las aguas...* Edit. Francisco del Hierro, 1724, 178 pp., Madrid (1724).

ASÍN, JAIME OLIVER: *Historia del nombre «Madrid».* Madrid, Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Instituto Miguel Asín, 1958, 412 pp.+32 láms. (1958).

AZNAR DE POLANCO, JUAN CLAUDIO: *Agua que tiene Madrid para su abasto, con expresión de las fuentes que existen, y cantidad de reales fontaneros que tiene cada una. Antiguos viajes de agua.* (En folios 3v-4 de su *Discurso curioso que explica el modo de conocer el valor de los números...* Madrid, 1723.)

DAVIS, STANLEY, N.: «Teodoro Ardemans pioner water-supply engineer of Spain». *Water Resources Bulletin. American Water Resources Association*, vol. 9, núm. 5, pp. 1028-1034 (1973).

LIMÓN MONTERO, A.: *Espejo cristalino de las aguas de España, hermoseado y guarnecido con el marco de variedad de fuentes y baños, cuyas virtudes, excelencias*

y propiedades se examinan... Alcalá, Francisco García Fernández, 1697, 432 pp.+10 hojas (1967).

LÓPEZ DE AZCONA, J. M.: *Las aguas minerales en el libro del siglo XVIII.* Inst. de España, Madrid (1966).

LÓPEZ PIÑERO, J. M.; GLICK, TH. F.; NAVARRO BROTONS, V., y PORTELA MARCO, F.: *Diccionario histórico de la ciencia moderna en España*, 2 vols., Ed. Península, Sec. Univ. (1983).

LÓPEZ VERA, F.: *Alfonso Limón, pionero en el siglo XVII de una Ciencia de hoy: la Hidrogeoquímica.* Bol. Geol. y Min., t. XCIII-IV, pp. 346-352 (1982).

LORENZO DE SAN NICOLÁS, F.: *Arte y Uso de la Arquitectura* (1933).

LLAMAS MADURGA, M. R.: *La utilización de aguas subterráneas en Madrid: de los Mayrat musulmanes a los modelos digitales.* Estudios geológicos, núm. 32, pp. 121-139 (1976).

PESET, J. L., y LAFUENTE, A.: *Ciencia ilustrada e Historia de la Ciencia.* I Congreso de la Sociedad Española de las Ciencias, Madrid, pp. 97-124 (1980).

ROUSE, H., and INCE, S.: *A History of hydraulics.* Dover Publications, 269 pp. (1957).

SOLESIO DE LA PRESA, M. T.: *Antiguos Viajes de Agua de Madrid.* Monografías del Instituto Eduardo Torroja, núm. 330, C. S. I. C., noviembre, p. 77 (1975).

VERNET, J.: *Historia de la Ciencia Española.* Inst. de España (1975).

Noticias

30.346 MILLONES DE PESETAS, PRESUPUESTO DE LA DIRECCION GENERAL DE MINAS PARA ESTE AÑO

La Dirección General de Minas cuenta este año con un presupuesto de 30.346 millones de pesetas. El capítulo más importante dentro del mismo es el relativo a Transferencias Corrientes, con casi 22.000 millones de pesetas, cuyo desglose es el siguiente:

	En miles
— A organismos autónomos administrativos	
* Subvención al Instituto Geológico y Minero de España	155.715,—
— A Empresas	
* Subvención a la producción y transporte de hulla coquizable	2.203.000,—
* Subvención a la producción de hulla en función de los correspondientes convenios	15.551.700,—
* Subvención a Hunosa para cubrir las pérdidas extraordinarias previstas en el contrato-programa para el ejercicio de 1983	2.550.000,—
* Subvención a Hunosa, Minas de Figaredo y La Camocha como previsión de la liquidación definitiva del ejercicio de 1982	1.520.600,—
TOTAL	21.825.300,—

El relativo a Inversiones Reales cuenta con casi 294 millones de pesetas, a repartir de la siguiente forma:

— Plan Nacional de la Minería	
* Plan Nacional de Abastecimiento de Materias Primas Minerales no Energéticas (planificación y acuerdos internacionales)	145.600,—
* Plan Energético Nacional. Análisis minero del sector carbonero y acuerdos internacionales	93.600,—

En miles

* Programa de aplicación de las normas de demarcación de la Ley 22/1973 de Minas y Derechos Mineros solicitados con anterioridad a su entrada en vigor.	28.200,—
* Laboratorios antigrisú y seguridad minera	26.300,—
TOTAL	293.700,—

Por último, hay que destacar el capítulo dedicado a las Transferencias de Capital, subdivididas en dos apartados: 1) A organismos autónomos administrativos, con 3.275 millones de pesetas; y 2) A Empresas, con un desembolso de 3.791 millones. En total, 7.066 millones de pesetas, cuyo desglose es el siguiente:

— A organismos autónomos administrativos	
* Plan Nacional de Abastecimiento de Materias Primas Minerales no Energéticas. Subvención al Instituto Geológico y Minero para el desarrollo de los programas de infraestructura, inventario y exploración, así como para la promoción de actividades técnico-empresariales (adquisición de participaciones en empresas)	1.317.200,—
* PEN. Subvención al IGME para el desarrollo de programas de exploración e investigación general de carbones y pizarras bituminosas. Investigación tecnológica de recursos energéticos y exploración de energía geotérmica	966.000,—
* Subvención al IGME para la ejecución del Plan de Abastecimiento de Aguas Subterráneas a los núcleos urbanos y Plan de Geología Territorial y Ambiental	394.300,—
* Subvención al IGME para el desarrollo del Plan General de Cartografía y Exploración de Fondos Marinos	92.000,—
* Subvención al IGME para el Programa de Apoyo	100.000,—

	<i>En miles</i>
* Subvención al IGME para el desarrollo del programa de Acción Regional en Andalucía	330.800,—
* Subvención al IGME para construcción de la nueva sede y rehabilitación de la actual	74.900,—
TOTAL	3.275.200,—
A Empresas	
* Plan Energético Nacional. Subvención a la Empresa Nacional Adaro de Investigaciones Mineras, S. A., para el desarrollo en el interior de fases avanzadas de investigación geológico-minera de yacimientos de carbón, desarrollo tecnológico, de su aprovechamiento, y de las acciones de exploración en el exterior	1.055.000,—
* Plan Energético Nacional. Subvención a la Empresa Nacional Adaro de Investigaciones Mineras, S. A., para la investigación geológica-minera y tecnológica en fases avanzadas y la promoción del aprovechamiento de fuentes complementarias de energía (geotermismo, rocas bituminosas y residuos sólidos)	318.000,—
* Subvención a empresas derivadas de la aplicación de la Ley 6/1977, de 4 de enero, de Fomento de la Minería ...	1.020.000,—
* Subvención a la Sociedad que desarrolla el proyecto del Complejo integral para aprovechamiento del mineral de hierro del Suroeste	350.000,—
TOTAL	3.791.000,—

ACUERDO IGME-PRINCIPADO DE ASTURIAS PARA EVALUAR LOS RECURSOS MINEROS DE LA REGION

El Instituto Geológico y Minero y el Gobierno del Principado de Asturias acaban de firmar un convenio marco de asistencia técnica, en virtud del cual Asturias dispondrá de los servicios del IGME en su doble faceta de órgano asesor en toda labor de investigación y de órgano encargado de dirigir y ejecutar los proyectos que a partir de ahora se establezcan.

La actuación del IGME se concretará en los siguientes campos:

A) *Infraestructura geológica y minera.* En este apartado se recogen los estudios básicos necesarios para los trabajos de actividades y aplicación al conocimiento de los recursos mineros, así como a la adecuada utilización del medio material.

B) *Recursos minerales.* Incluye la localización y evaluación del potencial minero, en función de la viabilidad

de las explotaciones y el aprovechamiento racional de los yacimientos.

C) *Geología aplicada al medio natural.* En este capítulo se aborda la investigación de las aguas subterráneas, conservación y aprovechamiento de los acuíferos, mantenimiento de las debidas redes de control y explotación de las reservas hídricas.

Aparte de este breve cuadro de principios, y con el objeto de concretar las actuaciones a ejecutar, sobre todo en lo que se refiere al primer apartado, tanto el IGME como el Principado de Asturias van a elaborar conjuntamente un programa, de acuerdo a las previsiones presupuestarias de cada año. A tal efecto será creada una comisión mixta, integrada por dos representantes de cada parte, que se reunirá periódicamente para vigilar la marcha de los acuerdos estipulados en el convenio-marco, cuya vigencia se extenderá hasta el 31 de diciembre de este año, siendo prorrogable tácitamente por años naturales, siempre que no sea denunciado por ninguno de los entes representados en las mismas.

