



Instituto Tecnológico
GeoMinero de España

boletín

geológico

y minero

VOLUMEN 106

Marzo - Abril 1995

NUMERO 2



BGM
ATT. BIBLIOTECA
RIOS ROSAS, 23

ISSN 0366 - 0176

- 8 AGO 1995



boletín geológico y minero

Volumen 106

Número 2

Marzo-Abril 1995

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

Sumario

Geología	C. IÑIGO: El rinoceronte del Pleistoceno Superior de la Cueva del Búho (Segovia)	3
	A. A. ARAÚJO & A. RIBEIRO: Tangential transpressive strain regime in the Évora-Aracena Domain (Ossa-Morena Zone)	7
	L. GAGO-DUPORT; J. M. GUTIERREZ MAS; J. M. PARRADO-ROMAN; A. SANTOS, A. LOPEZ GALINDO y F. LOPEZ-AGUAYO: La fracción carbonatada en los sedimentos recientes de la plataforma continental entre el Guadalquivir y el Cabo de Trafalgar... .. .	14
Minería	J. RAMIREZ COPEIRO DEL VILLAR y S. MAROTO ARANDA: Metodología de investigación aplicada a los yacimientos de Manganeso en Huelva	21
	E. ORCHE: Evaluación de reservas del yacimiento de Buseiro (Asturias)	32
Aguas subterráneas	L. MORENO MERINO, C. GONZALEZ HUECAS y A. LOPEZ LAFUENTE: Características edáficas condicionantes de la vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas situadas bajo fluviosoles calcáricos	45
	B. BOUHADI, J. BENAVENTE, J. JAVIER CRUZ-SANJULIAN y A. SANROMA: Caracterización hidrodinámica e hidroquímica de los acuíferos de la Cuenca Baja del río Loukkos (Marruecos)	57
Rocas industriales y ornamentales	M. LEON, M. I. CARRETERO y J. ROBREDO: Caracterización y posibilidades de aprovechamiento de las arenas silíceas de la unidad del Aljibe (Olvera, Cádiz)	74
Información	O. PUCHE RIART y F. J. AYALA CARCEDO: Notas sobre la minería y metalurgia españolas en la época del Imperio:	82

DIRECCION Y ADMINISTRACION
Ríos Rosas, n.º 23 - 28003-Madrid
Teléf./Fax (91) 349 57 62

**INSTITUTO TECNOLÓGICO
GEOMINERO DE ESPAÑA**

MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGIA
Secretaría General de la Energía y Recursos Minerales

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

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

EXPLICACION DE PORTADA

Deslizamiento de la boca del Túnel del Serralbo (Granada) por concentración de tensiones en los limos de Cenes-Juan, 1994.

Foto: F.J. Ayala-Carcedo

Depósito legal: M. 3.279 - 1958
ISSN 0366-0176
NIPO 241-95-003-X

Gráficas Chile, S.A.L. - Chile, 27 - Teléf. 359 57 55 - 28016 -MADRID

El rinoceronte del Pleistoceno Superior de la Cueva del Búho (Segovia).

Por C. IÑIGO (*)

RESUMEN

Se describen los restos de rinoceronte encontrados en Cueva del Búho (Perogordo, Segovia, España) y se asignan a la especie *Stephanorhinus hemitoechus*. Sus dimensiones son similares al material homólogo de otros yacimientos españoles del Pleistoceno Superior y son más grandes que los encontrados en yacimientos del Pleistoceno Medio.

Palabras clave: Rhinocerotidae, Pleistoceno Superior, Segovia, España.

ABSTRACT

The rhinocerotid remains from Cueva del Búho site (Perogordo, Segovia, Spain) are described and referred to *Stephanorhinus hemitoechus*. They are similar in size to other remains of this species from Spanish Upper Pleistocene sites, but they are larger than those from the Middle Pleistocene sites.

Key words: Rhinocerotidae, Upper Pleistocene, Segovia, Spain.

INTRODUCCION

El yacimiento cuaternario de Cueva del Búho (Perogordo, Segovia) está localizado en uno de los valles afluentes de la vertiente meridional del Arroyo de Tejadilla, a pocos kilómetros de Segovia en dirección SO y a unos 100m al N del Km. 2.900 de la línea férrea que une esta capital con Medina del Campo.

Su existencia se dio a conocer en el trabajo de Molero *et al.* (1989), quienes lo sitúan en el Pleistoceno Superior, al comienzo del Würm, a partir de la asociación de mamíferos fósiles identificada (entre otros, *Crocota crocuta spelaea*, *Equus hydruntinus* y varios micromamíferos de tipo moderno, entre los que debe destacarse *Microtus brecciensis*).

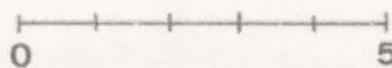
La mayor parte de los restos pertenecen a *Equus*

caballus (68%) y también es muy abundante *Crocota crocuta spelaea* (8%). Entre los restantes taxones, Molero *et al.* (1989) citan la presencia de un rinoceronte, al que clasifican como *Dicerorhinus hemitoechus*.

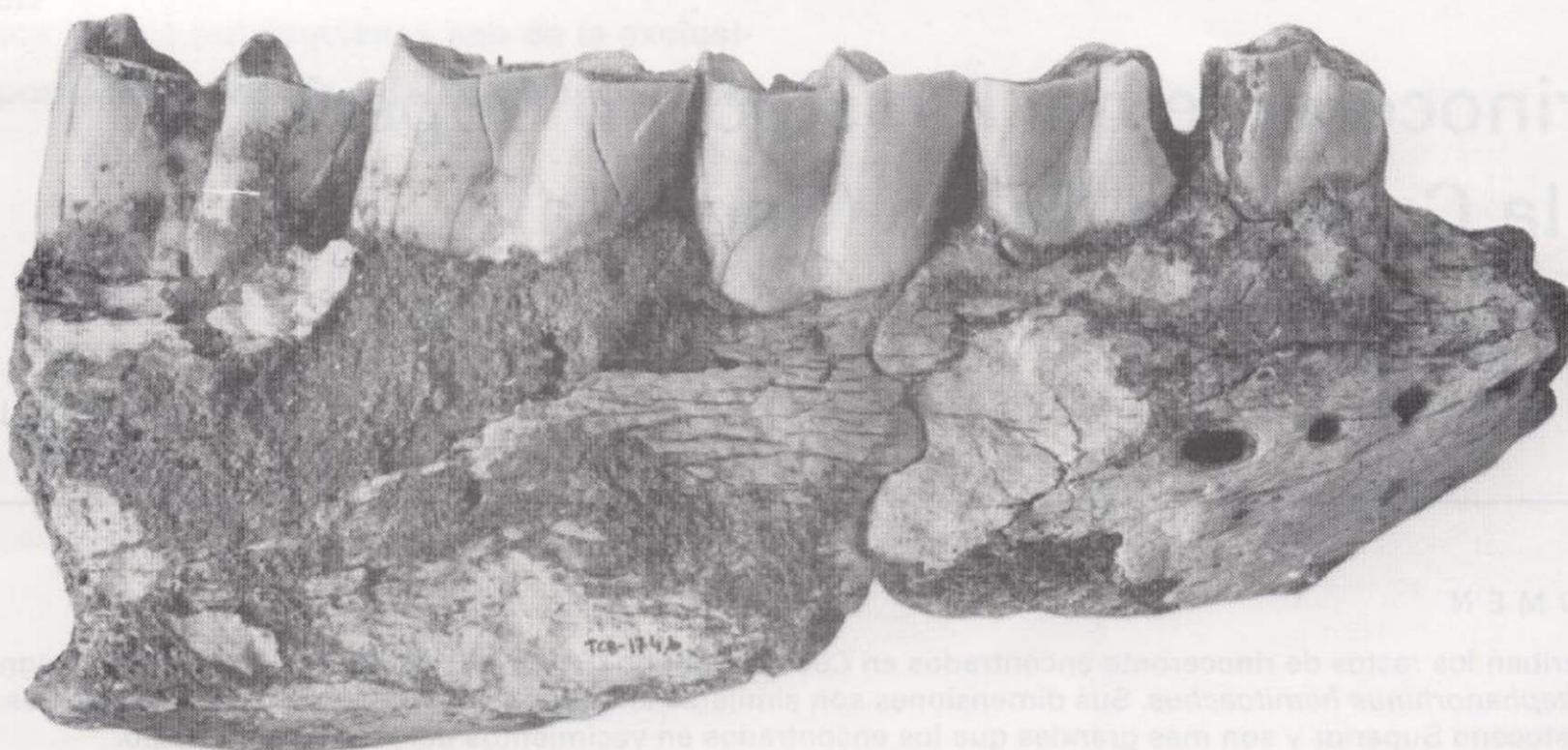
MATERIAL Y METODO

Este trabajo estudia los restos de rinoceronte procedentes de este yacimiento, que están depositados en el Museo Geominero (ITGE, Madrid). Hay dos fragmentos mandibulares (Lám. I), que podrían corresponder al mismo individuo: uno derecho (TCB-174), con casi toda la dentición yugal (P_2-M_2), y otro izquierdo (TCB-175), que sólo conserva el P_3 y el P_4 . Además, hay dos dientes sueltos, un D_3 izquierdo (TCB-177) y un P_2 izquierdo (TCB-381), ambos incompletos.

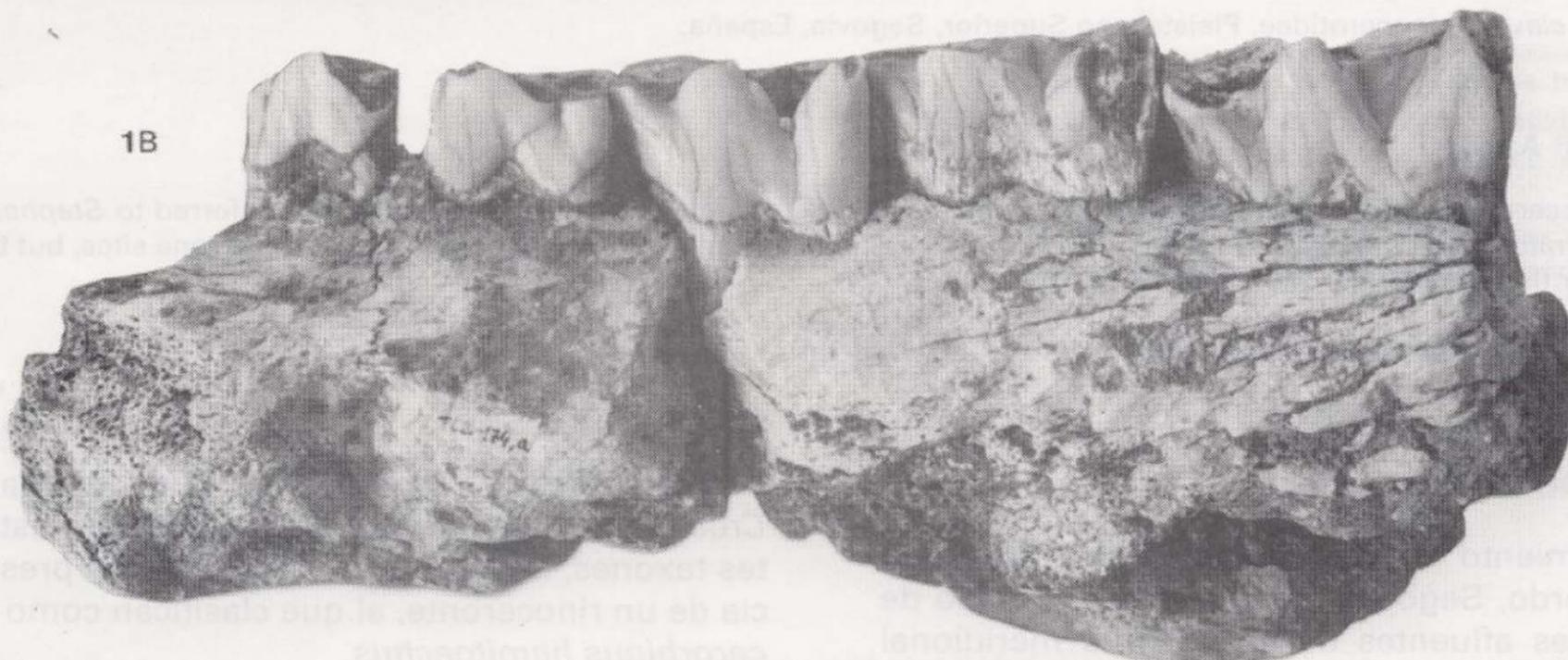
(*) Museo Geominero, ITGE, Ríos Rosas, 23-28003 Madrid



1A



1B



2



Lámina I.-*Stephanorhinus hemitoechus* de Cueva del Búho. Escala gráfica en centímetros.
 1A-Fragmento de hemimandíbula derecha con P₂, P₃, P₄, M₁ y M₂ (TCB-174). Vista labial; 1B-Idem. Vista lingual.
 2-Fragmento de hemimandíbula izquierda con P₃ y P₄ (TCB-175). Vista labial.

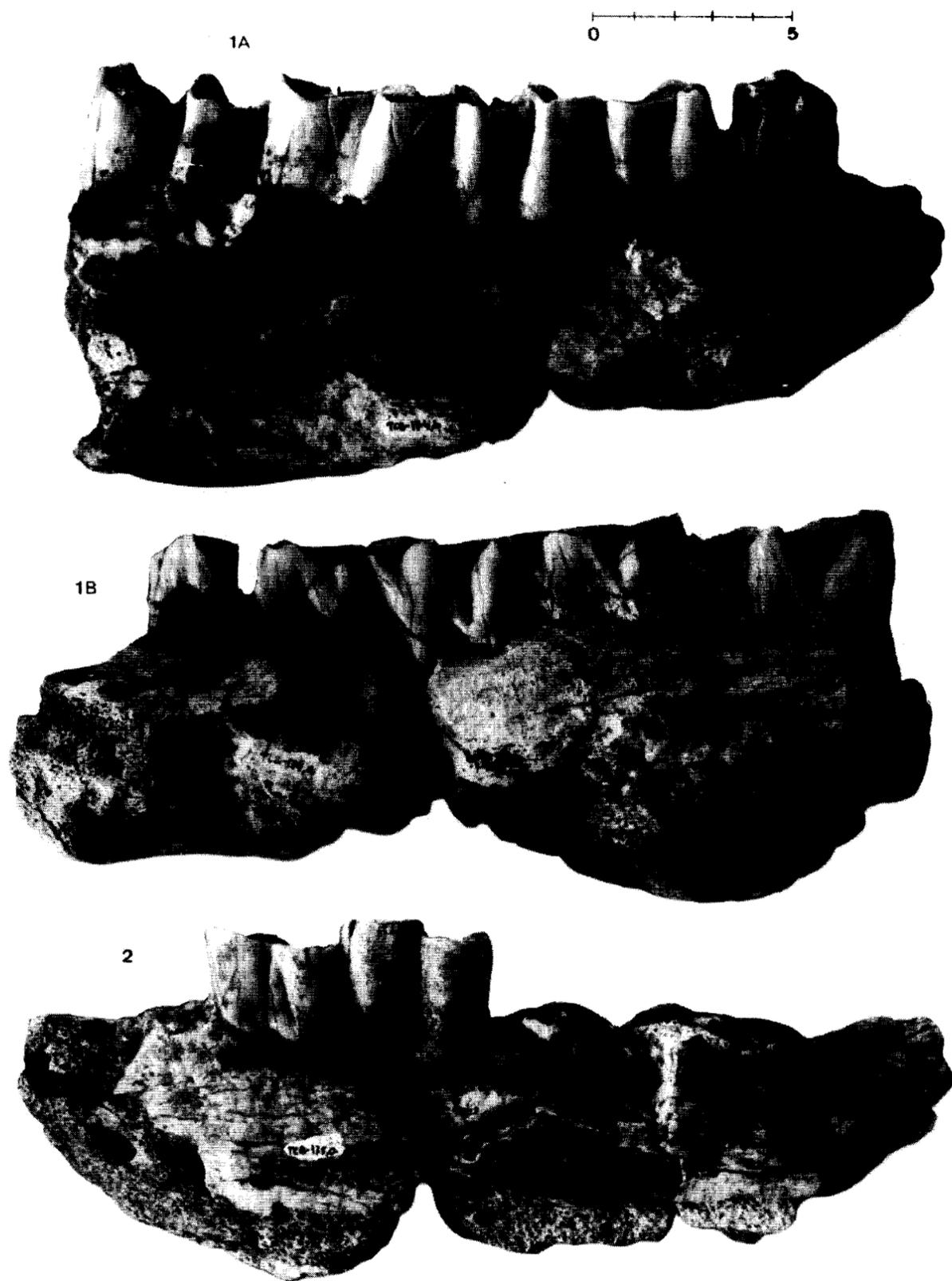


Lámina I.-*Stephanorhinus hemitoechus* de Cueva del Búho. Escala gráfica en centímetros.
1A-Fragmento de hemimandíbula derecha con P₂, P₃, P₄, M₁ y M₂ (TCB-174). Vista labial; 1B-Idem. Vista lingual.
2-Fragmento de hemimandíbula izquierda con P₃ y P₄ (TCB-175). Vista labial.

Se ha seguido la metodología propuesta por Guérin (1980) y el estudio métrico se presenta en una tabla comparativa con las dimensiones expresadas en milímetros.

DESCRIPCION

El D₃ es un germen dentario con el esmalte algo rugoso. Su protocono está ligeramente estrangulado y el pliegue del paracono está bien marcado. El valle medio está abierto y en su interior hay un fuerte gancho que se une a la crista formando una foseta media. Los cíngulos mesial y distal están bien desarrollados, cerrando este último una profunda postfoseta.

Los dientes inferiores tienen el esmalte ligeramente rugoso y el M₁ de TCB-174 presenta una delgada lámina de cemento en el valle lingual anterior. A pesar de estar gastadas, se aprecia una cierta hipsodoncia en todas las piezas. El valle lingual posterior tiene forma de "uve" y el anterior es más alto. Los cíngulos mesial y distal son muy suaves y no existen cíngulos laterales.

DISCUSION Y CONCLUSIONES

En los yacimientos europeos del Pleistoceno Superior están presentes tres especies de rinoceronte: *Coelodonta antiquitatis*, *Stephanorhinus mercki* y *Stephanorhinus hemitoechus* (Guérin, 1982).

El rinoceronte de Cueva del Búho se diferencia claramente de *C. antiquitatis*. La dentición de esta especie, caracterizada por Guérin (1983), tiene varios rasgos morfológicos que la separan del material aquí descrito: la superficie oclusal de los molariformes tiene un contorno anguloso, su esmalte es muy rugoso y frecuentemente presenta una abundante cantidad de cemento.

Mucho más parecidas entre sí son las dos especies, antes citadas, del género *Stephanorhinus*, cuya dentición ha sido en ocasiones confundida. Los restos que aquí se estudian tienen una gran semejanza morfológica con los homólogos de *S. hemitoechus* descritos en otros yacimientos y en ellos se identifican ciertos caracteres que, según Guérin (1973, 1980 y 1983) y Fortelius *et al.* (1993) son propios de *S. hemitoechus*; como son

el aspecto ligeramente rugoso del esmalte, la presencia de una lámina delgada de cemento en un diente y la sección en uve del valle lingual posterior de los molares inferiores. En *S. mercki*, este valle generalmente tiene forma de u (Guérin, 1980) y según Fortelius *et al.* (1993), los dientes de esta especie tienen el esmalte pulido, careciendo habitualmente de cemento.

Por otra parte, las dimensiones del rinoceronte de Cueva del Búho son demasiado pequeñas para *S. mercki*. Su tamaño se ajusta a la variabilidad métrica de *S. hemitoechus* y es similar al que presenta esta especie en los yacimientos del Pleistoceno Superior de Cova Negra, Valencia (Pérez Ripoll, 1977); La Carigüela, Granada (Bouchud, 1969; Cerdeño, 1990); Valdegoba, Burgos (Díez *et al.*, 1988) y Lezetxiki, Guipúzcoa (Altuna, 1972). Por el contrario, los restos de Cueva del Búho son más grandes que los homólogos de los yacimientos del Pleistoceno Medio de Pinilla del Valle, Madrid (Alfárez e Iñigo, 1990) y Atapuerca, Burgos (Cerdeño y Sánchez, 1988) (Tabla I).

	P ₂		P ₃		P ₄		M ₁		M ₂	
	L	A	L	A	L	A	L	A	L	A
Cueva del Búho										
TCB-174	-	16,3	-	23	39,6	26,6	44,7	29,2	52,2	29,2
TCB-175			35,6	23,6	39,6	27,3				
TCB-361	29,2	-								
Atapuerca ¹	26,8	16,1	31,2	21,4	33,5	23,7	37,7	25,9	42,8	27,2
Pinilla del Valle	(21,9)	15,5								
Cova Negra ²	28,5	14,2	27,8	23,6	39	21	46	-		
	26,9	16,8			-	28				
La Carigüela ³					39	26			(54,6)	31,5
										32,3
Lezetxiki ⁴			31,2	25	36,6	26,3			53	35
Valdegoba ⁴			(33,5)	22						
<i>S. hemitoechus</i> ⁴										
Mín.	26	14,5	27	21	35	26	36,5	26	41	28
Med.	27,83	18,17	34,36	23,98	38,08	28,31	45,02	30,4	49,18	31,47
Max.	30,5	20,9	40	27	42	30,5	52	35	55	36
<i>S. mercki</i> ⁴										
Mín.	31	20	35	27	38	28,5	43	33	53	32
Med.	32,08	20,86	40	31,19	44,76	33,3	51,18	37,24	56,97	36,61
Max.	34	21,5	46	35,5	51	39,5	59	42	63	40

Tabla I.-Dimensiones comparadas de la dentición de *Stephanorhinus hemitoechus* de Cueva del Búho (Segovia). Referencias: 1, Cerdeño y Sánchez, 1988; 2, Pérez Ripoll, 1977; 3, Cerdeño, 1990; 4, Guérin, 1980. Abreviaturas: L, longitud; A, anchura.

Así pues, por sus características morfológicas y métricas, el rinoceronte de Cueva del Búho debe ser asignado a *Stephanorhinus hemitoechus*.

Teniendo en cuenta la posición cronológica de este yacimiento, que se formó durante la última glaciación, las dimensiones del material estudiado confirman la hipótesis de Cerdeño (1990), quien aprecia una tendencia evolutiva hacia el aumento de talla en *S. hemitoechus*, desde el Pleistoceno Medio al Superior.

La presencia de este rinoceronte entre la asociación de vertebrados fósiles de Cueva del Búho, asocia este yacimiento con un paleoecosistema de pradera o bosque abierto no muy frío (Loose, 1975; Fortelius, 1982).

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Dra. E. Cerdeño la lectura crítica del manuscrito, y al Departamento de Paleontología de la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid las fotografías que se incluyen en esta publicación.

REFERENCIAS

- ALFEREZ, F. e IÑIGO, C. (1990): Los restos de *Dicerorhinus hemitoechus* (*Perissodactyla*, *Mammalia*) del Pleistoceno medio de Pinilla del Valle. *Acta Salmat.*, 68: 25-45.
- ALTUNA, J. (1972): Fauna de mamíferos de los yacimientos prehistóricos de Guipúzcoa, con catálogo de los mamíferos cuaternarios del Cantábrico y Pirineo occidental. *Munibe*, 24: 464 p.
- BOUCHUD, J. (1969): La faune moustérienne de Carigüela. En H. de Lumley (Ed.): Etude de l'outillage de la grotte de Carigüela (Piñar, Grenade). *L'Anthropologie*, 73: 361-364.

CERDEÑO, E. (1990): *Stephanorhinus hemitoechus* (Falc.) (Rhinocerotidae, Mammalia) del Pleistoceno medio y superior de España. *Est. Geol.*, 46: 465-479.

CERDEÑO, E. y SANCHEZ B. (1988): Le rhinocéros du Pleistocène moyen d'Atapuerca (Burgos, Espagne). *Geobios*, 21: 81-99.

DIEZ, C.; JORDA, J.F. y SANCHEZ, B. (1988): La Cueva de Valdegoba (Huérmeces, Burgos): Estratigrafía, industria lítica y fauna. *II Congr. Geol. de Esp. Vol. I*: 379-382.

FORTELIUS, M. (1982): Ecological aspects of dental functional morphology in Plio-Pleistocene rhinoceroses of Europe. En Kurtén, B. (Ed.): *Teeth: form, function and evolution*. Columbia University Press: 163-181.

FORTELIUS, M.; MAZZA, P. y SALA, B. (1993): *Stephanorhinus* (Mammalia: Rhinocerotidae) of the western European Pleistocene, with a revision of *S. etruscus* (Falconer, 1868). *Palaeont. Ital.*, 80: 63-155.

GUERIN, C. (1973): Les trois espèces de rhinocéros (Mammalia, Perissodactyla) du gisement Pléistocène moyen des Abimes de la Fage à Noailles (Corrèze). *Nouv. Arch. Mus. Hist. nat. Lyon*, 11: 55-84.

GUERIN, C. (1980): Les rhinocéros (Mammalia, Perissodactyla) du Miocène terminal au Pléistocène supérieur en Europe occidentale. Comparaison avec les espèces actuelles. *Doc. Lab. Geol. Lyon*, 79: 1182 pp.

GUERIN, C. (1982): Les Rhinocerotidae (Mammalia, Perissodactyla) du Miocène terminal au Pléistocène supérieur d'Europe occidentale comparés aux espèces actuelles: tendances évolutives et relations phylogénétiques. *Geobios*, 15: 599-605.

GUERIN, C. (1983): Le gisement Pléistocène supérieur de la Grotte de Jaurens a Nespouls, Corrèze, France: Les Rhinocerotidae (Mammalia, Perissodactyla). *Nouv. Arch. Mus. Hist. nat. Lyon*, 21: 65-85.

LOOSE, H. (1975): Pleistocene Rhinocerotidae of W Europe with reference to the recent two horned species of Africa and SE Asia. *Scripta Geol.*, 3: 1-59.

MOLERO, G.; IÑIGO, C.; MALDONADO, E.; SANCHEZ, F.L. y DIEZ, A. (1989): El yacimiento del Pleistoceno superior de la Cueva del Búho (Perogordo, Segovia) y su fauna de vertebrados. *Resúmenes V Jornadas de Paleontología, Valencia*: 101-102.

PEREZ-RIPOLL, H. (1977): Los mamíferos del yacimiento musteriense de Cova negra (Játiva, Valencia). *Serv. Invest. Prehist.*, 53: 1-147.

Original recibido: Noviembre de 1994

Original aceptado: Diciembre de 1994

Tangential transpressive strain regime in the Évora-Aracena Domain (Ossa-Morena Zone).

Por A. A. ARAÚJO (*) & A. RIBEIRO (*)

R E S U M E N

El dominio de Évora-Aracena representa la subzona más meridional de la Zona de Ossa-Morena y contacta con la Ofiolita de Beja-Acebuches, que es testigo de una sutura oceánica asociada a la Orogenia Varisca en la Península Ibérica. En este dominio, las fases de deformación más precoces, muestran estructuras típicas de transpresión tangencial. Estas estructuras se consideran el reflejo de un proceso de subducción con convergencia oblicua entre las placas de Armórica y Gondwana durante el cierre del Océano Paleothetys, antes de la obducción de la Ofiolita de Beja-Acebuches.

Palabras clave: Transpresión tangencial, Dominio de Évora-Aracena, Zona de Ossa-Morena, Subducción oblicua.

R E S U M O

O Domínio de Évora-Aracena corresponde à subdivisão da Zona de Ossa-Morena situada mais a Sul, contactando com o Ofiolito de Beja-Acebuches, o qual representa o testemunho de uma sutura oceânica associada à Orogenia Varisca na Península Ibérica. Neste domínio, as fases de deformação mais precoces caracterizam-se por um regime de transpressão tangencial, comprovado por variadas estruturas. Estas estruturas são consideradas o reflexo de um processo de subducção com convergência oblíqua de placas durante o fecho do Oceano Paleothetys, entre as placas Armoricana e Gondwana, antes da obducção do Ofiolito de Beja-Acebuches.

Palavras Chave: Transpressão Tangencial, Domínio de Évora-Aracena, Zona de Ossa Morena, subducção oblíqua.

A B S T R A C T

The Évora-Aracena Domain is the southernmost subzone of the Ossa-Morena Zone, bounded to the South by the Beja-Acebuches ophiolitic sequence which marks the suture of the Variscan Fold Belt in Iberia. The earlier deformation phases in this domain are characterized by a tangential transpressive regime, denoted by several structures. We interpret these structures as reflecting oblique plate convergence and subduction during the closure of the Paleothetys, between the Armorica and Gondwana plates, before obduction of the Beja-Acebuches ophiolite.

Key words: Tangential Transpression, Évora-Aracena Domain, Ossa-Morena Zone, oblique subduction.

INTRODUCTION

The Ossa-Morena Zone (O.M.Z.) is part of the Iberian Terrane (fig. 1), bounded to the North by the Centro-Iberian Zone and to the South by the Southern Ophiolite Terrane and associated oceanic sequences (RIBEIRO et al., 1988). The Northern margin of this zone corresponds to a deep

flower structure affecting the Precambrian basement along the Córdoba-Badajoz-Tomar left-lateral shear zone. The Southern boundary marks the suture of the Variscan Fold Belt in Iberia along which the Beja-Acebuches ophiolitic sequence is preserved (MUNHA et al., 1986; FONSECA, 1989; CRESPO-BLANC, 1989).

Within the O.M.Z. we can recognize several domains with different paleogeographic, metamorphic, magmatic and tectonic features (CHA-

(*) Department of Geology, Univ. Lisbon (Portugal)

CON et al., 1983). The Évora-Aracena Domain (E.A.D.), in the Southern branch of the flower structure, lined by the Córdoba-Badajoz-Tomar shear zone, is the southernmost subzone of the O.M.Z. (fig. 1).

MACROSCOPIC FEATURES OF THE ÉVORA-ARACENA DOMAIN

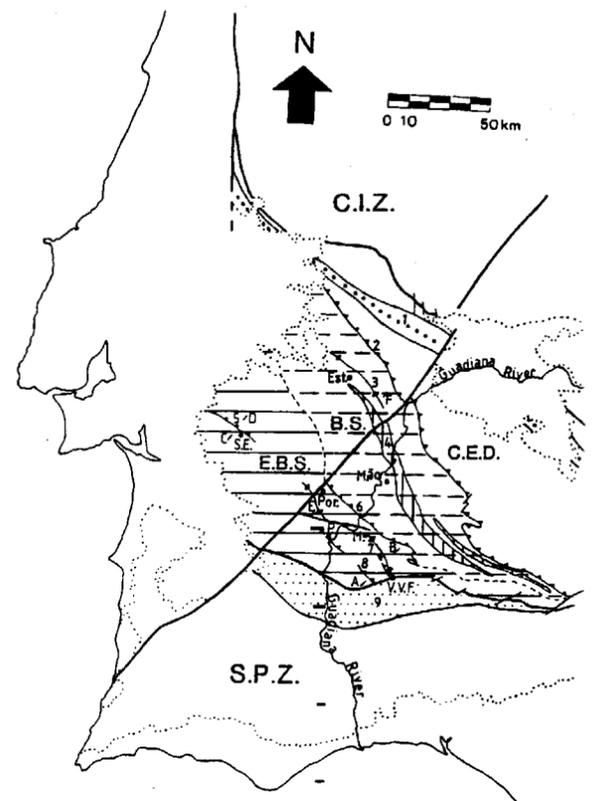
The E.A.D., bounded to the North by the Juromenha overthrust (fig. 1), corresponds to a deep thrust belt vergent to the W or SW with the Precambrian basement reactivated during the Variscan Orogeny (RIBEIRO et al., 1988). Recent field work in several sectors of this domain provides new information about the tectonic style of the Variscan events:

-In the Vila Verde de Ficalho region (fig. 1) it is possible to recognise a folded nappe (fig. 2) with nearly 10 km. of overturned limb (OLIVEIRA, 1988);

-In the Santiago do Escoural region (fig. 1), detailed structural mapping has also denoted a nappe (fig. 3) involving Precambrian basement which overthrust Cambrian sequences (SILVA & ARAÚJO, 1986, SILVA & ARAÚJO in prep.);

-In the Gadiana Valley, near Pedrógão village (fig. 1), recent field work evidenced important shear zones, with mylonites and plastic deformation in feldspars. These structures, affecting volcano-sedimentary sequences (Cambrian-Ordovician?), are probably the continuation towards the NW of the Ficalho overthrust (see fig. 1).

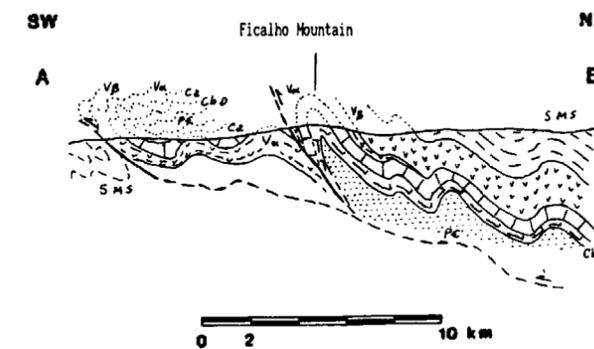
-Between Moura and Mourão (fig. 1), a geotransverse along the Gadiana Valley was object of detailed structural mapping (ARAÚJO, 1989). This work enabled characterization of the boundary between the Évora-Beja subdomain and the Barrancos subdomain. This boundary is a main accident, the Santo Aleixo overthrust (fig. 4), separating sequences with very different paleogeographic features (ARAÚJO, 1986, 1987, 1989; ARAÚJO & RIBEIRO, 1990). The sequence in the core of the Estremoz anticline (fig. 1) presents affinities with the Évora-Beja subdomain. This structure may correspond to a tectonic window (fig. 4) of the same major overthrust (ARAÚJO, 1987, 1989; SILVA et al., 1990).



- 1- Córdoba-Badajoz-Tomar shear zone;
- 2- Juromenha overthrust;
- 3- Estremoz Antiform;
- 4- Terena flysch;
- 5- Santiago do Escoural overthrust;
- 6- Santo Aleixo overthrust;
- 7- Moura-Ficalho antiform;
- 8- Ficalho overthrust;
- 9- Beja-Acebuches ophiolite and oceanic related sequence (Pulo do Lobo).

C.I.Z. - Centro-Iberian Zone;
S.P.Z. - South Portuguese Zone;
C.E.D. - Córdoba-Elvas Domain;
B.S. - Barrancos Subdomain;
E.B.S. - Évora-Beja Subdomain; } Évora-Aracena Domain
Est. - Estremoz;
S.E. - Santiago do Escoural;
M.ão - Mourão;
Por. - Portel;
P. - Pedrógão;
M. - Moura;
V.V.F. - Vila Verde de Ficalho.