LA CALIFICACION DE «EL MAYOR DE EUROPA» ES DESMEDIDA, SEGUN LOS GEOLOGOS QUE TRABAJAN EN EL: EL YACIMIENTO DE ESTANO DE PONTEVEDRA ESTA AUN EN FASE DE INVESTIGACION

La investigación del yacimiento de casiterita localizado en el Ayuntamiento de Forcarey, en Pontevedra, y que llegó a considerarse como el mayor de Europa, se encuentra actualmente en fase preliminar, y hasta el próximo año no será posible saber si es o no explotable, según han manifestado los geólogos que trabajan en él desde hace dos años. De hecho, fueron los citados profesionales los primeros sorprendidos ante la información difundida, en la que se señalaba que dicho yacimiento era el más importante de Europa.

Las prospecciones se llevan a cabo desde hace dos años a cargo de la compañía canadiense Río Ibe, con la intervención de tres geólogos y cinco obreros que trabajan con camiones con perforadora. La casiterita se obtiene de una veta situada a 90 metros de profundidad y cubierta con pizarra, en una superficie de 1.400 metros de longitud por 400 de ancho, en la cima del monte Penachán, de propiedad municipal. El material extraído se analiza en Inglaterra y la riqueza del mineral hasta ahora encontrado es variable.

EXISTEN 353.000 MILLONES DE TONELADAS ACCESIBLES DE CARBON A NIVEL MUNDIAL: NUEVAS EVALUACIONES DE LOS RECURSOS MUNDIALES DE CARBON

La Unidad de Investigación de Carbón de la Agencia Internacional de la Energía, en su «Concise Guide to World Coalfields», ha realiado un importante cambio con

respecto a los métodos tradicionales de evaluar los recursos mundiales de carbón. Al contrario que sus antecedentes, principalmente la Worls Energy Conference (WEC) en 1978, la AIE ha hecho deliberadamente un juicio subjetivo sobre la utilidad de las reservas identificables. Su medida de «carbón accesible» —definido como carbón de posible extracción en los próximos 20 años— difiere considerablemente de las estimaciones del WEC sobre «carbón recuperable económicamente». La AIE escoge la cifra de 353.606 millones de toneladas accesibles de carbón a nivel mundial, lo que supone un 23 por 100 menos de los 460.570 millones de toneladas de reservas «recuperables económicamente» del WEC. La WEC estimó las «reservas totales mundiales» en 10.538 billones de toneladas. Las repercusiones de esta aproximación oscilan de un país a otro, aunque la AIE concede aún que la Unión Soviética y China tienen las mayores reservas accesibles. En Estados Unidos, la estimación ha sido reducida a 73.000 millones de toneladas, frente a los 113.230 millones de toneladas estimados por el WEC. El WEC sitúa a Estados Unidos en segundo lugar, por delante de China en solamente 1.000 millones de toneladas, cuyas reservas estimó el WEC en 98.883 millones de reservas. La Unión Soviética sufre una brusca reducción, de 155.900 millones de toneladas de carbón recuperable económicamente a 81.000 millones de toneladas de carbón accesible.

«Concise Guide to World Coalfields» es de hecho solamente el escaparate de un servicio de datos base más amplio sobre las reservas mundiales de carbón proporcionado por Investigación de Carbón de la AIE en Londres.

GRACIAS A LA GEOQUIMICA SE PUEDEN DETECTAR YACIMIENTOS DE MINERALES CON EL ANALISIS DE LOS GASES SULFUROSOS QUE AMANAN DE LA TIERRA

En Botswana, bajo la arena del desierto del Kalahari, se están buscando mineralizaciones cuya pista se conoce gracias al aumento de gases sulfúricos. El equipo para esta búsqueda procede del Instituto Federal para las Geociencias y Recursos Naturales en Hannover, que con ello se ha puesto a la cabeza en el desarrollo mundial de ese método.

Los actuales métodos geofísicos no siempre bastan cuando se trata de encontrar yacimientos muy profundos, ya que muchos de estos yacimientos minerales no se pueden reconocer ni por cambios del campo de gravitación local ni por perturbaciones de los campos eléctricos y magnéticos terrestres. Es, pues, un desafío para la geoquímica, con cuyos métodos se pueden deducir los yacimientos profundos partiendo del aumento de ciertas sustancias en la superficie. Con este sistema se han conseguido en Irlanda grandes éxitos a la hora de buscar metales no ferrosos.

Pero si los yacimientos están recubiertos por rocas jóvenes, el problema se complica también para la geoquímica; los éxitos pasan a ser casualidades que no pueden

ser la base para una prospección moderna. Por eso se tienen grandes esperanzas en los nuevos métodos geoquímicos que tratan de localizar los gases característicos procedentes de yacimientos escondidos, y que no pueden ser retenidos ni por arena ni por otras capas. Si bien estos gases están presentes en todas partes, por encima de zonas mineralicas han de ser más fuertes.

Uno de los gases que se presume será característico es el vapor de mercurio, que se encuentra en los más diferentes tipos de yacimientos de mineral. Por otra parte, si se dan emanaciones de helio más fuertes que las normales, se puede deducir la existencia de grietas o quebraduras en el subsuelo que podrían contener sustancias interesantes. Los científicos del Instituto Federal están probando actualmente la eficacia de este método de helio; su campo de pruebas es una chimenea vulcánica en los Estados Unidos que contiene diamantes.

SISTEMA PARA RECONOCER MINERALES CON AZUFRE

Ahora, en Hannover, se ha conseguido desarrollar un sistema que permite reconocer minerales que contienen azufre, partiendo de gases sulfurosos que emanan de la tierra. Este sistema es de gran importancia, porque muchos de los minerales de metales no ferrosos, de plata y de mercurio, están formados por combinaciones sulfúricas. Si estos minerales entran en contacto con aguas subterráneas, emanan gases como el sulfuro de carbono o el sulfuro de carbonilo, que en parte se pueden oler y siempre se pueden medir exactamente con el cromatógrafo de gas.

Hay que reconocer que este método para buscar minerales, en principio, no es nada nuevo: en la Unión Soviética, desde hace más de un decenio, se emplean perros adiestrados para rastrear gases sulfúricos. Y una empresa sueca, hace cinco años, estuvo buscando en las costas finlandesas del Mar Báltico gases sulfúricos que hubieran podido dar noticia de filones submarinos. Pero ha sido el Instituto Federal donde se ha desarrollado este método hasta tal perfección técnica que puede descubrir huellas mínimas de los gases de yacimientos profundos. Basta conseguir concentraciones de un miligramo por tonelada de roca.

En los primeros intentos se probó el sistema en yacimientos ya conocidos en Alemania. Como los resultados fueron positivos se siguió probando en zonas desérticas de Arizona y Namibia. Ahora se usa en Botswana, por primera vez en un proyecto de cooperación técnica con un país en desarrollo, buscando yacimientos todavía desconocidos. Para ello, en una zona con una capa relativamente plana de arena, se tomaron unas cinco mil pruebas de gas, separadas entre ellas por una distancia de unos cincuenta metros. El análisis mostró un aumento de gases sulfúricos, lo que podría indicar que hay minerales en el subsuelo. Aun cuando no fuera rentable explotar tales yacimientos, si se hubiera conseguido demostrar su existencia, sería un importante indicio de que el método es eficaz.

NUEVAS TECNICAS RADIOMETRICAS PARA EL EXAMEN MINERALOGICO DEL FONDO DEL MAR

A raíz de un convenio firmado recientemente, en el Reino Unido se comercializarán técnicas radiométricas para el examen mineralógico rápido del fondo del mar. En virtud del acuerdo, la British Oceanics Limited (BOL) iniciará la aplicación comercial del «equipo espectrométrico de arrastre», puesto a punto por el laboratorio de investigación de Harwell, dependiente de la Comisión de Energía Atómica del Reino Unido, para la prospección de minerales submarinos.

Este sistema permite aplicar a la prospección submarina las técnicas radiométricas utilizadas en el reconocimiento terrestre y aéreo. El espectrómetro detecta la radiactividad natural del fondo del mar, identificando y midiendo tres elementos principales: el uranio, torio y potasio. Esta información constituye una guía valiosa para detectar la presencia de minerales como, por ejemplo, fosfatos, monacita y zircón, asociados directamente con dichos elementos radiactivos. El equipo espectrométrico completo incluye una sonda submarina; conexión por cable; espectrómetro a bordo; registradores de datos, y la programación necesaria para preparar los planos acotados de los yacimientos de potasio, uranio y torio. El sistema se pone en práctica arrastrando continuamente la sonda por el fondo del mar a una velocidad máxima de 4 nudos. El reconocimiento hasta una profundidad máxima de 400 metros constituye hoy día una tarea rutinaria.

Este equipo ha sido perfeccionado por el laboratorio de investigación de Harwell, en colaboración con el Instituto de Ciencias Geológicas del Reino Unido, en virtud de un programa patrocinado por el Consejo de Investigación del Medio Ambiente (NERC) de Gran Bretaña. Ha sido utilizado profusamente por el NERC en el levantamiento del mapa geológico de la plataforma continental del Reino Unido, y, en fecha más reciente, por la British Oceanics Limited en la exploración mineralógica del mar Tirreno. British Oceanics Limited, filial de British Underwater Engineerign Ltd. para operaciones marinas y en alta mar, ofrecerá el nuevo equipo con sus servicios de prospección marina internacional.

El laboratorio de Harwell y Bol iniciarán otro programa de puesta a punto, encaminado a la utilización del equipo en el estudio de la geología y contaminación marinas. Se aplicarán técnicas neutrónicas para la activación de los materiales submarinos, de forma que los rayos gamma que emiten, sirvan para identificar los elementos existentes. Todo esto permitirá levantar directamente el mapa de distribución de los minerales.

VALIDO PARA CARBONES BLANDOS Y CAPAS INCLINADAS: NUEVO METODO DE ARRANQUE DE CARBON EN LAS MINAS, MEDIANTE CHORROS DE AGUA A MUY ALTA PRESION

El ingeniero canadiense M. L. Jeremic, profesor de Mecánica de Roca e Ingeniería Minera en la Universidad Laurentiana de Sudbury-Ontario, ha presentado en la Universidad de Oviedo un nuevo método para el arranque de

carbón en las minas. El nuevo sistema consiste en la utilización de chorros de agua a muy alta presión, lo que se conoce como «método hidráulico», que ya está siendo utilizado en Canadá, la URSS y China. En este último país, el agua transporta también el carbón, que circula, canalizada, por las galerías, en sustitución del método tradicional de transporte por vagones.

Con este nuevo sistema, el minero está lejos del arranque, manejando la máquina hidráulica a 15 o 20 metros de distancia, lo que evita los riesgos por desprendimiento. El picador se convierte en un especialista que maneja válvulas que varían el caudal, potencia, presión y posición del chorro de agua. También se consigue disminuir los riesgos de silicosis, al estar la mina más fresca y sin polvo. El «método hidráulico», según el profesor Jeremic, aumenta la productividad y se disminuyen los costes, además de permitir la explotación de minas marginales que hasta ahora no eran rentables.

No obstante, el método en cuestión tiene sus inconvenientes, ya que no puede utilizarse en todas las minas, sino sólo en aquellas que tengan unas determinadas condiciones geológicas, con carbones blandos y en capas inclinadas, cualidades que no tienen nuestras minas asturianas. De esta manera, el nuevo método de arranque de carbón no es aplicable en minas de antracita o en explotaciones de hullas antracitosas; aunque puede utilizarse, en cambio, en carbones de cierta dureza, siempre que el frente presente capas con carbón fracturado por movimientos geológicos.

El «método hidráulico» permite obtener 20 toneladas por hombre y día como mínimo, ya que cada hidromonitor, o manguera para lanzar el chorro de agua, arranca tres toneladas por minuto. Posteriormente, el agua puede utilizarse para el transporte del carbón desde el pozo al lavadero, recuperándola después para volverla a usar. También puede eliminarse en el mismo pozo las tres cuartas partes del agua empleada en el arranque, y dejar sólo una que salga al exterior, transportando en suspensión los finos. Los gruesos se extraen por medios mecánicos tradicionales (jaula, skip o cinta transportadora en planos inclinados).

Para que el carbón no se sedimente durante el transporte por agua, debe discurrir por canalizaciones en las galerías, con una pendiente de 2,5 grados. Dichos canales han de ser de acero, recubiertos de materiales de baja fricción, como plásticos, fibras o cerámica. Otro punto a favor del nuevo método de arranque es la economía de los equipos y la nula inversión en infraestructura de la mina, ya que es la misma que para los métodos convencionales.

De momento, está previsto llevar adelante algunas experiencias en minas asturianas, después de que el ensayo efectuado en Sabero (León) no diera los resultados deseados.

DIA MUNDIAL DEL MEDIO AMBIENTE: ESPAÑA GENERA ANUALMENTE DIEZ MILLONES DE TONELADAS DE DESECHOS

«Una quinta parte de los desechos de productos producidos anualmente por la industria constituyen una amenaza directa para la salud humana.» Así lo asegura el

informe elaborado por el director ejecutivo del programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Mustafá Tolba, presentado con motivo de la celebración del Día Mundial del Medio Ambiente.

Según el mencionado informe, cerca de 10 millones de kilómetros cuadrados (veinte veces la extensión de España) se están volviendo ácidos en Europa y Norteamérica. Las fábricas y las centrales de energía liberan en la atmósfera una excesiva cantidad de contaminantes, principalmente azufre y nitrógeno, que vuelven a la Tierra en forma de lluvia ácida y muchas veces a kilómetros de distancia de su fuente de origen.

El doctor Tolba asegura que se trata de un azote de la era posindustrial con grave amenaza para la vida y la salud del hombre, y considera que los desechos peligrosos constituyen del 10 al 20 por 100 de todos los residuos industriales del mundo. Estados Unidos, el mayor productor, genera 60 millones de toneladas al año y los países de la Comunidad Económica Europea, de 20 a 30 millones. En España se generan anualmente unos 10 millones de toneladas.

Con motivo de la celebración de esta jornada, el Gobierno Vasco ha anunciado su intención de crear centros de animación ecológica, denominados Casas de la Ecología, por toda la geografía del País Vasco. Dichos centros se convertirán en lugares de encuentro abiertos a todos los ciudadanos, grupos de trabajo aficionados o científicos, interesados por el medio ambiente. También se presentó un proyecto para las islas del Bidasoa, que constituyen una importante zona de captación de aves migratorias, donde se proyecta crear un parque natural.

Por su parte, la Asociación para la Defensa Ecológica de Galicia (ADEGA) ha elaborado también un ambicioso proyecto de recuperación de las riveras de los tres ríos que pasan por Orense.

Por otra parte, señalar que el proyecto de ley básica del Medio Ambiente será remitido al Parlamento después del verano, según manifestó en días pasados en Oviedo el subdirector general de Medio Ambiente, José Ramón Montes González.

LA MODERNIZACION DE LOS COLEGIOS PROFESIONALES, PRINCIPAL OBJETIVO: LOS INGENIEROS TECNICOS MINEROS DE ASTURIAS Y GALICIA CELEBRARON SU ASAMBLEA GENERAL

En días pasados se celebró en los locales de la Cámara de Comercio e Industria de Oviedo, la asamblea general del Colegio Oficial de Ingeniería Técnica Minera de Asturias-Galicia, que cuenta con dos mil asociados, mil quinientos de los cuales desarrollan su actividad profesional en la región, mientras el resto lo hace en empresas repartidas por toda la geografía nacional.

La asamblea fue presidida por Avelino Suárez, elegido presidente del Colegio el pasado mes de noviembre, y en ella se planteó como objetivo fundamental la modernización de los colegios profesionales, como consecuencia del desarrollo tecnológico de los sectores industrial y minero.

Entre los objetivos alcanzados, Avelino Suárez resaltó la consecución de la representatividad proporcional al

número de colegiados, en el Consejo Superior, reivindicación histórica de este Colegio a lo largo de los últimos 21 años. Por otra parte está la respuesta positiva del director general de Minas, señor Kindelán, a la petición del colegio de que se normalice la realización de prácticas de trabajo en empresas de la región, para técnicos de primer empleo.

LA FUNDACION «GOMEZ-PARDO» PRESENTA SU MEMORIA DE ACTIVIDADES DURANTE 1982

La Fundación Gómez-Pardo acaba de dar a conocer su memoria de actividades correspondiente al ejercicio del pasado año. En la misma se pone de manifiesto lo satisfactoria de las actividades realizadas, que han superado las previsiones de su presupuesto y plan operativo. En este sentido se ha mantenido la tendencia creciente de los últimos tres años, aunque cada vez se tienda a seleccionar más cuidadosamente aquellas actividades que resulten más provechosas.

En el capítulo de actividades generales hay que resaltar el estrecho marco de colaboración entre la Fundación y la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid, a la que complementa en algunos aspectos. En este sentido hay que destacar las numerosas publicaciones editadas, principalmente en los ámbitos universitarios, culturales e industriales. Como espaldarazo oficial de la capacidad científica y técnica de la Fundación, señalar que durante el pasado año fue inscrita en el Registro Especial correspondiente a la Dirección General de Innovación Industrial y Tecnológica, como entidad colaboradora del Ministerio de Industria y Energía.

No obstante, una de las principales actividades de la Fundación siguen siendo sus cursos de formación permanente, de los que se han desarrollado un buen número durante el pasado año, alguno de ellos canalizado a través del Instituto de la Energía. De momento, y dado el nivel alcanzado, no se piensa incrementar este tipo de actividades, estando dirigidos los esfuerzos del equipo directivo hacia una mejora de la calidad y eficacia de las acciones de formación y de los medios puestos en juego.