Fig. 1.-Location of the main structures in the Évora-Aracena Domain.



SMS - Silurian (Moura Schists);

Vβ - Mafic metavolcanic rocks;
Vα - Felsic metavolcanic rocks;
Ca - Carbonate sediments; } Cambrian-Ordovician?

CbD - Lower Cambrian (Dolomites);

PE - Upper Precambrian (Série Negra).

Fig. 2.-Cross section A-B. The Ficalho structure (adapted from the Geological Map of Portugal, scale 1/200000, n. 8)

The geophysical data concerning the deep structure of the O.M.Z., aeromagnetic survey (MIRANDA et al., 1988) and deep seismic profiles (BAPTISTA & CONTREIRAS, 1984) are consistent with the geological remarks and denote a large tangential tectonic regime. Thus, according to these data, the O.M.Z. is probably a thin imbricate thrust belt on top of the South Portuguese Zone with decollement above an undeformed basement (SILVA in press; RIBEIRO et al., 1988; ARAÚJO, 1989; SILVA et al., 1990).

DESCRIPTION OF DEFORMATION EVENTS

Along the geotransverse between Moura and Mourão, the structural level becomes shallower from the SW to the NE. The upper structural level is represented by the Upper Devonian Terena Flysch (fig. 1), which is separated from the Upper Precambrian-Lower Devonian sequences by a major unconformity.

In the Évora-Beja subdomain (lower structural level) 3 ductile deformation phases are present:

-The first and second events, nearly homoaxial can be considered as two pulses of the same major progressive deformation phase, during the Givetian (RIBEIRO, 1983; CHACON et al., 1983). These are responsible for the Terena Flysch basal unconformity.

-The third event, of pre-upper Westphalian age (CHACON et al., 1983), shows a crenulation cleavage in the Lower Paleozoic and Precambrian sequences and a slaty cleavage in the Terena Flysch.

D1 Event:

D1 corresponds to a recumbent folding and thrusting event, trending NNW-SSE, with W or SW vergence. The S1 cleavage is a slaty cleavage and often transposes the bedding. This deformation phase is responsible for the main thrusts already described and shows evidence of important sinistral wrench-shear associated with the regional flattening (see below).

D2 Event:

This deformation phase, near coaxial with the D1 event and also with vergence towards the SW, can be considered as a later pulse of the same first tectonic phase. In the Évora-Beja subdomain the D2 structures are sometimes very important and commonly render the earlier structures almost indistinguishable. In this region the maximum stretch tends to be progressively transverse to the structures and the sinistral wrench-shear component decreases in intensity. Towards the NE, the structural level becomes shallower, the D2 structures becomes disharmonic and this event disappears in the Barrancos subdomain.

D3 Event:

The D3 event corresponds to NW-SE folding with very steep crenulation cleavage associated, and is more brittle than the preceding ones. The S3 cleavage is frequently not axial-planar to the folds, denoting a transectional regime also related with a leftlateral shear, concomitant with the regional flattening.

KINEMATIC ANALYSIS OF EARLIER EVENTS

The sinistral wrench-shear related with the first event becomes evident by en-échelon patterns

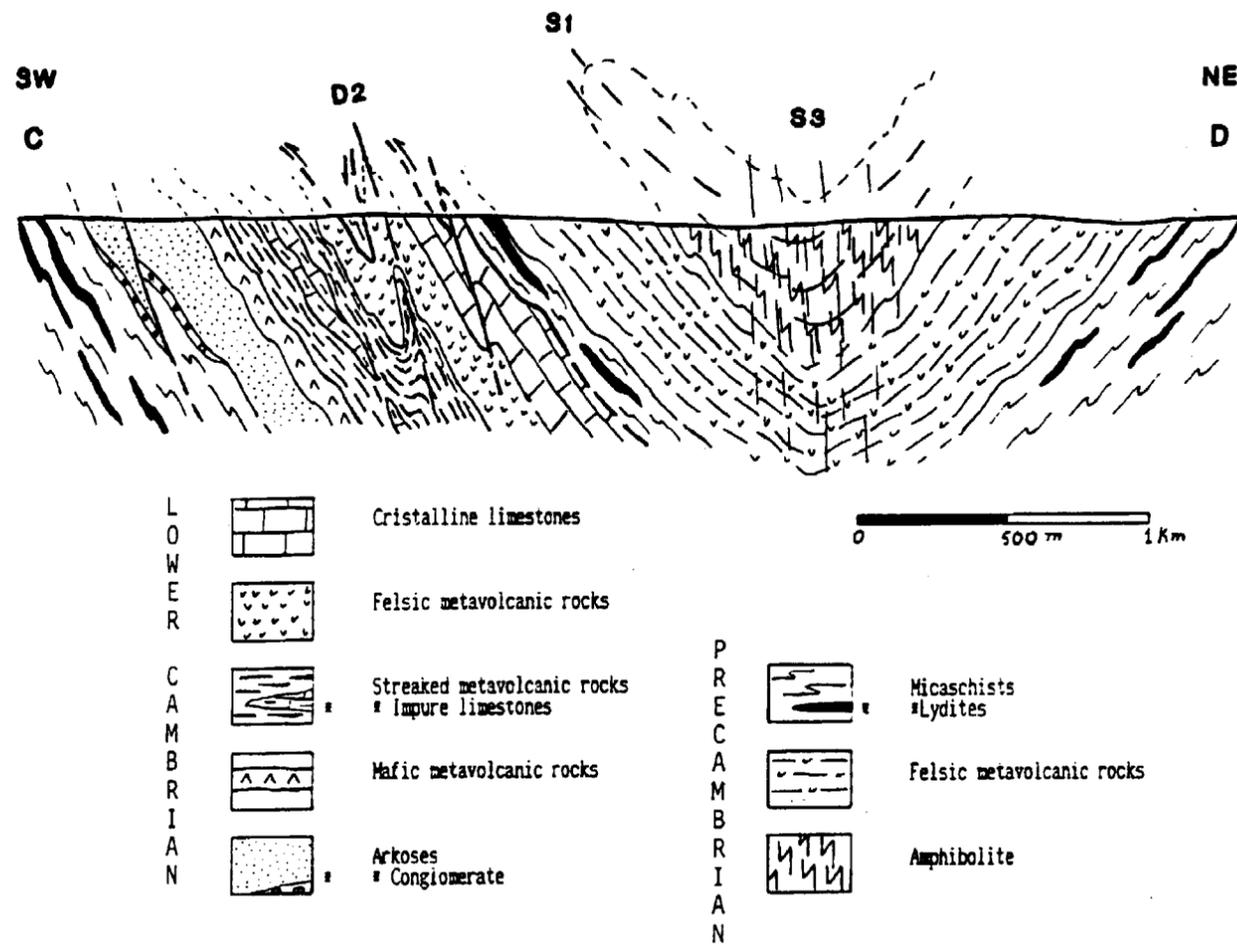


Fig. 3.-Cross section C-D. Structure of the Santiago do Escoural region (adapted from SILVA & ARAÚJO, 1986).

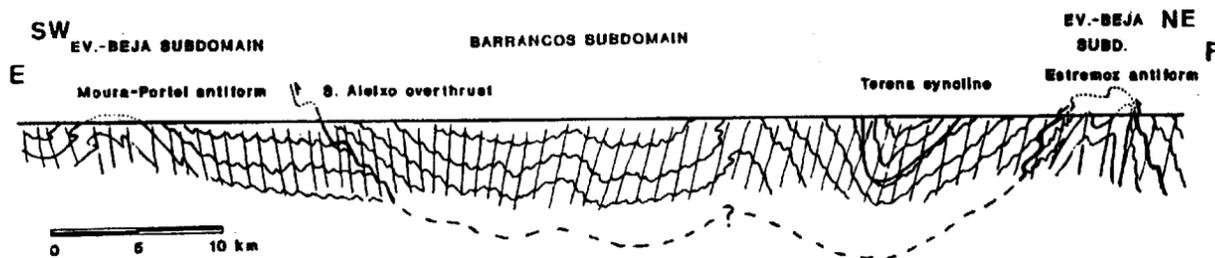


Fig. 4.-Schematic cross section (E-F) in the Évora-Aracena Domain (adapted from ARAÚJO, 1989).

of folds, rotated boudins, several shear criteria in thin section and by the orientation of stretching

lineations, oblique or sometimes nearly parallel to the fold axes and orogen length. These data

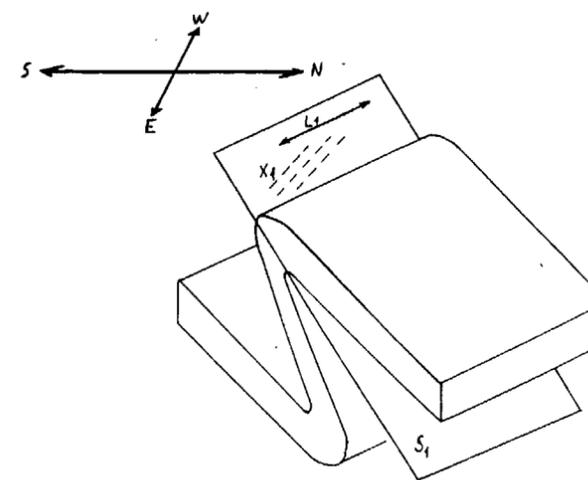


Fig. 5.-Common angular relationship between the D1 stretching (X1) and intersection (L1) lineations. The top-to-the-NW shearing, parallel to the stretching lineation denotes combined sinistral wrenching and thrusting along the S1 cleavage plane.

show a sense of shear top-to-the-NW and denote a combined sinistral wrenching and thrusting along the S1 cleavage planes (fig. 5).

This oblique tectonics is also present in some D2 structures (later pulses in the Santiago do Escoural thrust, shear zones in the Pedrógão region) but the thrusting shear component becomes progressively more important.

Near the thrust zones, the D1 stretching lineation, regionally subparallel to the orogen length, become gradually transverse. This variation in the stretching lineations within the same foliation plane, is well-expressed near the Santo Aleixo overthrust (fig. 6), and is also present associated with other thrusts mapped in the Pedrógão region and between Moura and Mourão.

These earlier structures have been interpreted as resulting from a process of tangential transpressive strain, dominated by extension parallel to the orogen length, combined with the regional flattening. Within the less deformed sectors, the orogen-parallel extension becomes the main feature of the tectonic regime. Near the main shear zones the rotation of stretching lineations

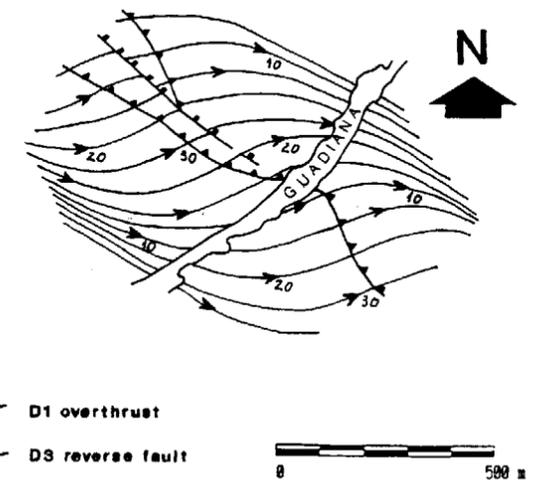


Fig. 6.-Schematic rotation of stretching lineation near the Santo Aleixo overthrust in the Guadiana Valley.

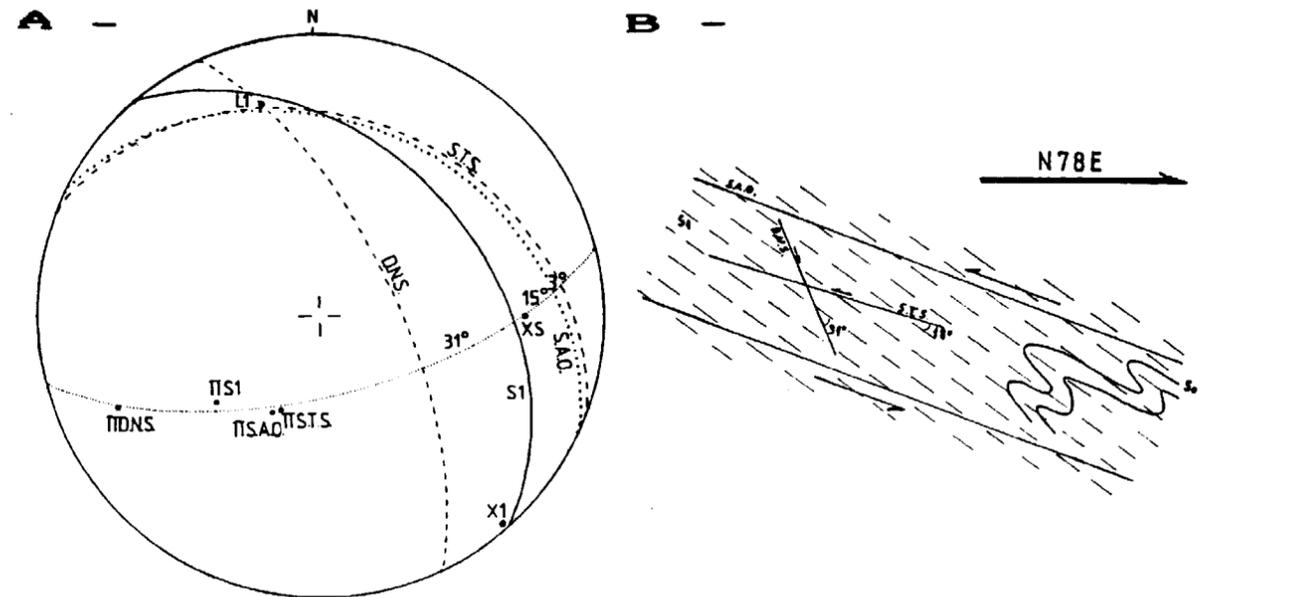
results from the combination of this regime with thrusting and isostatic emergence, normal to the orogen.

This tangential transpressive regime is denoted by the angular relationships between several D1 structures near the Santo Aleixo overthrust (see fig. 7).

REGIONAL INTERPRETATION

The earlier orogen-parallel extension and the tangential transpressive strain can reflect a oblique plate convergence and subduction (ELLIS, 1986; ELLIS & WATKINSON, 1987) during the closure of the Paleothetys between the Armorica and Gondwana plates before the obduction of the Beja-Acebuches ophiolite. The macroscopic structure of the O.M.Z. -the Córdoba-Badajoz-Tomar left-lateral shear zone, the related flower structure and the thin skinned structure in the southern branch- are developed during this deformation phase.

The D2 structures, present only in the South sector of the E.A.D. (hanging wall, near the suture zone), become progressively more disharmonic and the stretching lineations rotate from oblique



S1 - Middle s1 cleavage of all studied area (n= 940)
N40W;40NE
SAO - Santo Aleixo overthrust (n= 14) - N64W;32NE
STS - Sinistral thrust shear zones (n= 24) - N68W;30NE
DNS - Dextral normal shear zones (n= 12) - N24W;68NE
A-C plane - N78E;66SE

L1 - Middle intersection lineation of all studied area
(n=233) - 24;346
XS - Stretching lineation near the main shear zone (n= 82)
- 28;91
X1 - Stretching lineation in a less deformed sector (n= 61)
- 2;140

Fig. 7.- A- Equal-area stereogram of the maximal frequencies of D1 structures near the Santo Aleixo overthrust;
B- A-C plane schematic representation. The angles between the shear planes and the S1 cleavage denote a strong transpressive regime.

to perpendicular to the D1 axes. This D2 event can reflect the crustal flattening and isostatic emergence normal to orogen length (ELLIS & WATKINSON, 1987).

The left-lateral shear denoted by the D3 transected folds is probably related with the increase of the curvature in the Iberian-arc.

REFERENCES

ARAÚJO, A (1986): Relação tectonoestratigráfica entre as subzonas de Estremoz-Barrancos e do maciço de Évora-Beja numa geotransversal ao longo do Rio Guadiana. Abstract. *Maleo, Bol. Inf. Soc. Geol. Portugal*, vol. 2, n. 13, pp. 9.

ARAÚJO, A. (1987): A geotransverse between Moura and Mourão (Ossa-Morena Zone). Abstract. *Conference on Deformation and Plate Tectonics*, Gijón, Spain, 1987, pp 70.

ARAÚJO, A. (1989): Estrutura de uma Geotransversal no Rio Guadiana entre Moura e Mourão. Master Thesis. *Depart. Geol. Fac. Cienc. Univ. Lisboa*, 92 pp.

ARAÚJO, A. & RIBEIRO, A. (1990): Oblique Tectonics in the Évora-Aracena Subzone (Ossa-Morena Zone - South Portugal). Abstract. *Terranes in the Circum-Atlantic Paleozoic Orogens. International Conference on Paleozoic Orogens in Central Europe*, Göttingen-Giessen Aug.-Sept. 1990, 4 pp.

BAPTISTA, M. V. & CONTREIRAS, M. M. (1984): Novos métodos de processamento de sinais sísmicos - aplicação à campanha de Alqueva. *Graduation Thesis. Depart. Fis. Fac. Cienc. Univ. Lisboa*, 75 pp.

CHACON, J.; OLIVEIRA, V.; RIBEIRO, A. & OLIVEIRA, J. T. (1983): La estructura de la Zona de Ossa-Morena. *Libro Jubilar J. M. Rios, Geología de España*, tomo 1, pp. 490-504.

CRESPO-BLANC, A. (1989): Evolución geotectónica del contacto entre la Zona de Ossa-Morena y la Zona Surportuguesa en las Sierras de Aracena y Aroche (Macizo Ibérico Meridional): un contacto mayor en la cadena hercínica europea. Ph. D. Thesis. *Depart. Geología y minería - Univ. Sevilla*, 550 pp.

ELLIS, M. (1986): Structural morphology and associated strain in the Central Cordillera (British Columbia and Washington): Evidence of oblique tectonics. *Geology*, V. 14, pp. 647-650.

ELLIS, M.; WATKINSON, A. (1987): Orogen-parallel extension and oblique tectonics: The relation between stretching lineations and relative plate motions. *Geology*, V. 15, pp. 1022-1026.

FONSECA, P. (1989): Estudo de um Segmento da Sutura da Cadeia Varisca Ibérica: Serpa-Pulo do Lobo. Master Thesis *Depart. Geol. Fac. Cienc. Univ. Lisboa*, 93 pp.

FONSECA, P. & RIBEIRO, A. (1990): The Tectonics of Beja-Acebuches Ophiolite: a major suture in the Iberian Variscan Fold Belt. Abstract. *Terranes in the Circum-Atlantic Paleozoic Orogens in Central Europe*, Göttingen-Giessen Aug.-Sept. 1990, 4 pp.

MIRANDA, J. M.; GALDEANO, A.; ROSSIGNOL, J. C. & MENDES-VICTOR, L. A. (1988): The Aeromagnetic Survey of Portugal (1980.0) and some tectonic implications. *Fifth E.G.T. Workshop: The Iberian Peninsula*, Estoril, 11-12 Nov. 1988. *European Science Foundation*, pp. 123-130.

MUNHA, J.; OLIVEIRA, J. T.; RIBEIRO, A.; OLIVEIRA, V.; QUESADA, C.; KERRICH, R. (1986): Beja-Acebuches Ophiolite characterization and geodynamic significance. Abstract. *Terranes in the Circum-Atlantic Paleozoic Orogens in Central Europe*, Göttingen-Giessen Aug.-Sept. 1990, 4 pp.

tract. *Maleo, Bol. Inf. Soc. Geol. Portugal*, vol. 2, n. 13, pp. 31.

OLIVEIRA, J. T., coord. (1988): *Carta Geológica de Portugal*, escala 1/200000, folha 8. *Serv. Geol. Portugal*.

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

RIBEIRO, A.; SILVA, J.B.; DIAS, R.; ARAÚJO, A.; MARQUES, F.; MERINO, H.; FONSECA, P. (1988): Geodynamics and deep structure of the Variscan fold belt in Iberia. *Fifth E.G.T. Workshop: The Iberian Peninsula*, Estoril, 11-12 Nov. 1988. *European Science Foundation*, pp. 57-64.

SANDERSON, D. J. & MARCHINI, W.R.D. (1984): Transpression. *Journal of Structural Geology*, vol. 6, n. 5 p.p. 449-458.

SILVA, J. B. (in press): In Dallmeyer & Lecorche, eds.: *The West African Orogens and Circum Atlantic correlatives* (Springer Verlag).

SILVA, J. B. & ARAÚJO, A. (1986): Relatório sumário da Cartografia Geológica de uma área a Leste de Santiago do Escoural (Montemor-o-Novo). *Progress Report. Depart. Geol. Fac. Cienc. Univ. Lisboa*, 7 pp.

SILVA, J. B. & ARAÚJO, A. (in prep.): *The Santiago do Escoural structure (Ossa-Morena Zone, Portugal)*.

SILVA, J. B.; OLIVEIRA, J. T.; RIBEIRO, A.; PIÇARRA, J. M. & ARAÚJO, A. (1990): Thrust Tectonics in Ossa Morena Zone (South Portugal). Abstract. *Terranes in the Circum-Atlantic Paleozoic Orogens. International Conference on Paleozoic Orogens in Central Europe*, Göttingen-Giessen Aug.-Sept. 1990, 4 pp.

Original recibido: Enero de 1994.

Original aceptado: Junio de 1995.

GEOLOGIA

La fracción carbonatada en los sedimentos recientes de la plataforma continental entre el Guadalquivir y el Cabo de Trafalgar.

Por L. GAGO-DUPORT (*); J. M. GUTIERREZ MAS (*); J.M. PARRADO-ROMAN (*);
A. SANTOS (*), A. LOPEZ GALINDO (**) y F. LOPEZ-AGUAYO (*)

RESUMEN

Los sedimentos de la plataforma continental entre la desembocadura del río Guadalquivir y el cabo de Trafalgar, a pesar de su carácter siliciclástico, presentan un contenido medio de carbonatos del 25% con máximos del 56% en la plataforma externa y al N de Cádiz. Su origen es fundamentalmente biogénico, al estar constituidos por restos esqueléticos de organismos (bioclastos), habiéndose detectado la presencia de foraminíferos (bentónicos y planctónicos), moluscos (bivalvos y gasterópodos), briozoos, equinodermos, espículas de esponjas y ostrácodos, entre otros.

El principal mineral carbonatado es la calcita con contenidos del 25%, presentándose como el segundo componente mayoritario de los sedimentos, formando parte de todas las fracciones granulométricas. La existencia de calcita magnesiana se ha determinado por la presencia de Mg^{2+} en la red de la calcita, así como por las variaciones de concentración de este elemento en función de la distancia a la costa. Otros minerales presentes son la dolomita y el aragonito, ambos con contenidos muy bajos y con distribución heterogénea.

Palabras clave: Carbonatos, Bioclastos, Calcita, Plataforma continental. Golfo de Cádiz.

ABSTRACT

The sediments of the continental shelf between the mouth of the Guadalquivir river and the cape of Trafalgar, in spite of their siliciclastic character, they show an average content of carbonates of the 25% with maximum of 56% in the external shelf and to the N of Cádiz. Their origin is fundamentally biogenic, upon being constituted by skeletal remains of organisms (bioclasts), having been detected the presence of foraminifera (benthics and planktonic), molluscs, bryozoans, equinoderms, spicules of sponges, ostracods and another.

The main carbonate mineral is the calcite with containing of 25%, and it is the component majority second of the sediments, forming part of all the granulometrics fractions. The existence of Mg^{2+} has been determined for the presence of Mg^{2+} in the lattice of the calcite, as well as the variations of concentration of this element in function of the distance to the coast. Other present minerals are dolomite and aragonite, both with containing very low and heterogeneous distribution.

Key words: Carbonates, Bioclasts, Continental shelf, Gulf of Cádiz.

(*) Cristalografía y Mineralogía, Estratigrafía, Geodinámica, Petrología y Geoquímica, Facultad de Ciencias del Mar. Apdo. 40, Univ. de Cádiz, C.P. 11510, Puerto Real, Cádiz.

(**) Depart. Mineralogía y Petrología e IAGM, CSIC-Univ. Granada, Avda. Fuentenueva s/n, Granada.

1. INTRODUCCION

En las plataformas continentales de las zonas templadas, los componentes carbonatados están más extendidos de lo que a veces se cree, siendo en general de origen biogénico (LEEDER, 1982). En este trabajo se aborda el estudio preliminar de la fracción carbonatada en los sedimentos superficiales no consolidados de la plataforma continental del Golfo de Cádiz, entre la desembocadura del río Guadalquivir y el Cabo de Trafalgar (Figura 1), con el fin de conocer su naturaleza mineralógica y las relaciones con otros componentes detríticos y bioclásticos de los sedimentos. Estos, a pesar de su carácter siliciclástico, presentan un contenido medio en carbonatos del 25% (GUTIERREZ MAS, 1992).

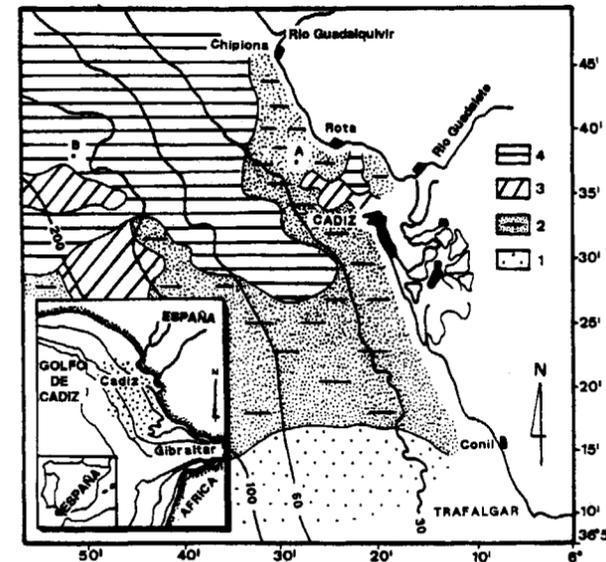


Figura 1.-Situación geográfica de la zona de estudio y mapa de distribución granulométrica 1: Arena; 2: Arena-fangosa; 3: Arena-limosa; 4: Arcilla limosa. A: muestra interna; B: muestra externa.

En este sector, la costa se orienta de NNO a SSE con escalonamientos E-O (Figura 1), la plataforma es relativamente extensa con una anchura media de 50 km., pendiente suave y borde entre 150 y 200 m. de profundidad. El sistema hidrodinámico está controlado por la corriente de Agua Superficial Atlántica (NASW) que se dirige hacia el SE, no apreciándose la acción del Flujo Medi-

terráneo (MOW) por discurrir a mayor profundidad (BRAY, 1986; SHULL and BRAY, 1989).

Desde el punto de vista granulométrico, se diferencian básicamente dos sectores: al S del paralelo de Cádiz predominan arenas cuarcíferas bioclásticas con un tamaño de grano de medio a fino; al N y NO, en relación con la desembocadura del río Guadalquivir, predominan fangos-arcillosos, con un contenido en arena inferior al 2% (GUTIERREZ MAS, 1992), (Figura 1).

2. METODOLOGIA

El estudio se ha llevado a cabo a partir del análisis granulométrico, mineralógico y geoquímico de 100 muestras de sedimentos extraídas con tomastigios de la plataforma continental próxima a Cádiz. El contenido mineralógico se ha basado en el análisis cuantitativo de patrones de difracción de Rayos X. Un estudio cuantitativo particularizado se ha llevado a cabo con dos muestras, una interna y otra externa, (Figura 1), mediante el método de ajuste del perfil completo del patrón de difracción (WPFM), (RODRIGUEZ-CARVAJAL, et al. (1987). Las variables estructurales empleadas en el ajuste fueron: el grupo espacial y los parámetros de celdilla de la fase identificada. La determinación de carbonatos se realizó mediante valoración ácido-base, y la naturaleza del contenido bioclástico mediante observación y conteo de granos con lupa binocular, en cada intervalo de tamaño de la fracción.

El tratamiento de los datos se ha realizado mediante métodos estadísticos de Análisis Multivariante, a fin de establecer las relaciones entre los componentes y parámetros medidos en el sedimento, habiéndose empleado el método de Imbrie (IMBRIE, 1963; JORESKOG et al., 1976).

RESULTADOS Y DISCUSION

3.1. Contenido y distribución de carbonatos.

En la zona de estudio, los carbonatos presentan contenidos medios del 25%, y distribución bastante homogénea en las zonas propiamente de plataforma, con valores entre el 20 y el 30% (Figura 2). Los contenidos máximos (56%) se pre-

sentan en zonas de plataforma externa y cerca de la desembocadura del río Guadalquivir. El carbonato cálcico es el componente principal al formar la mayor parte de los elementos esqueleticos de organismos marinos que constituyen el sedimento.

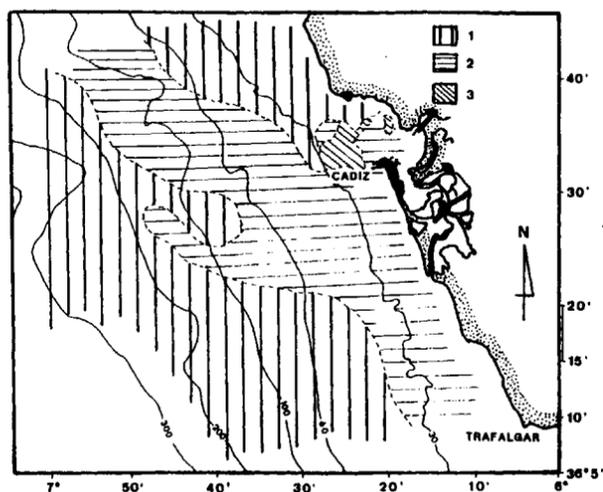


Figura 2.-Mapa de distribución del contenido en carbonatos. 1: >30%; 2: 30-20%; 3: <20%.

Fracción bioclástica: El contenido en bioclastos está relacionado con la tasa de crecimiento de organismos en el medio, condiciones oceanográficas y aportes terrígenos así mismo su variedad influye en la heterogeneidad geoquímica y mineralógica de los sedimentos (MORSE and MACKENZIE, 1990).

En la zona de estudio, el contenido medio de bioclastos en la fracción arena es del 10%, con máximos del 30% (Figura 3) y constituyen la parte fundamental de los carbonatos con los que presentan buena correlación (0.84). Se han detectado restos de los siguientes organismos: foraminíferos (bentónicos y planctónicos), moluscos (bivalvos y gasterópodos), briozoos, equinodermos, espículas de esponjas y ostrácodos, entre otros.

Moluscos: Las conchas están constituidas por capas aragoníticas y calcíticas, con predominio de las primeras (LEEDER, 1982), pero al ser el

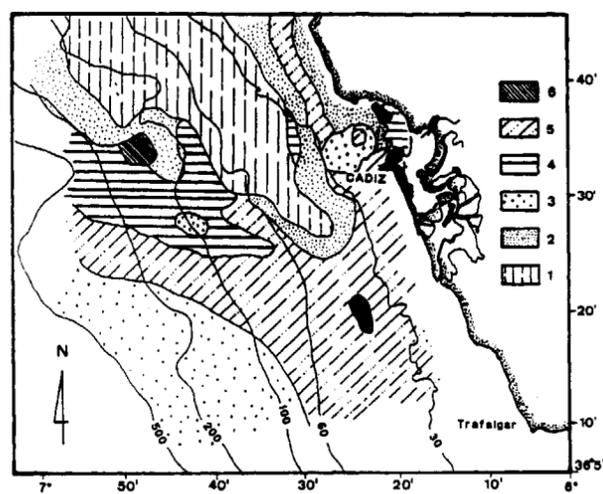


Figura 3.-Mapa de distribución del contenido total de componentes bioclásticos de la fracción arena de los sedimentos. 1: <1%; 2: 1-5%; 3: 5-10%; 4: 10-15%; 5: 15-20%; 6: >20%.

primero inestable, fácilmente se transforma en calcita. Presentan contenidos medios del 4.5% y son los componentes mayoritarios de la fracción bioclástica, formando parte importante de la arena y la grava, reduciéndose su contenido a medida que disminuye el tamaño de grano, siendo sustituidos por el cuarzo (Figura 4).

Foraminíferos: Los caparazones son de calcita y presentan buen estado de conservación, sin procesos de recristalización y cámaras huecas, a veces rellenas de glauconita. Aparecen con mayor frecuencia en la fracción de tamaño 2-1 Phi (arena media), disminuyendo su presencia en los tamaños más finos y desapareciendo en los gruesos (Figura 4). La distribución de especies bentónicas y planctónicas muestra el predominio de las primeras en la plataforma, excepto en zonas distales donde se igualan. Presentan correlación con la profundidad y la glauconita.

Ostrácodos: Tienen conchas calcíticas y aparecen en cantidades pequeñas, inferiores al 1.5%. Correlacionan bien con la arena y el cuarzo, viéndose su existencia favorecida por la presencia de fondos de arena fangosa y limo. Se presentan exclusivamente en los tamaños "arena media" y "fina" (3/1 Phi) (Figura 4).

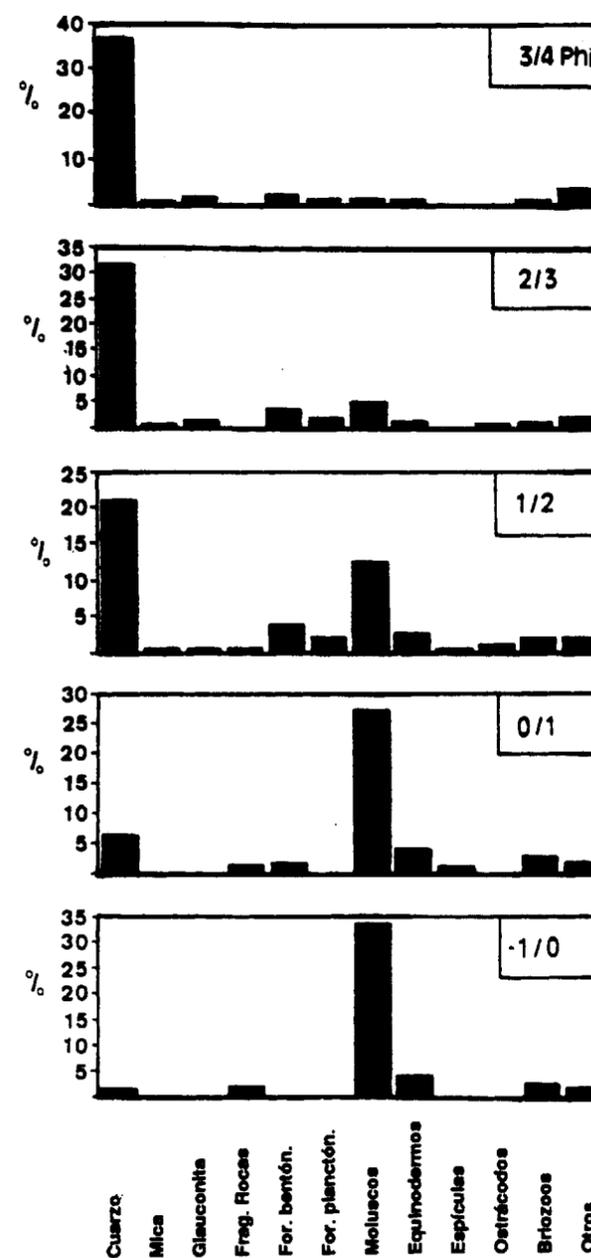


Figura 4.-Variación de los contenidos medios de los componentes, detríticos y bioclásticos, en los intervalos de tamaño de la fracción arena (en escala Phi).