En cuanto al *Laboratorio de Análisis Químico Industrial*, ha continuado su colaboración con diversas empresas, para las cuales realiza investigaciones, análisis y estudios de tipo muy variado. Para la realización de los ensayos correspondientes, aparte de las técnicas analíticas clásicas, se dispone de los más recientes aparatos de aplicación de técnicas instrumentales. Ante el interés creciente sobre temas energéticos, el Laboratorio ha participado en grandes proyectos, entre los que se pueden destacar los siguientes:

- Evaluación de reservas de lignitos, con innumerables determinaciones de análisis inmediato, análisis elemental de combustibles y cenizas, potencia calorífica superior e inferior, etcétera.
- Evaluación de reservas de pizarras bituminosas, para lo que se ha puesto a punto la técnica de Fischer mejorada. Esto permite determinar el contenido en crudo destilable a 500° C. Asimismo se han realizado

ensayos de pizarras para estudiar la viabilidad de su explotación comercial.

- Ensayos geoquímicos dirigidos a la determinación de hidrocarburos diluidos en rocas y sedimentos marinos, técnica íntimamente relacionada con la búsqueda y evaluación de yacimientos de petróleo. Para su realización ha sido necesaria la puesta a punto de los métodos de extracción y de análisis cromatográfico de los hidrocarburos resultantes.

AITEMIN

La Asociación de Investigación Tecnológica de Equipos Mineros (AITEMIN), promovida por la Fundación Gómez-Pardo, la Empresa Nacional Adaro de Investigaciones Mineras (ENADIMSA), y la Asociación Nacional de Fabricantes de Bienes de Equipo (SERCOBE), fue aprobada por la Comisión Asesora de Investigación Científica y Técnica, de la Presidencia del Gobierno, en 1977, y entre sus asociados se encuentran las principales empresas mineras de España y la mayoría de los fabricantes de equipos mineros, siendo socio titular de mérito el Instituto Geológico y Minero.

Dentro de sus objetivos, el desarrollo, con carácter cooperativo, de programas de investigación científica y resolución de problemas de asistencia técnica de las empresas asociadas, durante 1982 ha duplicado el volumen de sus actividades en relación al año anterior. Dentro de este fuerte impulso global, la actividad específica de investigación ha sido la que ha experimentado el avance más significativo.

LABORATORIO OFICIAL

«JOSE MARIA DE MADARIAGA»

Durante el pasado año este laboratorio ha desarrollado una considerable labor, basada en el uso de los equipos de instrumentos aportados por el Ministerio de Industria y Energía. En el área de Estudios, Ensayos e Informes Técnicos se ha producido un incremento de actividades decisivo. Las actividades docentes se incrementaron también de forma notable, al igual que las relativas a investigación, que han permitido culminar dos tesis doctorales.

GESTION ECONOMICA

El ejercicio se ha liquidado con un déficit aproximado de 460.000 pesetas, que no supone ni siquiera un 1 por 100 del presupuesto total. Aunque este déficit, al igual que en los tres años precedentes, es muy pequeño, la dirección de la Fundación tiene interés en frenarlo para este año.

El total de ingresos rondó los 50 millones de pesetas, procedentes en su mayor parte de las cantidades percibidas por las actividades de Formación Permanente y la Residencia. En cuanto a los gastos, fueron superiores a los ingresos en esas 460.000 pesetas de déficit que se han señalado. Los capítulos más destacables fueron los relativos a emolumentos y Seguridad Social, y suministros y servicios exteriores.

Notas bibliográficas

GEOLOGIA GENERAL

20815. **Estudio geológico, edáfico y fitoecológico de la zona de pastos del Valle de Tena (Huesca).** FERRER BENIMELLI, C.

Publicación núm. 2 de la Institución Fernando el Católico. Zaragoza (1981), núm. 805, 1-300, esp., bibl. IGME.

* Valle, Geología regional, Geomorfología, Pedología, Provincia Huesca.

GEOLOGIA REGIONAL

20773. **El Karst de Pradera de la Sierra.** MORENO SANZ, F.

Geographica (1980), núm. 21-22, 77-94, ref., 24, esp., bibl. IGME.

* Karst, Cretácico, Caliza, Análisis mayores, Sondeo eléctrico, Metodología, Tectónica de cobertera, Geomorfología, Fuente, Calidad agua, Caudal, Balance agua, Provincia Segovia.

20776. **Contribución al estudio de la superficie de erosión en Galicia al Noroeste de la dorsal.** RODRIGUEZ MARTINEZ-CONDE.

Geographica (1980), núm. 21-22, 195-200, ref. 11, esp., bibl. IGME.

* Superficie de erosión, Metodología, Litofacies, Gneis, Gneis ojoso, Micaesquisto, Granito, Orogenia hercínica, Tectónica de fractura, Galicia.

20816. **El substrato rocoso: Litología y Tectónica.** FERRER BENIMELLI, C.

Publicación núm. 2 de la Institución Fernando el Católico. Zaragoza (1981), núm. 805, 25-54, 137 ref., esp., bibl. IGME.

* Silúrico, Devónico, Carbonífero, Pérmico, Trías, Cretácico sup., Granito, Aureola metamórfica, Análisis químico, Análisis cuantitativo, Orogenia hercínica, Orogenia alpina, Tectónica imbricada, Valle de Tena, Provincia Huesca.

20841. **Síntesis del Terciario Continental de la Cuenca del Duero.** PORTERO GARCIA, J. M.; DEL OLMO ZA-

MORA, P.; RAMIREZ DEL POZO, J.; VARGAS ALONSO, I.

Temas geológicos-mineros (1979), vol. 4, 11-37, ref. 106, esp., res. ing., bibl. IGME.

* Terciario, Sedimentación continental, Medio continental, Geología regional, Estilo tectónico, Paleogeografía, Fauna vertebrada, Cuenca Duero.

ESTRATIGRAFIA

20824. **El Jurásico en facies carbonatadas del sector levantino de la Cordillera Ibérica.** GOMEZ, J. J.

Semin. estratigr. Ser. monogr. (1979), núm. 4, 1-683, esp., res. ing., franc., bibl. IGME.

* Tesis, Jurásico, Sedimentación marina, Estructura sedimentaria, Litofacies, Composición carbonato, Corte sondeo, Fauna específica, Paleografía, Provincia Valencia, Provincia Cuenca, Provincia Castellón.

20825. **Estratigrafía y paleogeografía del Pérmico y Triásico al Oeste de Molina de Aragón, provincia de Guadalajara.** RAMOS, A.

Semin. estratigr. Ser. monogr. (1979), núm. 6, 1-313, ref. 13 pp., esp., bibl. IGME.

* Tesis, Pérmico, Trías, Corte sondeo, Litofacies, Cronoestratigrafía, Fauna específica, Palinología, Paleogeografía, Provincia Guadalajara.

20848. **Evolución de la sedimentación terciaria en el borde N de la Cuenca del Duero entre los valles del Torio y Pisuegra. León-Palencia.** COLMENERO, J. R.; GARCIA RAMOS, J. C.; MANJON, M.; VARGAS, I.

Temas geológico-mineros (1979), vol. 4, 171-181, ref. 9, esp., res. ing., bibl. IGME.

* Sedimentación detrítica, Abanicos fluviales, Sedimento, Litofacies, Terciario, Provincia León, Provincia Palencia.

20849. **Depósitos aluviales cíclicos en el Paleógeno del borde N de la Cuenca del Duero; León-Palencia.** COLMENERO, J. R.; MANJON, M.; GARCIA-RAMOS, J. C.; VARGAS, I.

Temas geológico-mineros (1979), vol. 4, 185-190, ref. 9, esp., res. ing., bibl. IGME.

* Sedimentación detrítica, Abanicos aluviales, Ciclo sedimentario, Sedimentos, Litofacies, Paleógeno, Provincia León, Provincia Palencia.

20850. **El Paleógeno del sector septentrional de la Cuenca de Ciudad Rodrigo, alrededores de Torresmenudas, Salamanca.** CORDERO, P.; CORROCHANO, A.

Temas geológico-mineros (1979), 199-207, ref. 6, esp., res. ing., bibl. IGME.

* Sedimentación detrítica, Abanicos aluviales, Sedimento, Litofacies, Paleógeno, Estratificación cruzada, Corte geológico, Provincia Salamanca.

20862. **Una etapa de comunicación entre las cuencas de Calatayud y Almazán durante el Mioceno Superior.** MELLENDEZ, A.; PARDO, J.; PENDON, J. G.; VILLEGAS, J.

Temas geológico-mineros (1979), vol. 6, 415-429, ref. 12, esp., res. ing., bibl. IGME.