Briozoos: Presentan esqueletos aragoníticos o calcíticos con alto contenido en magnesio. Aparecen predominantemente en zonas de moderada a baja profundidad y su contenido oscila entre el 0.5 y 3%. Se presentan en casi todos los

tamaños de la fracción arena, excepto en "arena muy fina" (Figura 4).

Equinodermos: Se observan como placas calcíticas de aspecto blanquecino y esponjoso, en las que se aprecian los lugares de inserción de las espículas, en contenidos que oscilan entre el 0.5 y el 2.5% (Figura 4).

3.2. Naturaleza mineralógica.

El carbonato cálcico se presenta en los sedimentos como un mineral polimorfo: "calcita" y "aragonito". Ambos pueden formarse como secreciones en las partes duras de los organismos marinos, predominando la calcita en los carbonatos de aguas someras de las zonas templadas, mientras que el aragonito lo hace en las zonas tropicales y subtropicales (LEEDER, 1982).

En la zona de estudio, el mineral más abundante es la calcita, con contenidos medios del 25%, referido al total del sedimento. Presenta distribución homogénea (Figura 5A), apareciendo los valores más altos (35%) en la plataforma externa, entre 80 y 200 m. de profundidad y en áreas cercanas al litoral. Su origen y distribución está relacionado con la presencia y distribución de exoesqueletos de organismos que constituyen la fracción bioclástica (moluscos, foraminíferos, briozoos y equinodermos, etc.).

El otro polimorfo, el aragonito, aparece con contenidos muy bajos y distribución heterogénea (Figura 5C). Muestra correlación con la calcita (0.5) y con la fracción grava (0.4). La primera puede ser expresión de la transformación del aragonito a calcita, ya que, aunque el primero es con frecuencia el producto de precipitación inicial, su carácter inestable facilita su transformación a calcita o su disolución. La segunda expresa la presencia de bioclastos de naturaleza aragonítica en las fracciones de tamaño más gruesas del sedimento, debido a la presencia de moluscos de mayor tamaño incorporados recientemente al sedimento aún poco fragmentados.

La dolomita, se presenta con contenidos medios inferiores al 5%, apareciendo los valores máximos (15%) en puntos de la plataforma externa. (Figura 5B).

Debido a la similitud de cargas y radio iónico entre los cationes de Ca^{+2} y Mg^{+2} y por las caracte-

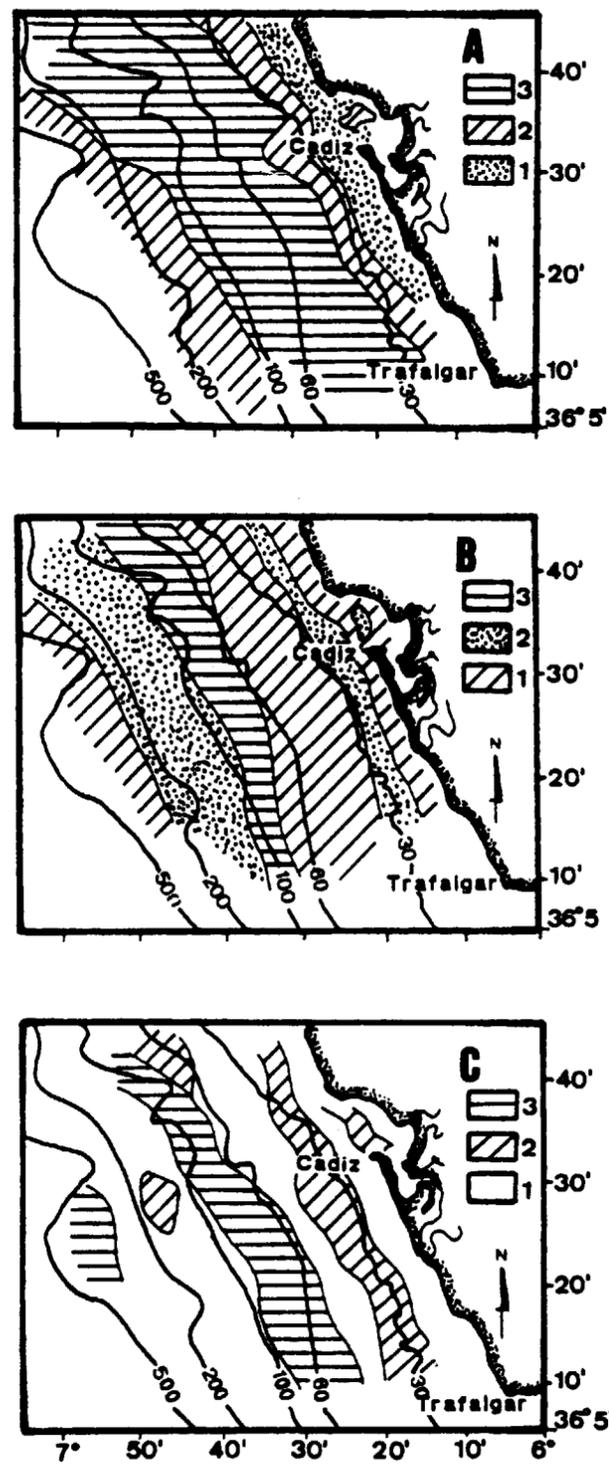


Figura 5.-Mapa de distribución de los minerales carbonatados: A) CALCITA. 1: 15-20%; 2: 20-30%; 3: >30%. B) Dolomita. 1: <5%; 2: 5-10%; 3: >10%; C) Aragonito. 1: <0.5%; 2: 0.5-1%; 3: >1%.

rísticas de la red cristalina de la calcita, el Mg^{+2} puede sustituir al Ca^{+2} en ésta. La introducción del ión Mg^{+2} en la red de la calcita, provoca su dilatación y ésta puede medirse en función de la relación entre los ejes cristalográficos a y c para cada valor del contenido en magnesio (GOLDSMITH et al., 1958; GOLDSMITH, 1959 y BISCHOFF, 1968).

La aplicación del Método de ajuste del patrón de difracción a las fases minerales mayoritarias de dos muestras de sedimento (una interna y otra externa) ha permitido obtener la evolución de

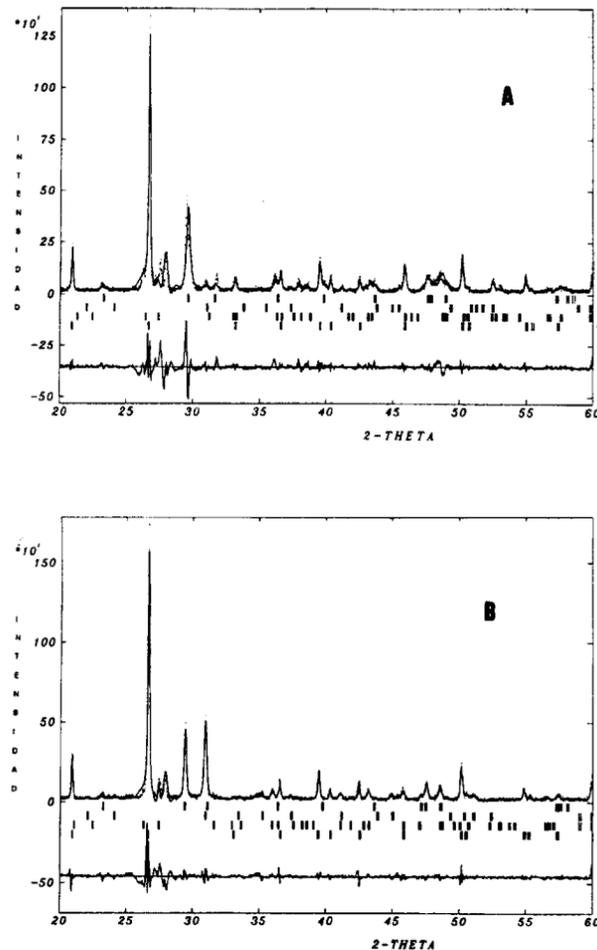


Figura 6.-Ajuste por un modelo de cuatro fases del perfil completo del patrón de difracción. Los puntos son datos experimentales, la línea continua el modelo de ajuste. Las barras verticales (1, 2, 3 y 4) corresponden a los ángulos de difracción de calcita, dolomita, aragonito y cuarzo respectivamente. A: muestra interna y B: muestra externa.

los parámetros de red. Los ajustes se muestran en las Figuras 6A y 6B y la evolución de los parámetros de celdilla en la Tabla I.

Muestra interna (A)		
Parámetro	a	c
Calcita	4.936	16.958
Dolomita	4.813	15.907
Muestra externa (B)		
Parámetro	a	c
Calcita	4.933	17.26
Dolomita	4.802	14.09

Tabla I.-Parámetros de red correspondientes a la calcita y dolomita en la muestra interna y externa.

Los valores obtenidos para las muestras interna y externa se representan en el Gráfico de Goldsmith, en el que el porcentaje en peso de Mg^{2+} en la red de la calcita se hace depender de la relación axial c/a. Los resultados indican un incremento en el contenido en Mg^{2+} en la red de la calcita desde la zona proximal a la distal de 4.1 a 31.2% respectivamente, (Figura 7).

3.3. Análisis estadístico

Los resultados del Análisis Factorial Multivariante aplicado a datos granulométricos y mineralógicos proporcionan tres factores: el factor 1 (72%) asocia arena, cuarzo y calcita; el factor 2 (23%), arcilla, filosilicatos, limo, calcita y cuarzo y el factor 3 (2%), grava, cuarzo y calcita. Estos resultados muestran la relación de la calcita con todas las fracciones granulométricas, como un elemento constante en el medio sedimentario, propio de su origen clástico.

La inclusión de los componentes bioclásticos en el análisis estadístico, ha proporcionado cuatro factores: el factor 1 asocia componentes terrígenos (cuarzo, mica y minerales pesados) con bioclastos que correlacionan negativamente con la profundidad (moluscos, briozoos, equinodermos y ostrácodos) propios de medios de aguas

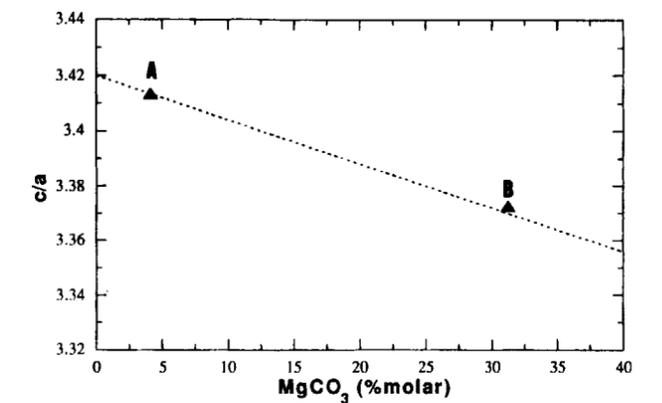


Figura 7.-Variación del contenido en Mg^{2+} en la red de la calcita, según la curva de Goldsmith, en función de la relación axial c/a. A.-Muestra interna; B.-muestra externa.

someras más energéticas, afectados por un mayor grado de transporte y fragmentación; el factor 2 asocia bioclastos que correlacionan con la profundidad (foraminíferos bentónicos y planctónicos) y con la glauconita, propios de zonas distales más profundas, que han sufrido menos transporte; el factor 3 (8%) asocia: espículas y ostrácodos, y el factor 4 (6%): fragmentos de roca, moluscos y grava, e indica la naturaleza tanto siliciclástica como carbonatada de esta fracción

4. CONCLUSIONES

1) Los carbonatos de los sedimentos recientes de la plataforma continental cercana a Cádiz se presentan con contenidos medios del 25% y distribución homogénea, con máximos del 56% en zonas distales de la plataforma.

2) La fracción carbonatada está formada fundamentalmente por calcita, que constituye el 25% del total del sedimento. Este hecho se justifica por la mayor presencia de caparzones calcíticos y las posibles relaciones de transformación de aragonito a calcita. En mucha menor proporción se presenta dolomita y aragonito.

3) El ajuste del modelo de fases mayoritarias, a partir del perfil de los patrones de difracción, ha

permitido determinar la evolución de los parámetros de red de algunas fases. En el caso de la calcita esta evolución permite estimar el contenido de Mg^{2+} en la red y el incremento de este elemento desde las zonas internas de la plataforma continental a las externas.

4) La utilización del Análisis Factorial Multivariante ha permitido determinar la presencia de calcita en todas las fracciones granulométricas, como un elemento constante del medio sedimentario, propio de su origen biogénico.

5) La distribución de los componentes bioclásticos entre los dos principales factores permite diferenciar entre dos grupos: uno propio de zonas menos profundas y cercanas a la costa (moluscos, equinodermos, briozos, etc.) más afectados por el transporte y la fragmentación y otro propio de zonas distales más profundas (foraminíferos bentónicos y planctónicos).

AGRADECIMIENTO

Este trabajo se ha financiado parcialmente con fondos del Proyecto AM 094/0501 de la DGC y T y con los del Grupo 4166 del PAT (Junta de Andalucía).

REFERENCIAS

- BISCHOFF, J. L. (1968): *Kinetics of calcite nucleation: magnesium ion inhibition and ionic strength catalysis*. J. Geophys. Researchs 73, 3315-3322.
- BRAY, N. (1986): *Gibraltar Experiment C.T.D. Data Report I, S.I.O. Reference Series 86-21*. 212 pp.
- GOLDSMITH J.R. and GRAF, D.L. (1958): *Relation between lattice constants and composition of the Ca-Mg carbonates*. Am. Min. 43, 84-101.
- GODSMITH, J.R. (1959): *Some aspects of geochemistry of carbonates*. In Abelson, P.H., ed., *Researches in Geochemistry*. John Wiley and Sons. New York, 336-358.
- GUTIERREZ MAS, J. M. (1992): *Estudio de los sedimentos recientes de la plataforma continental y Bahía de Cádiz*. Tesis Doctoral. Universidad de Cádiz. 364 pp.
- IMBRIE, J. (1963): *Factor and Vector Analisis Program for Analyzing Data*. Office Naval Res. Branch. Tech. Report 6, 83 pp.
- JORESKOG, K. G.; KLOVAN, J. E. and REYMENT, R.A. (1976): *Geological factor analysis*. Elsevier. Amsterdam. 187 p.
- LEEDER, M. R. (1982): *Sedimentology, Process and Product*. George Allen & Unwin, 344 pp.
- MORSE, J. W. and MACKENZIE, F. T. (1990): *Geochemistry of sedimentary carbonates*. Elsevier. Amsterdam. pp. 179-239.
- RODRIGUEZ-CARVAJAL, J.; AME, M. and PAMETIERR, J. (1987): *Strap. A system for time resolved data analysis (Powder diffracton patterns)*. I.L.L. Internal report. Grenoble.
- SHULL, N. and BRAY, N. (1989): *Gibraltar Experiment C.T.D. Data Report II, S.I.O. References Series 89-23*, pp. 259.
- Original recibido: Noviembre de 1994.
Original aceptado: Enero de 1995.

Metodología de investigación aplicada a los yacimientos de Manganeso en Huelva.

Por J. RAMIREZ COPEIRO DEL VILLAR (*) y S. MAROTO ARANDA (**)

R E S U M E N

En este artículo se describen los trabajos realizados en uno de los principales yacimientos de manganeso de la Faja Pirítica de Huelva, describiendo el tipo, morfología y posición de la mineralización existente, aportando una metodología de investigación a base de sondeos mecánicos destructivos aplicable a cualquier otro yacimiento manganesífero de la zona.

Palabras clave: Manganeso, Yacimientos, Faja Pirítica Ibérica, Sondeos destructivos, Reservas, Soloviejo Huelva España.

A B S T R A C T

This paper deals with the works done in one of the most important manganese ore bodies in the Huelva Pyrite Belt. It describes the type, morphology and position of the ore, showing an exploration methodology based on destructive mechanic drills, which may be applied to any other manganese ore body in the area.

Key words: Manganese, Ore bodies, Iberian Pyrite Belt, Destructive drills, Reserves, Soloviejo Huelva Spain.

R E S U M E

Dans cet article on décrit les travaux effectués sur un des gisements de manganèse à la Ceinture Pyriteuse de Huelva, décrivant le type, morphologie et la position de la minéralisation existante, en apportant une méthodologie de recherche à base de sondages destructifs applicable à toute autre gisement de manganèse de la région.

Mots clés: Manganèse, Gisements, Ceinture Pyriteuse Ibérique, Sondages destructifs, Réserves, Soloviejo Huelva Espagne.

1. EL MANGANESO EN HUELVA. ANTECEDENTES

En la provincia de Huelva existen varios cientos de criaderos manganesíferos, generalmente de pequeño tamaño, asociados normalmente a jaspes e incluso en forma térrea tiñendo las pizarras de óxidos de manganeso negro. España fue a finales del siglo pasado el primer productor mundial de manganeso, proporcionando en 1881 alrededor de las dos terceras partes del

consumo mundial. La actividad minera del manganeso fue también intensa entre los años 1940 y 1960, siendo el Consejo Ordenador de Minerales Especiales de Interés Militar (C.O.M.E.I.M.), creado en Julio de 1941 hasta su disolución en Septiembre de 1959, el organismo encargado de controlar, adquirir y distribuir toda la producción de manganeso durante este período. El descubrimiento de grandes yacimientos sedimentarios de manganeso en India, Rusia, Brasil, Ghana, Nueva Zelanda, etc. ha hecho perder importancia a Huelva, no obstante en esta provincia se concentran actualmente el 70% de las reservas nacionales de este producto.

(*) Dr. Ingeniero de Minas. E. N. Adaro
(**) Ingeniero Técnico de Minas. E.N. Adaro

El mineral se distribuye irregularmente en bolsadas y lentejones dentro del jaspe, con los óxidos y peróxidos (pirolusita, psilomelano, wad) en las zonas altas, como productos de alteración meteórica o enriquecimiento supergénico (igual que en los criaderos de pirita), y los silicatos (rononita) y carbonatos (rodocrosita) en profundidad, como minerales primarios.

En la mayor parte de los casos las explotaciones fueron realizadas con procedimientos rudimentarios, en labores de rapiño, por los habitantes de los pueblos cercanos a los yacimientos, coincidiendo el mayor auge con las alzas de precios del metal. De esta forma se trabajaron todos los jaspes, en mayor o menor grado, explotándose casi exclusivamente la zona de óxidos siguiendo un método selectivo y abandonando el mineral más íntimamente ligado a la sílice; siendo ésta una de las características de los criaderos onubenses, su alto contenido en sílice.

Los óxidos y peróxidos tienen aplicación en la industria química (pilas eléctricas, coloración de vidrios, tejidos, elaboración de productos farmacéuticos, etc), y los silicatos y carbonatos en la siderurgia produciendo aleaciones (ferromanganeso, silicomanganeso, etc.)

2. ENCUADRE GEOLOGICO. GENESIS. FORMACION MANGANESIFERA

El manganeso de Huelva forma parte de la Faja Pirítica Ibérica, franja de 230 Km de largo por 40-60 Km de ancho, que desde la provincia de Sevilla se extiende hasta la costa oeste de Portugal, constituyendo una de las provincias metalogénicas mundiales de mayor interés, con más de 60 minas de sulfuros y cerca de 300 de manganeso (Fig. 1).

Los depósitos de manganeso se hallan en relación genética con el volcanismo ácido submarino que precedió a la orogenia Hercínica y son como los sulfuros de origen exhalativo sedimentario, asociados a jaspes (radiolaritas) y a rocas volcánicas ácidas en zonas geosinclinales. Los depósitos se localizan a distancias variables del foco volcánico pero más alejados de los centros volcánicos que los sulfuros. Corresponden a las últimas fases de los episodios volcánicos, se

sitúan a techo de las masas sulfurosas asociados a emanaciones silíceas póstumias y poseen la misma dirección este-oeste de los sulfuros.

La actividad fumarólica es la fuente del manganeso, un ambiente sustancialmente reductor inducido por el volcanismo favorece la deposición de carbonatos y silicatos. La pirita se formó en fase anterior al manganeso que al tener menor afinidad por el azufre permaneció en solución más tiempo en el agua del mar, precipitando posteriormente. Todo ello incluido en la unidad estratigráfica denominada Complejo Volcánico Sedimentario (C.V.S.), portadora exclusivamente de los yacimientos de sulfuros y de manganeso en la Faja Pirítica.

La Formación Manganesífera portadora de los yacimientos de manganeso está constituida principalmente por una alternancia de diferentes tipos de pizarra (entre las que predominan las pizarras grises arcillosas, algunas con nódulos de óxidos de Mn y Fe), tobas ácidas esquistas medianas, tobas finas apizarradas (tufitas), algunas tobas de composición intermedia, pizarras moradas y/o verdes, con intercalaciones de niveles calcáreos y lentejones de jaspes rojos y cherts. Predominan las tobas ácidas cuarzoque-ratofídicas sobre las intermedias y no se descarta la posibilidad de que parte de las pizarras tengan procedencia piroclástica o mixta. Existen grandes variaciones laterales y verticales de estas rocas, tanto en granulometría como en color y en composición, existiendo tramos con predominio de tobas y otros con predominio de pizarras, apareciendo a techo de la formación un nivel muy continuo de pizarras moradas muy característico, que constituye un excelente nivel guía en la región.

Los afloramientos de jaspes son muy numerosos en esta formación y muy característicos por su color rojo y su gran dureza que los hace destacar en el relieve formando crestones. Las corridas tienen dimensiones variables, hasta 3.500 m de longitud (caso de Soloviejo) y potencia de varios centímetros a 50 m (aunque algunos como Cobullos alcance los 200 m), con un espesor medio de 1 a 20 m. Los colores más corrientes en los jaspes son los rojos, grises y rosados, aunque localmente puedan presentar colores oscuros por la presencia de óxidos de manganeso. Algunos presentan diseminación de pirita y calcopirita.

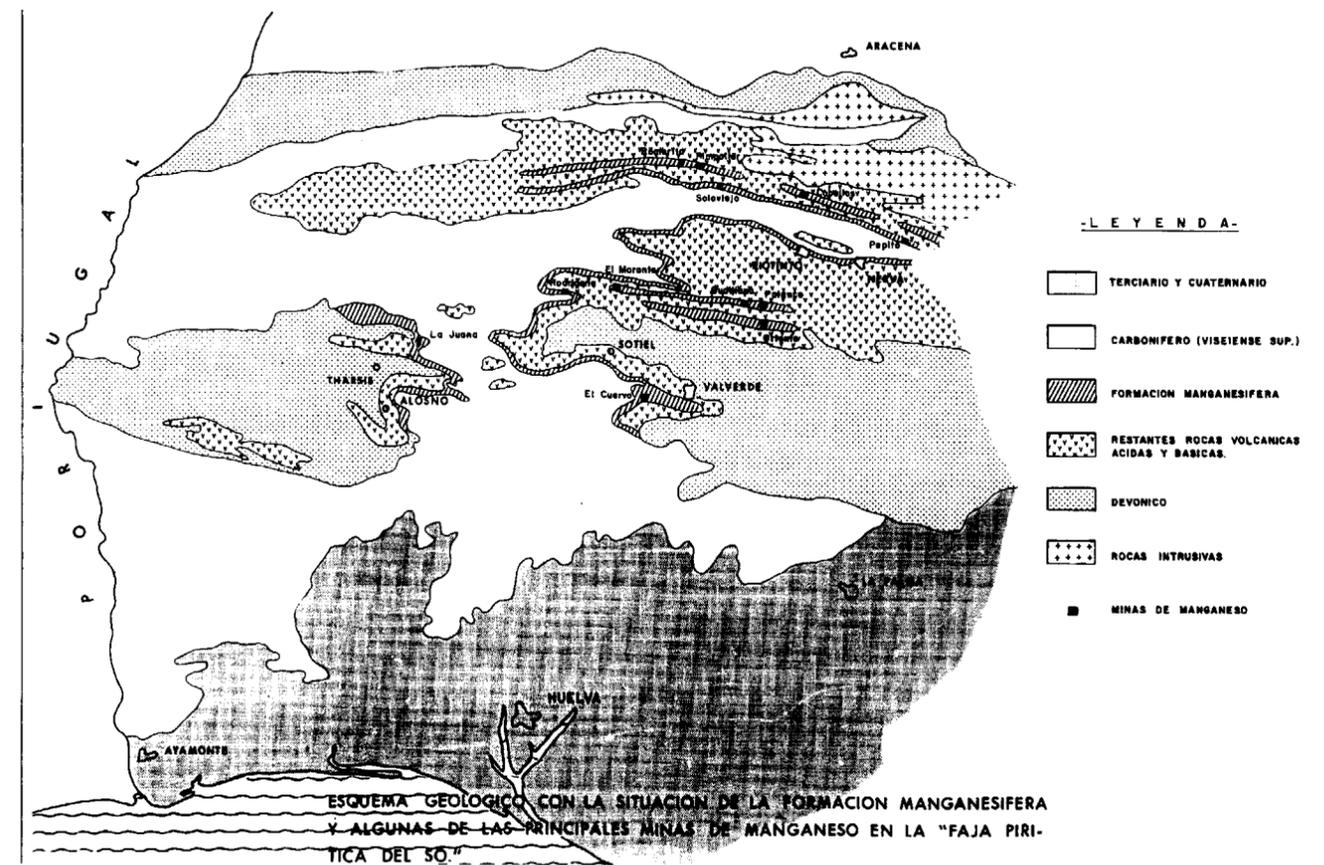


Figura 1.

3. LA CORRIDA DE JASPES DE SOLOVIEJO. DESCRIPCION GEOLOGICA

El objetivo propuesto era la investigación de la corrida de jaspes manganesíferos de Soloviejo -en el tramo comprendido entre la corta de la Joya y la carretera Nacional 435 de San Juan del Puerto a Jabugo- a fin de evaluar las reservas existentes de manganeso para su posible explotación a cielo abierto.

El grupo minero Soloviejo está situado en el extremo septentrional de la Faja Pirítica de Huelva, constituyendo una corrida de 3.500 m de longitud, potencia variable de hasta 30 m, dirección N 94° - 105° E y buzamiento verticalizado de unos 80° N, aunque como consecuencia de alabeos locales se han observado también buzamientos de 80° S.

3.1. Estratigrafía

El tramo seleccionado de 1.100 m de corrida se ha cartografiado a escala 1:1.000, definiendo las distintas unidades estratigráficas, delimitando los afloramientos o corridas de jaspes, sus dimensiones, sus contactos, litología de la roca encajante, posición estructural, morfología de la mineralización y labores existentes (Fig. 2).

En esta zona afloran exclusivamente materiales paleozoicos pertenecientes al Carbonífero Inferior, pudiéndose distinguir dos grandes conjuntos litoestratigráficos:

- Complejo Volcánico Sedimentario (C.V.S.)
- Culm

a) Estratigrafía del C.V.S.

El C.V.S. se dispone en bandas alargadas en dirección hercínica, está ampliamente representa-

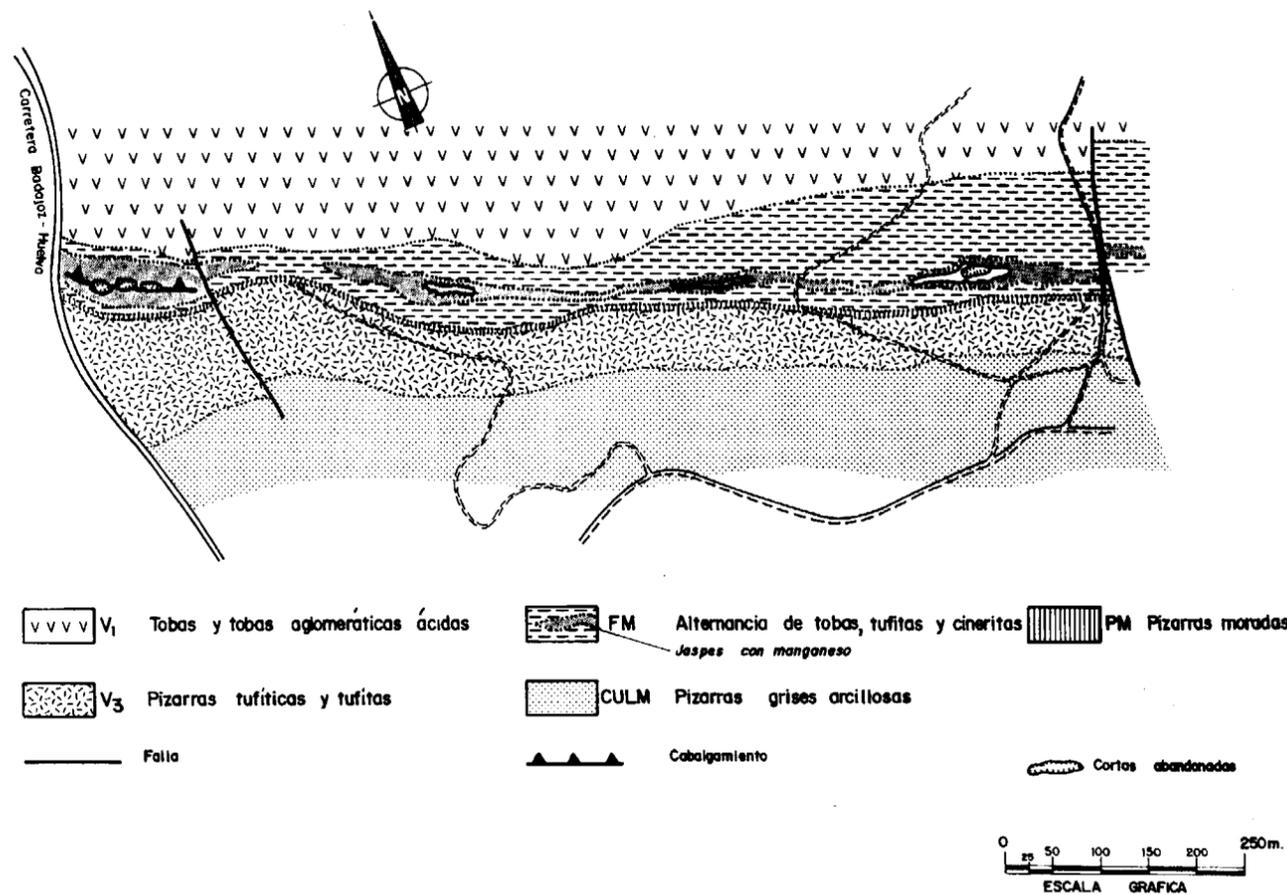


Figura 2.- Esquema geológico de la zona comprendida entre la mina de Soloviejo y la carretera a Badajoz.

do y se han diferenciado las siguientes unidades de muro a techo

- Volcanismo ácido primero o inicial (V_1).
- Formación manganesífera (Fm)
- Pizarras moradas (Pm).
- Volcanismo ácido final (V_3).

El volcanismo ácido inicial es el metalotecto litológico de los yacimientos de sulfuros, considerados como de origen exhalativo singenético sedimentario. Está constituido por rocas piroclásticas de tamaño grueso, frecuentemente tobas aglomeráticas y tobas groseras grises verdosas, esquistosas, porfídicas, de grano medio a grueso con fenocristales de cuarzo y feldespato. Las tobas aglomeráticas poseen clastos lávicos heterométricos de 3 a 15 cm, generalmente angulosos, otros redondeados, a veces fusiformes,

orientados la mayoría de las veces paralelamente al plano de esquistosidad. Los clastos son de composición más ácida que la matriz tobácea que los engloba, que posee material fragmentario más fino. Las tobas poseen a veces alteración sericitica.

La formación manganesífera es la portadora de los yacimientos de manganeso que se presentan al exterior asociados a jaspes. Está constituida por tobas ácidas esquistosas, porfídicas de grano fino a medio, grises verdosas, generalmente cloritizadas y sericitizadas dando un aspecto nacarado, que constituyen la roca de caja de los afloramientos de jaspes. Ocasionalmente y a muro de los jaspes se observan lentejones de pizarras moradas de menos de un metro de potencia y de corrida escasa.

Los jaspes constituyen en la zona estudiada un afloramiento casi continuo de 1.100 m de longi-

tud, tan sólo interrumpido en un espacio de 40 m en su extremo occidental, junto al pozo maestro de La Rapiña. Los jaspes con potencia variable de hasta 30 m, presentan usualmente colores rojizos aunque también aparecen de color rosado o grisáceo. Localmente poseen colores oscuros al estar mineralizados por óxidos y peróxidos de manganeso y óxidos de hierro. Por su gran dureza constituyen un imponente crestón que destaca sobre el relieve de la cima montañosa; dicho crestón presenta buzamientos verticales o subverticales, claramente observables en su respaldo norte, aunque por alabeos locales pueda buzarse fuertemente al sur. En su mitad oriental está atravesado por abundantes venas de cuarzo blanco en direcciones varias, predominando la N-S, N 20° E y N 100° E, como consecuencia del relleno de un fuerte diaclasamiento que le ha afectado. Se observa la existencia de abundante y llamativo cuarzo blanco en su extremo oriental. En la corta del extremo occidental, junto a la carretera de Jabugo, se observan niveles de pizarras vinosas intercaladas en los jaspes.

El horizonte de pizarras moradas o cineritas violetas se sitúa a techo de la formación manganesífera y aunque de escasa potencia (generalmente 5 m) posee una gran continuidad lateral. Presentan un elevado contenido en óxidos de hierro diseminados y en ocasiones se observan radiolarios.

El volcanismo ácido tercero o final constituye el techo del C.V.S. y representa el fin de la actividad volcánica. Está constituido por pizarras tuffíticas, tuffitas apizarradas y tobas de grano fino de colores grises.

b) Estratigrafía del Culm

Aflora en la parte sur de la zona en una banda alargada de dirección ONO-ESE. Está constituida por una monótoma serie de pizarras grises arcillosas, algunas con un bandeado milimétrico que define la estratificación.