* Paleografía, Cuenca sedimentaria, Mioceno sup., Corte geológico, Correlación, Fauna, Caliza, Yeso, Paleocorriente, Provincia Soria, Provincia Zaragoza, Cuenca Duero.

GEOMORFOLOGIA

20817. **Geomorfología.** FERRER BENIMELLI, C.

Publicación núm. 2 de la Institución Fernando el Católico. Zaragoza (1981), núm. 805, 55-66, ref. 137, esp., bibl. IGME.

* Geomorfología, Valle glaciar, Ciclo erosión, Erosión, glaciar, Periglaciario, Soliflucción, Derrubio, Valle de Tena, Provincia Huesca.

20863. **Esquema morfológico evolutivo de la fosa de Ciudad Rodrigo (Salamanca).** MOLINA, E.; BLANCO, J. A.; MARTINEZ GIL, F. J.

Temas geológico-mineros (1976), vol. 6, 433-448, ref. 20, esp., res. ing., bibl. IGME.

* Geomorfología, Graben, Evolución, Plioceno, Cuaternario, Macizo montañoso, Valle, Penillanura, Glacis, Terraplenamiento fluvial, Provincia Salamanca, Cuenca Duero.

20864. **El sistema de terrazas del río Carrión.** OLIVE DAVO, A.; PORTERO GARCIA, J. M.; DEL OLMO ZAMORA, P.; ARAGONES VALLE, E.; CARRERAS SUAREZ, F.; MOLINA, E.; GUTIERREZ ELORZA, M.

Temas geológico-mineros (1979), vol. 6, 449-459, ref. 17, esp. res. ing., bibl. IGME.

* Terraza, Terraplenamiento fluvial, Plano inundable, Abanicos fluviales, Grava, Granulometría, Arena, Paleocorriente, Suelo fersialítico, Provincia Palencia, Cuenca Duero.

CUATERNARIO

20761. **Repertorio Bibliográfico sobre morfología glaciar de la Península Ibérica.** MARTINEZ DE PISON, B.; ANTON, J.

Cuad. inv. geograf. (1981), vol. 7, núm. 1-2, 3-49, esp., bibl. IGME.

* Morfología, Bibliografía, España, Portugal.

20762. **Morfología del Circo de Tucarroya (Macizo del Monte Perdido, Pirineo Aragonés).** NICOLAS, P. M.

Cuad. inv. geograf. (1981), vol. 7, núm. 1-2, 51-80, ref. 23, esp., res. ing., bibl. IGME.

* Morfología glaciar, Síntesis bibliográfica, Relieve estructural, Escama, Orogenia hercínica, Orogenia alpina, Karst, Caliza, Disolución, Glaciar, Geometría, Periglaciario, Morrena, Pleistoceno, Holoceno, Pirineos españoles, Provincia Huesca.

GEOLOGIA MARINA

22103. **Distribución y composición de la materia orgánica en suspensión en aguas de las Islas Canarias.** DE ARMAS, J. D.

Bol. Inst. Esp. Oceanogr. (1981), vol. 6, núm. 4, 209-220, ref. 28, esp. res. franc., ing., bibl. ENADIMSA.

* Agua mar, Suspensión, Materia en suspensión, Carbono orgánico, Nitrógeno, Fósforo, Azúcar, Glúcido, Clorofila, Variación estacionaria, Variación espacial, Canarias, Tenerife, Atlántico Norte.

22104. **Un estudio comparado preliminar de la biomasa seca, materia orgánica, carbono, hidrógeno, relación C/N, y del contenido energético del zooplancton de las rías de Arosa y Muros.** CORRAL, J.; MASSO, C.; ALVAREZ-OSSORIO, M. T.

Bol. Inst. Esp. Oceanogr. (1981), vol. 6, núm. 4, 221-240, ref. 9, esp., res. ing., bibl. ENADIMSA.

* Plancton, Zooplacton, Biomasa, Materia orgánica, Carbono, Nitrógeno, Energía, Medio pelágico, Agua mar, Variación estacionaria, Provincia Pontevedra, Bahía Arosa, Ría de Arosa, Ría de Muros, Atlántico Nordeste.

22105. **Les deversements petroliers accidentels et leurs conséquences sur les ressources marines vivantes exploitables en prenant pour référence l'accident de L'AMOCOCADIZ.** MAURIN, C.

Bol. Inst. Esp. Oceanogr. (1981), vol. 6, núm. 4, 259-272, franc., bibl. ENADIMSA.

* Polución, Agua mar, Vertido petróleo.

22110. **Bioconcentración de V y Ni por elementos de la biosfera marina.** BALLESTER, A.; CASTELLVI, J.

Invest. pesq. Barcelona (1980), vol. 44, núm. 1, 1-12, ref. 20, esp., res. ing., bibl. ENADIMSA.

* Sedimento actual, Concentración, Vanadio, Níquel, Plataforma continental, Medio bentónico, Medio pelágico, Sedimentación marina, Provincia Barcelona, Provincia Tarragona, Mar Mediterráneo Oeste.

22111. **Hidrografía de la plataforma costera de Vizcaya y Guipúzcoa, febrero a diciembre 1976.** ARIAS, E.; MANRIQUEZ, M.; CALDENTY, P.; SOUSA, J. M.

Invest. pesq. Barcelona (1980), vol. 44, núm. 1, 13-34, ref. 14, esp., res. ing., bibl. ENADIMSA.

* Agua mar, Plataforma continental, Medio agua poco profunda, Salinidad, Densidad, Temperatura, Provincia Guipúzcoa, Provincia Vizcaya, Atlántico Nordeste.

22112. **Evolución y distribución vertical de la biomasa de zooplancton expresada en carbono y nitrógeno orgánicos, relación C/N, y carbono detrítico en una zona marina afectada por aguas residuales procedentes de la ciudad de Barcelona.** ALCARAZ, M.

Invest. pesq. Barcelona (1980), vol. 44, núm. 2, 265-274, ref. 9, esp., res. ing., bibl. ENADIMSA.

* Evolución, Biomasa, Plancton, Zooplacton, Profundidad, Medio litoral, Muestreo, Reparto muestras, Concentración, Carbono, Nitrógeno, Polución, Provincia Barcelona, Mar Mediterráneo.

20748. **Estudio geológico submarino del litoral cantábrico con sonar de barrido lateral.** REY SALGADO, J.; SANZ ALONSO, J. L.

Bol. Inst. Esp. Oceanogr. (1982), vol. 7, núm. 1, 89-96, ref. 6, esp., res. ing., bibl. IGME.

* Fondo Marino, Carbonífero, Cretácico, Fracturación, Sonar, Mapa geológico, Provincia Santander, Mar del Norte.

20749. **Resultados preliminares de la campaña de Geología Marina «GANSO-80» realizada entre Gandía y Sagunto.** PALOMO, C.; ACOSTA, J.; DE ANDRES, J. R.; DIAZ DEL RIO, V.; HERRANZ, P.; REY, J.; SANZ, J. L.

Bol. Inst. Esp. Oceanogr. (1982), vol. 7, núm. 1, 117-124, esp., res. ing., bibl. IGME.

* Plataforma continental, Levantamiento geofísico, Sísmica reflexión, Sonar, Muestreo, Sedimento marino, Provincia Valencia, Mar Mediterráneo Oeste.

20750. **Apantallamientos acústicos en la Ría de Muros y Noya y en el margen continental de Cádiz.** ACOSTA YEPES, J.

Bol. Inst. Esp. Oceanogr. (1982), vol. 7, núm. 1, 127-149, ref. 31, esp., res. ing., bibl. IGME.

* Sísmica reflexión, Margen continental, Sedimento marino, Onda acústica, Propagación onda, Anomalía, Perfil geofísico, Mapa geofísico, Provincia La Coruña, Provincia Cádiz.

20778. **Informe preliminar sobre la campaña de geología marina «Hércules-81» en el Estrecho de Gibraltar.** ACOSTA, J.; SANZ, J. L.; PALOMO, C.; DIAZ DEL RIO, V.; JEBU, H.; HERRANZ, P.; REY, J.; SANZ GIL, C.

Inf. tec. Inst. Esp. Oceanogr. (1982), vol. 82, núm. 1, no pp., ref. 6, esp., res. franc. bibl. IGME.

* Batimetría, Perfil geofísico, Sísmica reflexión, Sonar, Campo electromagnético, Relieve submarino, Neógeno, Discordancia, Basamento, Horst, Atlántico Nordeste, Estrecho Gibraltar.

GEOLOGIA DEL INGENIERO

20543. **Geología y Medio Ambiente.** PEDRAZA GIL SANZ, J.

Series Monográficas Centro Estudios Ordenación Territorio y Medio Ambiente (1981), núm. 11, 1-463, ref. 521, esp., bibl. IGME.

* Monografía, Geología del medio ambiente, Geología.