3.2. Tectónica

La zona investigada ha sido afectada por la orogenia Hercínica de dirección ONO-ESE, originando un plegamiento que afecta a todas las formaciones cartografiadas. Dentro del contexto de la

Hoja geológica de Nerva en la que se encuentra, el área cartografiada se sitúa en el flanco norte del sinclinorio carbonífero de Riotinto, que es una estructura volcada con su flanco norte invertido. La estructura más prominente es una esquistosidad de flujo (S_1) muy desarrollada en las formaciones sedimentarias y piroclásticas finas, con una dirección que varía de N 95° - 125° E con 60°-90° N de buzamiento. En consecuencia, las estructuras poseen vergencia sur y frecuentemente están volcadas.

Aunque la estructura general es la producida por la 1ª fase de plegamiento, existe otra posterior que repliega la primitiva. Así, se observa que la 2ª fase de plegamiento produce una esquistosidad longitudinal de fractura muy penetrativa S_2 , de buzamiento sur, que afecta a la esquistosidad principal S_1 de dos formas, bien mediante pequeños pliegues en V (Kink folds) coaxiales con la primera deformación o bien por la aparición de una crenulación a veces intensa y desarrollada que produce un falso bandeado tectónico (tectonic banding).

Los rellenos de cuarzo de exudación de hasta 10 cm de potencia introducidos a favor de la esquistosidad S_1 , están plegados y afectados por la S_2 . También se han observado rellenos de cuarzo de hasta 50 cm de potencia introducidos a favor de los planos axiales de los pliegues en V, es decir a través de los planos S_2 . Como ya se dijo anteriormente se produjo finalmente un fuerte diaclasamiento, bien desarrollado en los jaspes, a través del cual se introdujeron también cuarzos posteriores.

En la zona estudiada se observan dos importantes accidentes tectónicos, un plano de cabalgamiento de 38° N visible en la corta de poniente, cerca de la carretera de Jabugo, y una falla norteada en el extremo oriental junto a la piquera, con fuerte brechificación, silicificación y abundante cuarzo en las tobas (Fig. 2).

3.3. Mineralización

Asociada a los propios jaspes se aprecia una mineralización en forma de pequeñas bolsadas que en superficie aparece en forma de pirolusita, rellenando cavidades, grietas y diaclasas.

Asociado a filones de cuarzo blanco, transversales a la corrida de jaspes, aparece otro tipo de

mineralización. Se trata de oligisto micáceo o especularita, de color negro y brillo metálico, observándose ocasionalmente algún bello ejemplar cristalizado denominado "rosa de hierro".

3.4. Labores mineras

Toda la corrida se encuentra jalonada de labores más o menos importantes y más o menos antiguas como cortas, trincheras, pozos, socavones y pocillos, habiendo sido algunas zonas bastante trabajadas por minería de interior en un pasado no muy lejano.

4. SONDEOS MECANICOS

Antes de la ejecución de los sondeos mecánicos e incluso de la realización de la cartografía geológica, se efectuaron unos trabajos topográficos previos. La causa se debía al espeso matorral que acompañaba al crestón de jaspes en ambos flancos, que impedía la visibilidad, dificultaba nuestra exacta posición e imposibilitaba ubicar acertadamente los sondeos mecánicos. Por ello

se replantearon topográficamente dos perfiles base de referencia en dirección N 110° E, situados al norte y sur del crestón de jaspes, paralelos entre sí y a 60 m uno de otro. Los perfiles base se rozaron y sobre ellos se situaron y cementaron estacas cada 25 m, que permitieron establecer la serie de perfiles transversales donde irían situados los sondeos mecánicos (Fig. 3).

Una vez cartografiado el crestón de jaspes con todos sus indicios y labores existentes, y determinada la potencia del mismo, se realizó la previsión de los distintos perfiles de sondeos para reconocer una profundidad de 45 m en caso de una futura explotación a cielo abierto. Sobre los perfiles transversales se situaron las estaquillas donde irían situados los emplazamientos de los sondeos destructivos a realizar sobre ambos respaldos norte y sur del crestón.

La zona investigada se ha dividido en cinco sectores atendiendo tanto a criterios geológicos como a criterios topográficos. Así los sectores 1 y 2 se han diferenciado por una importante fractura, el sector 2 del 3 por engrosamiento del crestón de jaspes, el 3 del 4 por una vaguada y el 4 del 5 por la proximidad de un cortafuegos. De

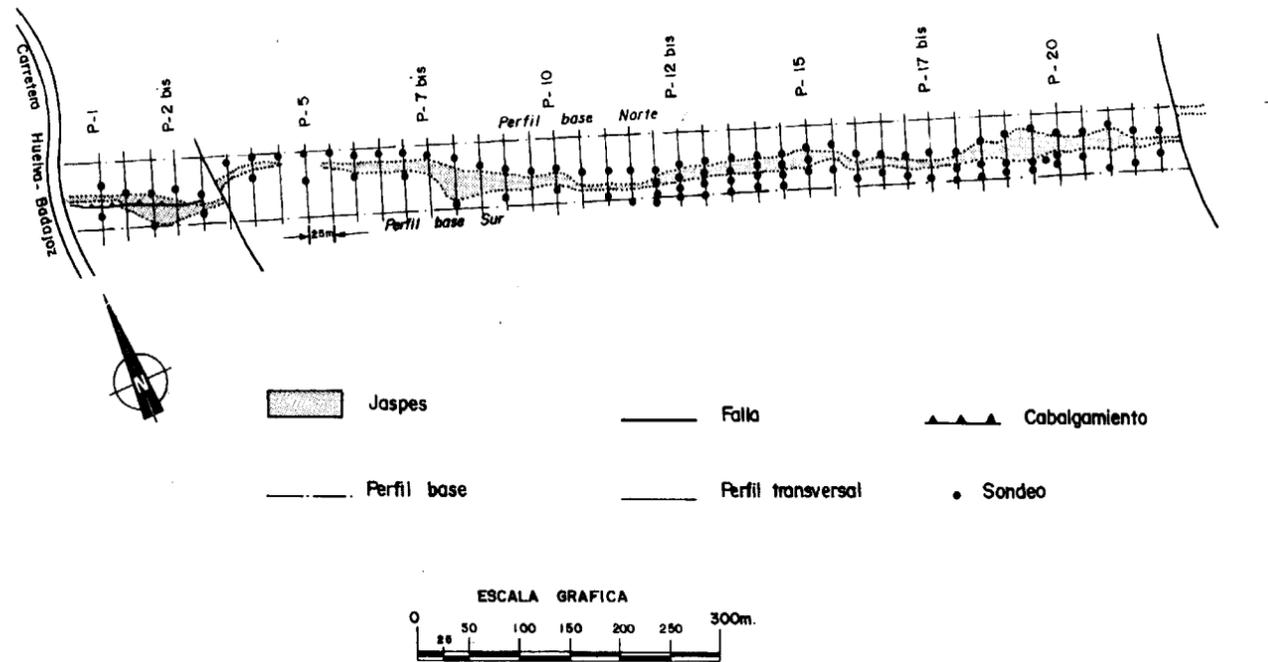


Figura 3.- Situación de los perfiles base y transversales, afloramiento detallado de los jaspes y posición de los sondeos mecánicos.

esta forma es más fácil seleccionar zonas de interés de acuerdo con los resultados obtenidos (Fig. 4).

Para reconocer el potencial existente de manganeso y sus leyes medias en la corrida de jaspes de Soloviejo, se efectuó una campaña de 99 sondeos mecánicos cortos en destructivo con recuperación de polvo y circulación directa. Los sondeos se proyectaron y realizaron en perfiles perpendiculares a la dirección de los afloramientos, situando generalmente dos sondeos por perfil (en ocasiones uno y en las zonas potencialmente interesantes hasta tres y cuatro por perfil), al objeto de conocer en cada afloramiento la variación de la mineralización manganesífera hasta la profundidad prevista de 45 m por debajo del crestón de jaspes (Fig. 3).

Los sondeos alcanzan 54,5 m de longitud y se han dado inclinados generalmente 30° con la vertical y algunos verticales, habiéndose perforado un total de 3.118,50 m. Se utilizaron dos sondas Ingersond Rand de martillo en fondo con circulación directa y auxiliadas por compresores de la misma marca.

Durante la campaña de perforación aparecieron varios problemas que retrasaron la finalización

de los mismos, pues muchos sondeos no lograron cumplir sus objetivos por problemas de perforación, bien por la presencia de labores antiguas o por aparición de zonas húmedas e incluso agua. Ello motivó que aumentará el número de sondeos previstos para ir cubriendo aquellas zonas incompletas que se habían quedado sin sondear. La campaña se fue realizando pues en varias etapas sucesivas.

No se han utilizado sondeos mecánicos con recuperación de testigo por tener la pirolusita un comportamiento deleznable frente a la presión de agua con que se sondea, lo que hubiera dificultado su recuperación; además del encarecimiento que hubiera supuesto la ejecución de emplazamientos en superficies topográficas abruptas y su elevado coste respecto a otros sistemas de perforación.

Tampoco se optó por el empleo de sondeos destructivos con circulación inversa, por su mayor coste respecto a los de circulación directa, por tener los mismos problemas en caso de humedad o agua que los de circulación directa y además su menor contaminación no supe a la de la circulación directa a estas pequeñas profundidades.

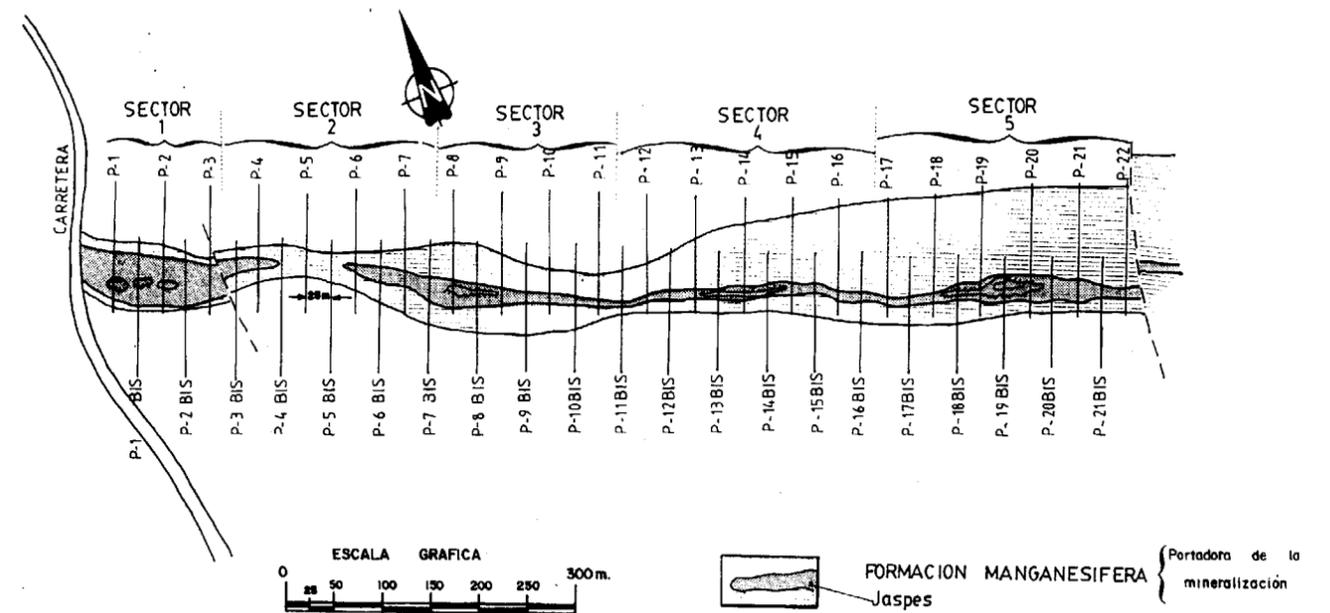


Figura 4.- Esquema de la corrida de los jaspes de Soloviejo, con la situación de perfiles y de los distintos sectores.

5. MINERALIZACION

El empleo de sondeos mecánicos ha permitido determinar y conocer la posición y morfología de la mineralización de manganeso:

-Mineralización en los jaspes: Asociada a los propios jaspes en forma de pequeñas bolsadas que por su escaso desarrollo no constituye una mineralización de interés, excepto en uno de los sectores.

-Mineralización a techo de los jaspes: Asociada a la facies tobácea fina (tufitas de la Formación Manganesífera) en contacto con el techo de los jaspes. Constituye bolsadas de mayores dimensiones (3m x 3m x 5m de media), con continuidad lateral y vertical. Es la más desarrollada y susceptible de una explotación económica (Fig. 5).

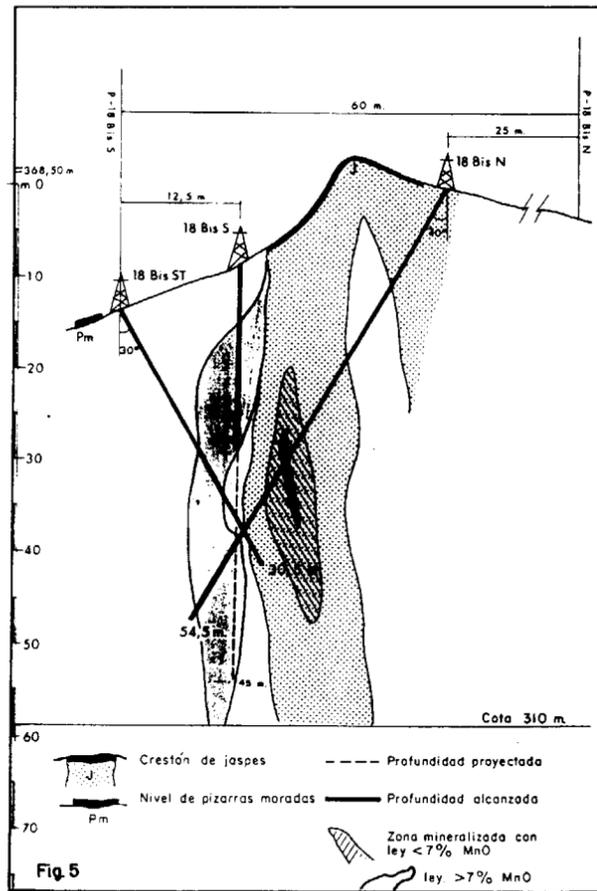


Figura 5.-Mineralización de manganeso cortada en los sondeos: en los jaspes y a techo de los mismos.

6. DESMUESTRE Y DETERMINACIONES ANALITICAS

Desde la boca del sondeo y a través de un captador se recogieron las muestras de polvo, por cada metro de avance, en sacos de plástico, con un peso original por muestra oscilando, según la recuperación entre 6 y 35 Kg. La recuperación ha sido en general satisfactoria, entre el 60% y 100% del volumen de la bolsa. A veces el poco peso de las muestras con manganeso se debe a que durante el soplado de aire, se levanta bien la muestra sin mineral y mal la mineralizada, por lo que la primera muestra de un tramo mineralizado puede tener menor peso de lo normal y baja ley, mientras que la última muestra mineralizada obtenida en el saco puede no ser tal, sino estar constituida por una acumulación de detritus mineralizados y realmente haber finalizado dicho tramo en el metro anterior. De cualquier forma la contaminación es mínima.

Las muestras obtenidas fueron estudiadas con lupa para determinar su color, litología y presencia de mineral de manganeso. Eliminando aquellas muestras correspondientes a los primeros metros de perforación, bien por su mala recuperación o bien por no considerarlas interesantes debido a su coloración y litología, sobre las 2.969 muestras restantes se realizó el cuarteo mecánico subsiguiente utilizando un cuarteador "Jones", a fin de que la muestra conseguida fuera una representación lo más exacta posible del conjunto de procedencia, dejándolas con un peso reducido de 500 grs. a 1 Kg. De las dos fracciones reducidas obtenidas, una quedó depositada en el almacén y la otra enviada al laboratorio para su análisis por espectrometría de fluorescencia de rayos X.

Las muestras sufrieron en el laboratorio un secado y un nuevo cuarteo obteniendo muestras reducidas de 150 gr que se pulverizaron a menos de 200 mallas (esta molienda se tuvo que efectuar ante la presencia de granillos de medio milímetro de tamaño). De ellas se separó una fracción de un gramo para preparar una pastilla, que se obtiene prensando este gramo de muestra pulverizada que se coloca sobre un soporte de ácido bórico, pasando a análisis de rayos X. El análisis por MnO se ha realizado mediante espectrometría de fluorescencia de rayos X, con un espectómetro Philips modelo PW 1404.

7. ESTIMACION DE RESERVAS

A la vista de los resultados analíticos obtenidos se hizo el cálculo de estimación de reservas tomando como zonas mineralizadas aquellas con ley media >7% MnO.

El método utilizado ha sido el de bloques, calculando la superficie y ley media de la zona mineralizada en cada perfil y estimando posteriormente una superficie media y una ley media entre dos perfiles consecutivos. Multiplicando la superficie media estimada anteriormente por la distancia entre perfiles (25 m) y por la densidad de la zafra (2,95 gr/cm³) se obtendría el tonelaje teórico.

En la figura 6 se ha representado un perfil de sondeos con el contorno de los jaspes y zonas mineralizadas con superficie y leyes medias superiores e inferiores al 7% MnO. Dicha figura incluye también el desmuestre con su coloración, peso original y reducido, y leyes correspondientes con los tramos usados para el cálculo de las leyes medias. Los colores rojizos, marrones, grises oscuros, negros y en ocasiones morados suelen tener contenidos en manganeso, mientras que los colores blancos, amarillos, rosados y beige suelen ser estériles.