20573. **Aspectos geotécnicos para la Ordenación del Territorio en zonas de Montaña. Área Bielsa-Plan.**

IGME (1980), 2 vols., 11-31, esp., bibl. IGME.

* Nota explicativa, Mapa geológico, Mapa litológico, Mapa topográfico, Mapa geotécnico, Planificación, Planificación regional, Cartografía, Metodología, Roca ígnea, Roca metamórfica, Yeso, Roca sedimentaria, Cuaternario, Propiedad geotécnica, Pirineos españoles, Provincia Huesca.

20752. **El medio ambiente y los esmaltes.** VAN DER RHEE, A. K.

Bol. Soc. Esp. Cerám. Vidr. (1982), vol. 21, núm. 1, 23-31, ref. 19, esp., bibl. IGME.

* Industria, Polución, Atmósfera, Agua, Protección medio ambiente, Coste, CEE.

20757. **La clasificación geomecánica de las rocas aplicadas a las obras subterráneas.** MORENO, E.

Cuad. EPTISA (1981), núm. 1, 1-65, esp., bibl. IGME.

* Obra subterránea, Roca, Propiedad geotécnica, Clasificación, Histórico, Metodología, Sostenimiento.

20758. **Experiencias de la utilización de clasificaciones geomecánicas en la construcción de túneles.** MORENO, E.

Cuad. EPTISA (1981), núm. 2, 3-63, ref. 11, esp., bibl. IGME.

* Vía comunicación, Túnel, Roca, Propiedad geotécnica, Clasificación, Histórico, Metodología, Sostenimiento, Provincia León.

20759. **Sismicidad inducida. Estudio de deslizamientos en la depresión terciaria Valdeollivas-La Ventosa.** OCHOA BRETON, A.; LAZUEN ALCON, F. J.

Cuad. EPTISA (1982), núm. 3, 1-30, ref. 14, esp., bibl. IGME.

* Sismicidad, Seísmo inducido, Deslizamiento ladera, Mioceno, Yeso, Litofacies, Precipitación atmosférica, Superficie, Castillejo del Romeral, Provincia Cuenca.

20760. **Cálculo del amortiguamiento por radiación en la vibración forzada de un cuerpo que descansa sobre un estrato elástico.** NAVARRO UGENA, C.

Cuad. EPTISA (1982), núm. 3, 33-43, ref. 6, esp., bibl. IGME.

* Teoría, Vibración, Difusión onda, Atenuación, Medio elástico, Medio discontinuo, Ecuación matemática.

20840. **Lodos de sondeo y perforación minera.** JANNAIRE, M. M.

Tecniterrae (1982), vol. 8, núm. 46, 79-92, esp., bibl. IGME.

* Perforación, Sondeo, Sostenimiento, Inyección, Bentonita, Materia solución, Propiedad físico-química, Tixotropía, Viscosidad, pH, Hidrodinámica, Ecuación matemática, Filtrado, Reciclaje.

PALEONTOLOGIA DE LOS INVERTEBRADOS

20847. **Ostracofauna de la facies «Cuestas» en el borde occidental de la Cuenca del Duero.** CIVIS, J.; GARCIA MARCOS, J. M.; JIMENEZ, E.

Temas geológico-mineros (1979), vol. 4, 153-167, ref. 11, esp., res. ing., bibl. IGME.

* Fauna ostrácodo, Arcilla, Marga, Caliza, Tortoniense, Vallesiense, Corte geológico, Abzames, Provincia Zamora.

PALEONTOLOGIA DE LOS VERTEBRADOS

20858. **Los primeros microvertebrados de la Cuenca del Duero: Listas faunísticas preliminares e implicaciones bioestratigráficas y paleofislográficas.** LOPEZ MARTINEZ, N.; DE BORJA SANCHIZ, F.

Temas geológico-mineros (1979), vol. 4, 341-353, ref. 9, esp., res. franc., bibl. IGME.

* Fauna vertebrada, Medio continental, Sedimentación continental, Mioceno medio, Mioceno sup., Vallesiense, Bioestratigrafía, Paleocología, Provincia Palencia.

PALEOBOTANICA

20814. **Estudio sistemático y paleoecológico de la flora miocénica de la cuenca de la Seu d'Urgell.** SANZ DE SIRIA CATALAN, A.

Paleontol. evol. (1980), núm. 15, 3-31, ref. 16, esp., res. franc., bibl. IGME.

* Pteridophita, Equisetales, Filicales, Monocotiledóneas, Dicotiledóneas, Mioceno sup., Medio lacustre, Sedimentación lacustre, Paleocología, Provincia Lérida.

TECTONICA

20844. **Contribución al estudio tectónico de la región de Santa María la Real de Nieva; Provincia de Segovia.** ALVAREZ LOBATO, F.

Temas geológico-mineros (1979), vol. 4, 87-105, ref. 23, esp., res. ing., bibl. IGME.

* Pizarra, Antecámbrico, Cámbrico, Cuarcita, Ordovícico inf., Litofacies, Orogenia hercínica, Pliegue, Esquistosidad, Micropliegue, Kink band, Tectónica de fractura, Falla de desgarre, Provincia Segovia.

20861. **Análisis estructural de las fracturas fotodetectadas en el alto Duero. Cuenca de Almazán.** MARTIN ESCARZA, C.

Temas geológico-mineros (1979), vol. 4, 391-411, esp., res. ing., bibl. IGME.

* Tectónica de fractura, Red fractura, Lineación, Dirección, Fractura extensión, Tectogénesis, Geodinámica, Provincia Soria.

HIDROLOGIA

20512. **Alto Noguera Ribagorzana. Su valoración hidrográfica.** PLANA-CASTELLVI, J. A.

Pirineos (1981), vol. 31, núm. 112, 5-40, ref. 8, esp., bibl. IGME.

* Reserva hidrográfica, Clima, Meteorología, Precipitación atmosférica, Temperatura, Dato, Estadística, Metodología, Agua superficie, Provincia Lérida.

20740. **Influencia del poder desecante de la atmósfera en la evaporación desde una superficie de agua.** GARMENDIA, J.; MATEOS, J.; RODRIGUEZ, C.

Anu. Cent. Edafol. Biol. Apl. Salamanca (1978), vol. 4, 253-263, ref. 25, esp., res. ing., bibl. IGME.

* Ecuación matemática, Desecación, Atmósfera, Evaporación, Agua superficie.

20828. **Balance hídrico actual y futuro de la Región murciana.** SENENT ALONSO, M.; RODRIGUEZ ESTRELLA, T.; GOMEZ DE LAS HERAS, J.

Tecniterrae (1981), núm. 44, 44-57, esp., bibl. IGME.

* Recursos agua, Agua subterránea, Agua superficie, Calidad agua, Demanda, Acción preventiva, Planificación cuenca hidrogeológica, Política Estado, Provincia Murcia.

20842. **Aprovechamiento de las aguas subterráneas del valle de Amblés para el abastecimiento de agua a Avila.** CORCHON, F.; SAHUN, B.

Temas geológico-mineros (1979), vol. 4, 41-55, ref. 10, esp., res. franc., bibl. IGME.

* Manto agua, Arena, Arcilla, Sedimentación detrítica, Terciario, Recurso agua, Calidad agua, Provincia Avila.

SILICATOS

20751. **Petrografía y mineralogía de arcillas en relación con procesos de cocción rápida.** BASTIDA, J.

Bol. Soc. Esp. Cerám. Vidr. (1982), vol. 21, núm. 1, 15-22, ref. 18, esp., res. ing. franc., alem., bibl. IGME.

* Arcilla mineral, Grupo arcilla mineral, Propiedad física, Granulometría, Límite Atterberg, Análisis mayores, Composición mineralógica, Porosidad, Greisenización, Pirólisis, Experiencia.

PETROLOGIA DE ROCAS SEDIMENTARIAS

20513. **Primer Simposium sobre diagénesis y sedimentos de rocas sedimentarias.**

Rev. inst. invest. geol., Barcelona (1983), vol. 34, 5-349, esp., bibl. IGME.

* Reunión, Roca sedimentaria, Sedimentación, Medio, Diagénesis.

20777. **Análisis comparativo de la morfometría de canto de la raña y de otras formaciones detríticas de Somosierra (Sistema Central Español).** SANZ DONAIRE, J.

Geographica (1980), núms. 21-22, 235-251, ref. 26, esp., bibl. IGME.

* Canto rodado, Cuarcita, Conglomerado, Roca elástica, Pérmico, Buntsandstein, Mioceno, Granulometría, Fracción gruesa, Distribución estadística, Histograma, Paleoclima, Paleorrelieve, Hercínico, Centro, Provincia Madrid, Provincia Segovia.

20826. **La separación de residuo insoluble de rocas carbonatadas.** BARAHONA FERNANDEZ; PALUMBO, P.

Tecniterrae (1981), núm. 44, 6-9, ref. 8, esp., res. ing., bibl. IGME.

* Roca carbonatada, Separación, Residuo insoluble, Metodología.

20843. **Estudio sedimentológico de los depósitos fluviales del Paleógeno en Olmo de la Guareña, Salamanca.** ALONSO GAVILAN, G.

Temas geológico-mineros (1979), vol. 4, 59-83, ref. 20, esp., res. ing., bibl. IGME.

* Sedimentación fluvial, Medio fluvial, Paleógeno, Estructura sedimentaria, Litofacies, Estratificación cruzada, Paleocorriente, Provincia Salamanca.

20845. **Los abanicos aluviales terciarios del flanco norte de la Sierra Monrubia-Pradales.** ARMENTEROS, I.; CABBALLEIRA, J.; CORROCHANO, A.; CORRALES, I.; ALONSO GALAN, G.

Temas geológico-mineros (1979), vol. 4, 109-123, ref. 7, esp., res. ing., bibl. IGME.

* Abanicos aluviales, Sedimento, Fango, Litofacies, Mioceno, Provincia Burgos, Provincia Segovia.

20846. **Presencia y origen de alunita en el borde meridional de la Cuenca del Duero, Provincia de Avila.** BUS-TILLO, A.; MARFIL, R.; UBANELL, A. G.; DE LA PEÑA, J. A.

Temas geológico-mineros (1979), vol. 4, 127-149, ref. 21, esp., res. ing., bibl. IGME.

* Aluminio sustancia, Alunita, Roca clástica, Sedimento, Yacimiento hidrotermal, Paleógeno, Corte geológico, Análisis térmico diferencial, Microsonda electrónica, Difracción RX, Monsalpe, Provincia Avila.

20852. **Texturas y estructuras en calizas continentales: Un ejemplo de heterogeneidad textural: Las rocas carbonáticas de la Cuenca del Duero.** GARCIA DEL CURA, M. A.; ORDONEZ, S.

Temas geológico-mineros (1979), vol. 4, 227-252, ref. 21, esp., res. ing., bibl. IGME.

* Roca carbonatada, Caliza, Sedimentación lacustre, Medio lacustre, Sedimentación fluvial, Medio fluvial, Textura, Petrofábrica, Litofacies, Provincia Segovia, Provincia Soria.

20853. **Rejuvenecimiento del área distributiva del NE de la Meseta, provincias de Palencia y Burgos, en el Albiense inferior-medio.** GARCIA MONDEJAR, J.

Temas geológico-mineros (1979), vol. 4, 255-271, ref. 15, esp., res. ing., bibl. IGME.

* Sedimentación fluvial, Medio fluvial, Sedimentación deltaica, Medio deltaico, Rejuvenecimiento relieve, Albiense, Arenisca, Conglomerado, Estratificación cruzada, Sedimentación litoral, Medio litoral, Caliza, Paleogeografía, Provincia Palencia, Provincia Burgos, Provincia Santander.

20854. **Modelo de sedimentación en los abanicos aluviales de clastos carbonatados del borde N de la Cuenca del Duero.** GARCIA-RAMOS, J. C.; COLMENERO, J. R.; MANJON, M.; VARGAS, I.

Temas geológico-mineros (1979), vol. 4, 275-289, ref. 4, esp., res. ing., bibl. IGME.

* Sedimentación fluvial, Medio fluvial, Abanicos aluviales, Sedimento, Composición carbonatada, Estructura sedimentaria, Paleocorriente, Paleógeno, Provincia León, Provincia Palencia.

20855. **Utilización de minerales pesados y de espectros litológicos como ayuda en la identificación del área madre y en la separación de los diferentes sistemas de abanicos aluviales. Terciario del borde N de la Cuenca del Duero.** GARCIA-RAMOS, J. C.; MANJON, M.; COLMENAREJO, J. R.

Temas geológico-mineros (1979), vol. 4, 293-301, ref. 6, esp., res. ing., bibl. IGME.

* Sedimentación fluvial, Medio fluvial, Abanicos aluviales, Sedimento, Composición carbonatada, Composición silícea, Fracción fina, Mineral pesado, Diagénesis, Terciario, Provincia León, Provincia Palencia.

20857. **La sedimentación terciaria en la parte occidental del Bierzo, León, y sus implicaciones geomorfológicas.** HERAIL, G.

Temas geológico-mineros (1979), vol. 4, 323-337, ref. 22, esp., res. ing., franc., bibl. IGME.

* Sedimentación fluvial, Medio fluvial, Terciario, Estructura sedimentaria, Fracción fina, Fracción gruesa, Litofacies, Geomorfología, Provincia León.

20859. **Génesis y distribución espacial de los abanicos aluviales siliciclásticos del Terciario superior en el borde N de la Cuenca del Duero, León-Palencia.** MANJON, M.; COLMENERO, J. R.; GARCIA-RAMOS, J. C.; VARGAS, I.

Temas geológico-mineros (1979), vol. 4, 357-370, ref. 4, esp., res. ing., bibl. IGME.

* Abanicos aluviales, Sedimentación fluvial, Medio fluvial, Estructura sedimentaria, Sedimento, Composición silícea, Litofacies, Mioceno sup., Provincia León, Provincia Palencia.

20860. **Procedencia, significado y distribución de diversos sistemas de abanicos aluviales con clastos poligénicos en el Neógeno del borde N de la Cuenca del Duero.** MAN-

JON, M.; GARCIA-RAMOS, J. C.; COLMENAREJO, J. R.; VARGAS, I.

Temas geológico-mineros (1979), vol. 4, 373-388, ref. 7, esp., res. ing., bibl. IGME.

* Abanicos aluviales, Sedimentación fluvial, Medio fluvial Sedimento, Conglomerado, Fango, Eluvión granítico, Fracción fina, Fracción gruesa, Mineral pesado, Neógeno, Provincia León, Provincia Palencia.

YACIMIENTO DE METALES

20830. **Geología, mineralogía y génesis del yacimiento de Pb-Zn del Cerro del Toro, Motril, Granada.** HIGUERAS, P.; FENOLL HACH-ALI, P.; RODRIGUEZ GORDILLO, J.

Tecniterrae (1981), núm. 44, 65-76, ref. 31, esp., res. ing., bibl. IGME.

* Plomo sustancia, Galena, Cinc sustancia, Esfalerita, Yacimiento estratiforme, Yacimiento hidrotermal, Dolomía, Pérmico, Trías inferior, Análisis químico, Paragénesis, Provincia Granada.

YACIMIENTOS DE SUSTANCIAS NO METALICAS

20833. **El caolín en España.** GARCIA FERNANDEZ, A.; FERNANDEZ ALVAREZ, J. M.

Tecniterrae (1982), vol. 8, núm. 46, 11-15, ref. 6, esp., bibl. IGME.

* Caolín, Sustancia no metálica, Yacimiento sedimentario, Yacimiento hidrotermal, Yacimiento residual, Primario, Cretácico, Neógeno, Cuaternario, Yacimiento volcánico, Producción, Utilización sustancia, España.

SUELOS

20737. **Ensayo de clasificación numérica a suelos intrazonales de la región Oeste de España.** CASCAJO CARDOSO, M. L.; GALLARDO LANCHI, J. F.

Anu. Cent. Edafol. Biol. Apl., Salamanca (1978), vol. 4, 177-208, ref. 18, esp., res. ing., bibl. IGME.

* Suelo, Suelo intrazonal, Perfil suelo, Estructura suelo, Clasificación, Método estadístico, Análisis componente principal, Provincia Avila, Provincia Valladolid, Provincia Salamanca.

20738. **Contribución al estudio de los suelos de la margen izquierda del río Esla, Zamora. Evolución de sesquióxidos.** FONTEZA BONNIN, J.; GARCIA RODRIGUEZ, A.; NIETO DIAZ, J. L.

Anu. Cent. Edafol. Biol. Apl., Salamanca (1978), vol. 4, 209-221, ref. 11, esp., res. ing., bibl. IGME.

* Suelo, Luvisol, Suelo mediterráneo, Perfil suelo, Estructura suelo, Movilidad, Alúmina, Sílice, Oxido hierro, Análisis químico, Suelo lixivado, Acrisol, Provincia Zamora.

20739. **Caracteres hídricos y producción en suelos de la Cuenca del Guadiana.** JUAREZ SANCHEZ-RUBIO, C.; BLANCO DE PABLOS, A.

Anu. Cent. Edafol. Biol. Apl., Salamanca (1978), vol. 4, 237-252, ref. 8, esp., res. ing., bibl. IGME.

* Región hidrogeológica, Evapotranspiración, Suelo, Agricultura, Mapa pedológico, Método estadístico, Provincia Ciudad Real, Provincia Badajoz.

20741. **La necesidad de cal en suelos ácidos dedicados al cultivo de pastos en la provincia de Salamanca.** PRAT PEREZ, L.; MARTIN POLO, J. L.

Anu. Cent. Edafol. Biol. Apl., Salamanca (1978), vol. 4, 289-303, ref. 6, esp., res. ing., bibl. IGME.

* Enmienda suelo, Suelo, Cal, pH, Análisis químico, Ecuación matemática, Suelo ácido, Provincia Salamanca.

20742. **Consideraciones sobre el área granítica comprendida entre Béjar y Linares de Riofrío, Salamanca.** SAAVEDRA ALONSO, J.

Anu. Cent. Edafol. Biol. Apl., Salamanca (1978), vol. 4, 305-317, ref. 39, esp., res. ing., bibl. IGME.

* Granito, Génesis, Cordierita, Estabilidad, Rubefacción, Provincia Salamanca.

20818. **Los suelos.** FERRER BENIMELLI, C.

Publicación núm. 2 de la Institución Fernando el Católico, Zaragoza (1981), núm. 805, 83-89, ref. 137, esp., bibl. IGME.

* Suelo, Roca madre, Suelo pardo, Análisis menores, Humedad suelo, Valle de Tena, Provincia Huesca.

20851. **Relaciones entre procesos edáficos y superficies morfológicas. Vertiente Nor-Oeste de la Sierra de Francia.** GALLARDO, J. F.; MOLINA, E.

Temas geológico-mineros (1979), 211-223, ref. 14, esp., res. ing., bibl. IGME.

* Geomorfología, Sedimentación detrítica, Plioceno, Cuaternario, Morfología fluvial, Pedogénesis, Suelo pardo, Gley, Perfil suelo, Estructura suelo, Provincia Salamanca.

20856. **La cubierta edáfica de la depresión del Duero.** GARCIA RODRIGUEZ, A.; FORTEZA BONNIN, J.; LORENZO MARTIN, L. F.

Temas geológico-mineros (1979), vol. 4, 305-320, ref. 22, esp., res. ing., bibl. IGME.

* Suelo, Suelo pardo, Suelo mediterráneo, Suelo poco evolucionado, Sierozem, Suelo halomorfo, Solonchak, Solonetz, Suelo lixivado, Luvisol, Vertisol, Gley, Roca madre suelo, Sedimento, Pedogénesis.

GEOQUIMICA

20827. **Distribución de elementos trazas en las esferalitas y galenas de los yacimientos filonianos españoles del tipo B. G. P. C.** ARRIBAS, A.; MORO, C.

Tecniterrae (1981), núm. 44, 10-43, 33 ref., esp., res. ing., bibl. IGME.

* Plomo sustancia, Galena, Cinc sustancia, Esfalerita, Filón, Yacimiento hidrotermal, Roca plutónica, Roca metamórfica, Análisis menores, Análisis elemento traza, Paragénesis, España.

FISICA DEL GLOBO

20541. **Modificaciones del movimiento del eje de rotación de la Tierra al considerar modelos deformables.** SEVILLA, M. J.

Rev. R. Acad. Cienc. Exactas Fis. Nat., Madrid (1982), vol. 76, núm. 1, 177-180, ref. 5, esp., res. ing., bibl. IGME.

* Planeta Tierra, Rotación, Polo geomagnético, Ecuación matemática.

20763. **La precipitación en función de la presión y el relieve entre la Iberia húmeda y seca en el espacio Vasco-Riojano.** RUIZ URRESTARAZU, E.

Cuad. Inv. geograf. (1981), vol. 7, núms. 1-2, 81-100, ref. 17, esp., res. ing., bibl. IGME.

* Precipitación atmosférica, Presión barométrica, Relieve, Observatorio, Método estadístico, Histograma, Provincia Alava, Provincia Guipúzcoa, Navarra.

20829. **Anelasticidad en la región del Océano Pacífico comprendida por las Islas Kuriles, Islas Marianas y las Islas Haway.** CANAS, J. A.

Tecniterrae (1981), núm. 44, 58-64, ref. 19, esp., bibl. IGME.

* Anelasticidad, Análisis espectro químico, Onda Rayleigh, Atenuación, Modelo, Ecuación matemática, Océano Pacífico, Pacífico Norte.

ENERGIA

20636. **Simposio sobre prospección de Carbón.**

Esc. Tec. Sup. Ing. Minas, Oviedo (1982), 3 vols., bibliog. disem., bibl. IGME.

* Reunión, Carbón, Sustancia útil, Prospección minera, Sondeo, Diagrama, España.

20810. **Primera Central solar fotovoltaica española.** GONZALO PEREZ, A. L.

Mundo electrónico (1982), núm. 117, 81-85, esp., res. ing., bibl. IGME.

* Energía solar, Célula fotovoltaica, Central eléctrica, Proyecto, Coste, España.

20812. **Planta de energía solar en Lactaria Castellana (Alcorcón).** MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGIA.

Nuevas energías (1981), núm. 1, 3-5, esp., bibl. IGME.

* Energía solar, Vapor agua, Explotación, Metodología, Provincia Madrid.

20839. **Aportaciones al ahorro energético en el sector cerámico.** VIDAL, A.

Tecniterrae (1982), vol. 8, núm. 46, 64-78, esp., bibl. IGME.

* Industria, Material vidrio, Cerámica, Economía de energía, Pirólisis, Temperatura, Arcilla, Arcilla industrial, Inventario, Reserva, Propiedad física, Estudio de un caso.

ECONOMIA

20736. **Estudio tecnológico de arcillas cerámicas de la provincia de Salamanca.** VICENTE HERNANDEZ, M. A.; GONZALEZ GARCIA, S.; SANCHEZ CAMAZANO, M.

Anu. Cent. Edafol. Biol. Apl., Salamanca (1975), 115-135, ref. 2, esp., bibl. IGME.

* Arcilla industrial, Cerámica, Porosidad, Granulometría, Plasticidad, Contracción, Composición mineralógica, Fracción fina, Índice de Rieke, Provincia Salamanca.

20831. **Investigación operativa aplicada a proyectos mineros.** BARRERA CORTEZ, J. E.

Tecniterrae (1982), núm. 45, 5-80, ref. 19, esp., res. ing., bibl. IGME.

* Tesis, Investigación operacional, Proyecto, Explotación, Cielo abierto, Modelo físico, Modelo matemático, Método iterativo, Optimización, Rentabilidad, Programa ordenador.

20832. **Las rocas ornamentales en España.** CEPYMEC.

Tecniterrae (1982), vol. 8, núm. 46, 6-10, esp., bibl. IGME.

* Material ornamentación, Pizarra, Mármol, Granito, Importación, Exportación, Producción, Precio, España.

20834. **El sulfato sódico natural en España.** ORDONEZ, S.; MENDUÑA, J.; GARCIA DEL CURA, M. A.

Tecniterrae (1982), vol. 8, núm. 46, 16-33, ref. 24, esp., bibl. IGME.

* Thenardita, Glauberita, Mirabilita, Sulfato sódico, Evaporita, Recurso natural, Propiedad fisicoquímica, Solubilidad, Salinidad, Diagrama equilibrio, Yacimiento estratiforme, Mina, Corte geológico, Mineralurgia, Explotación, Producción, Importación, Exportación, Reserva, Génesis, Lago salado, Salmuera, Mioceno, Provincia Madrid, Cuenca Ebro.

20835. **Problemática de los minerales y rocas industriales en España.** MENDUIÑA, J.

Tecniterrae (1982), vol. 8, núm. 46, 34-43, esp., bibl. IGME.

* Sustancia no metálica, Clasificación, Producción, Previsión, España.

20836. **Normalización: Principios generales y aplicación a los minerales y rocas industriales.** CARRASCO, J.; OBIS, J.

Tecniterrae (1982), vol. 8, núm. 46, 42-46, esp., bibl. IGME.

* Normalización, Institución, Sustancia útil, Legislación, España.

20837. **Las diatomitas en España.** PLIEGO, D.; BIANCO, F.

Tecniterrae (1982), vol. 8, núm. 46, 47-52, ref. 32, esp., bibl. IGME.

* Diatomita, Carbonato, Propiedad física, Mina, Cielo abierto, Inventario, Mercado, Andalucía.

20838. **Panorámica general del yeso en España. Los yesos de la cubeta de Calatayud en la provincia de Zaragoza.** COLLANTES, L. P.; GRIFFO, J. L.

Tecniterrae (1982), vol. 8, núm. 46, 53-63, ref. 21, esp., bibl. IGME.

* Yeso sustancia, Génesis, Producción, Reserva, Análisis químico, Propiedad físico-química, Graben, Mioceno medio, Vindoboniense, Aquitaniense, Corte geológico, Provincia Zaragoza.



C. 611 V. 1983



INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA
Ríos Rosas, 23 - Madrid-3