Multiplicando el valor analítico del óxido de manganeso por el coeficiente de reducción 0,7744 se obtendría el valor en manganeso metal.

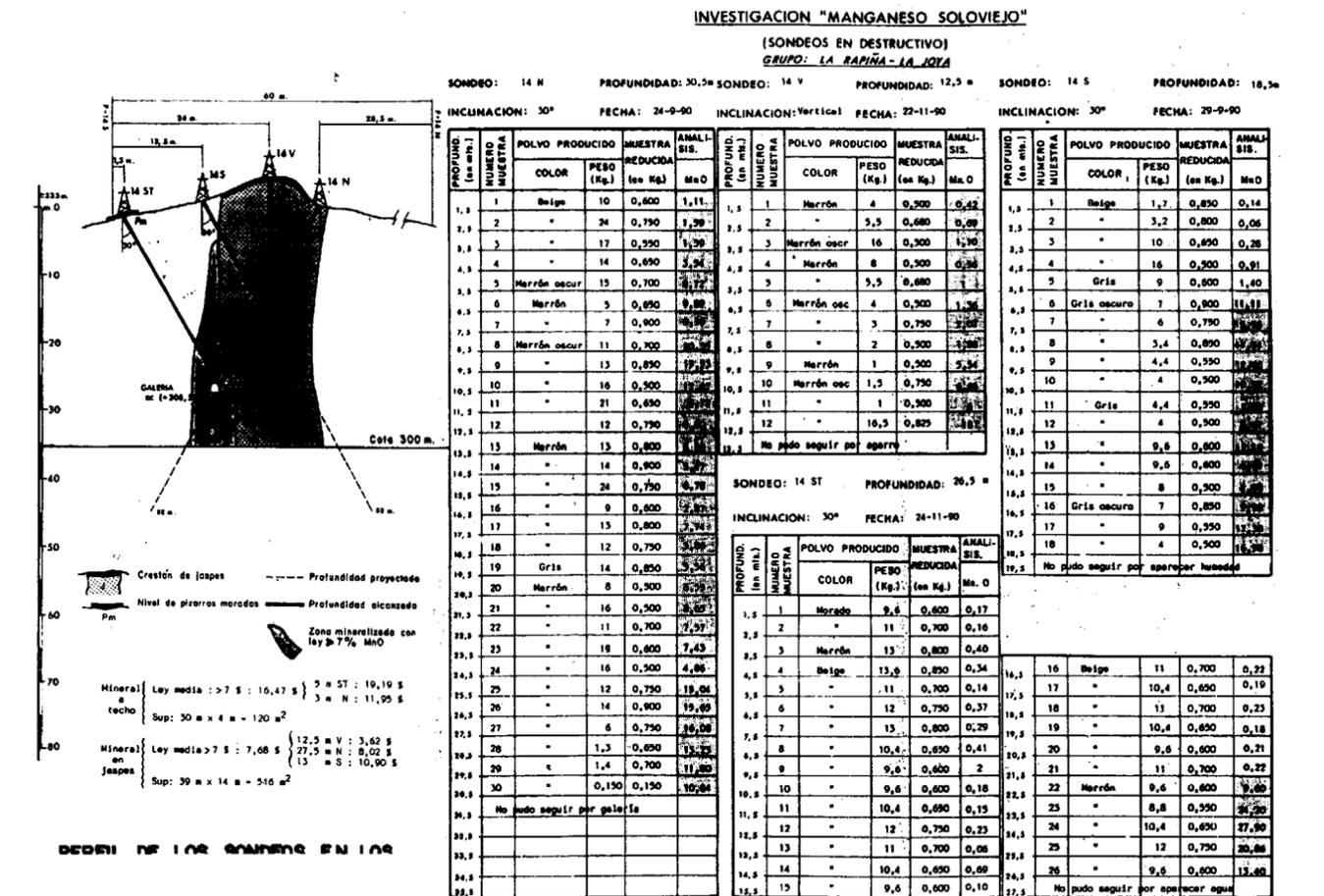


Figura 6.-Perfil de los sondeos en los jaspes, con zonas mineralizadas, desmuestre, color, peso y leyes.

Ahora bien, por los estudios realizados y observaciones efectuadas sobre este tipo de mineralizaciones, se ha considerado un coeficiente de esterilidad de 0,10 ó 0,20, al tener en cuenta la forma irregular de la mineralización (lentejones, bolos) que implica discontinuidad lateral y vertical de la misma, la presencia de labores subterráneas antiguas, y la dificultad del laboreo y tratamiento de la mineralización que se encuentre en forma de peróxido.

Multiplicando este coeficiente de esterilidad por el tonelaje teórico se obtendría el tonelaje estimado en óxido de manganeso.

De esta forma se llegaron a estimar dos zonas mineralizadas, una con mineralización en jaspes en mayor proporción que la mineralización a techo y otra con mayor mineralización a techo que en jaspes.

8. CONCLUSIONES

De la investigación sistemática realizada se sacan las siguientes conclusiones y recomendaciones aplicables a cualquier otro yacimiento manganesífero de la Faja Pirítica.

-La cartografía detallada de los afloramientos de jaspes determinando su corrida, espesor y buzamiento, morfología de la mineralización, litología de las formaciones encajantes y labores mineras antiguas, nos permitirá planificar correctamente la investigación a realizar, seleccionando zonas y ubicando convenientemente los sondeos.

-Las mineralizaciones de manganeso se encuentran en una posición determinada, asociada bien a los jaspes en pequeñas bolsadas, o bien a techo de los mismos (en las tufitas de la Formación Manganesífera) en bolsadas de mayores dimensiones, con continuidad lateral y vertical. Por su forma fusiforme pueden alcanzar enriquecimientos importantes de alta ley en cortas distancias.

-Las labores de reconocimiento a base de sondeos se considera fundamental, en cambio la ejecución de calicatas no es recomendable por la dureza del jaspe que produciría un fondo no homogéneo y poco profundo. En cuanto al tipo de sondeos a utilizar se recomiendan los sondeos en destructivo con recuperación de polvo

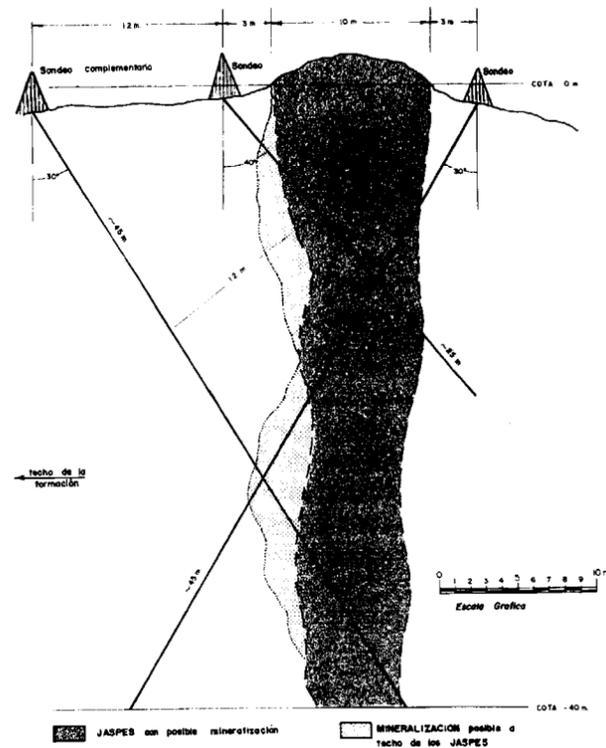


Figura 7.-Disposición de los sondeos de un perfil en la etapa de estimación de reservas.

y circulación directa, como ya mencionamos anteriormente.

-Una vez establecido el tipo de sondeos a emplear y conociendo la distribución del mineral de manganeso, la disposición de los sondeos en los jaspes propuesta sería tal y como se representa en la figura 7. Dependiendo de los distintos espesores de los afloramientos de jaspes o de la cota absoluta a reconocer en profundidad, se podrán variar las distancias de los sondeos a los contactos del jaspe o bien los ángulos de inclinación de los mismos, respectivamente. Por otra parte si la potencia del jaspe aumentara considerablemente y si la topografía lo permitiera sería aconsejable la ubicación de un sondeo vertical sobre el propio afloramiento de jaspe.

-Atendiendo a las dimensiones de las bolsadas pensamos que la ejecución inicial de una campaña de sondeos se debería realizar en perfiles cada 25 m, alternando un perfil de dos sondeos situados a ambos lados del jaspe con un perfil

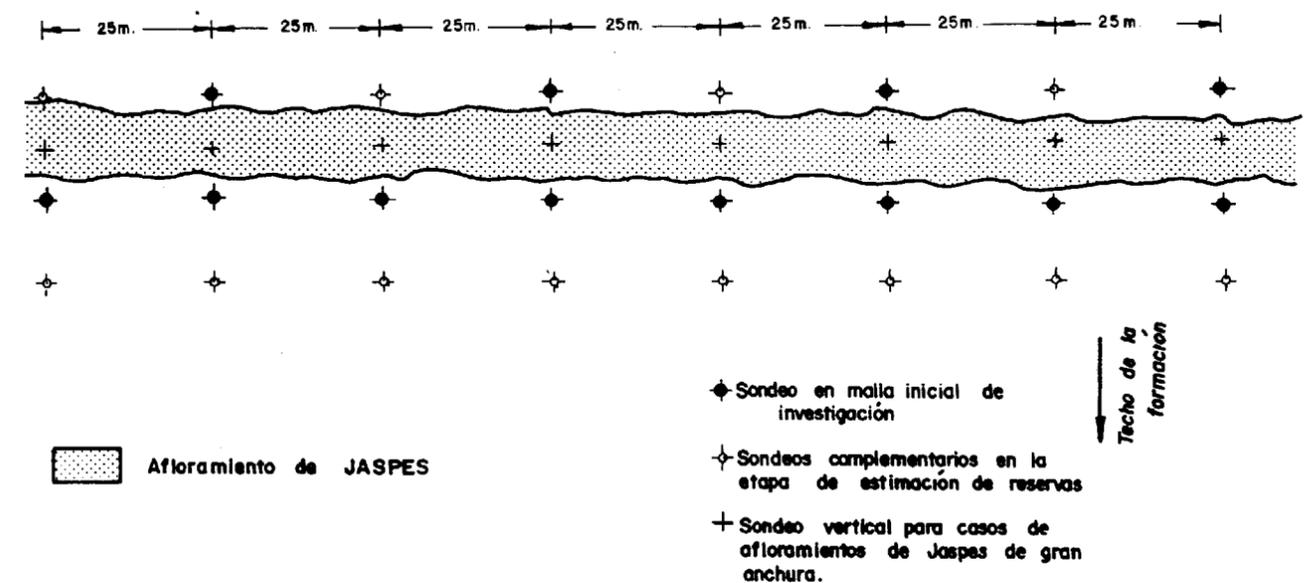


Figura 8.-Disposición en planta de los sondeos en la etapa de estimación de reservas.

de un sondeo situado a techo del jaspe. A raíz de los primeros resultados se vería la conveniencia de ir aumentando la densidad de sondeos en los perfiles respectivos (figura 8).

De las observaciones obtenidas en el estudio cartográfico previo del afloramiento del jaspe y de los datos recopilados sobre la explotación del mismo, se podrá conocer la morfología de la mineralización, presencia de labores antiguas y zonas con peróxido de manganeso de difícil laboreo y tratamiento, determinando así el denominado coeficiente de esterilidad que habrá de aplicarse en la estimación de reservas. Este coeficiente de esterilidad creemos no debería superar el 0,20 para perfiles de sondeos separados 25 m. En caso de que los perfiles de sondeos se sitúen entre sí, más próximos, este coeficiente aumentaría en función de la menor distancia de estos perfiles.

AGRADECIMIENTOS

Quisiéramos dejar constancia de nuestro agradecimiento a D. Julián Cormenzana López, pre-

sidente de Manganesos de Soloviejo S.A. por las facilidades dadas para publicar este trabajo y a D. Francisco Latorre y D. Julio Faura, ingenieros de minas de la E.N. Adaro, por su estímulo y ayuda durante la investigación del mismo.

REFERENCIAS

- NAVARRO VAZQUEZ, D. y RAMIREZ COPEIRO DEL VILLAR, J. (1982): "Memoria explicativa de la Hoja Geológica de Nerva (nº 938). I.G.M.E.
- PINEDO VARA, I. (1963): "Piritas de Huelva. Su historia, minería y aprovechamiento" Ed. Summa. Madrid.
- RAMIREZ COPEIRO DEL VILLAR, J. (1981): "Manganesos de Huelva. Selección de minas para investigación". Informe interno de la E.N. Adaro.
- SUPRIYA, R. (1981): "Manganese deposits". Acad. Press. London.

Original recibido: Septiembre de 1994.

Original aceptado: Diciembre de 1994.

MINERIA

Evaluación de reservas del yacimiento de Buseiro (Asturias).

Por E. ORCHE (*)

RESUMEN

Se presenta la cubicación de un yacimiento de carbón que tiene la particularidad de estar condicionada por numerosos factores de diversa índole (topográficos, mineros, geológicos, etc.). La evaluación de reservas se efectúa por un método que combina dos sistemas tradicionales ante la dificultad de emplear otros más actuales.

Palabras clave: Cubicación combinada, cielo abierto, planificación, carbón.

ABSTRACT

This work deals with reserves evaluation of a coal body. Coal layers show special features and appear under severe topographical, mining and geological conditionings. So, reserves evaluation is carried out by a mix of two traditional methods due to real problems in the more modern methods application.

Key words: Reserve combined calculation, open pit, mine planning, coal.

INTRODUCCION

A mediados de 1994 se procedió a la cubicación de las reservas explotables a cielo abierto del yacimiento de antracita de Buseiro (Asturias), como paso previo para el estudio de planificación que se realizó a continuación, todo ello formando parte de un Proyecto general de explotación del yacimiento (ORCHE y BARRAS, 1994).

Las características particulares del yacimiento, de la información geológico-minera disponible y de la explotación actual e histórica del mismo, condicionaron la selección del método de evaluación de las reservas, hasta el punto de que hubo que desarrollar uno específico, combinando dos de los métodos tradicionales ante la dificultad de emplear otros sistemas más modernos y sofisticados.

En el presente trabajo se describe la problemática de la cubicación y el proceso de cálculo de las

reservas del yacimiento. Su intención es poner de manifiesto que, a pesar de los avances técnicos de los últimos años en medios y métodos, a veces la utilización de las técnicas tradicionales es necesaria para resolver determinados problemas en situaciones específicas y que, por ello, no deben ser relegadas sistemáticamente apelando a la modernidad o a la innovación; siguen siendo una herramienta muy válida y como tal deben considerarse.

El autor agradece a la Empresa GONZALEZ Y DIEZ, S.A., las facilidades dadas para la elaboración de este artículo, así como la autorización para divulgar los aspectos técnicos que en él se mencionan.

GENERALIDADES

El yacimiento de carbón de Buseiro (GONZALEZ Y DIEZ, S.A., 1990) está situado en el límite entre los Concejos de Tineo y Cangas del Narcea, al

Este del núcleo urbano de Ordial, aguas arriba del pantano de Pilotuerto. Ocupa la cabecera de un estrecho valle y tiene unas dimensiones de 1.500 m. de longitud por 200 de anchura (Figura 1).

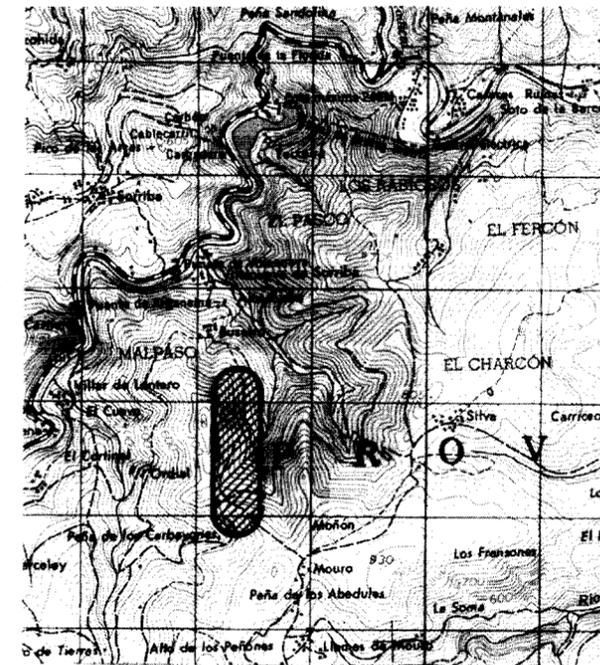


Figura 1. Situación del yacimiento de Buseiro

La zona es de orografía fuerte, con pendientes de hasta 25°, variando las cotas entre 540 y 740 m.s.n.m.

En el pasado, el yacimiento fue objeto de explotación por minería subterránea hasta 1991, fecha en la que dichas labores se cerraron al decidir la empresa concesionaria y explotadora la extracción del carbón por métodos de cielo abierto, hecho que ha sucedido sin interrupción hasta el momento presente.

El destino del carbón es térmico, distando la mina 15 km de la Central Térmica de Soto de la Barca, donde se utiliza como combustible.

SINTESIS GEOLOGICA DEL YACIMIENTO

El yacimiento de antracita de Buseiro (E.N. ADARO, 1993a) es una pequeña cuenca carbonífera

de edad estefaniense, orientada en dirección N-S, que se sitúa discordante sobre un basamento de cuarcitas cámbricas, previamente plegado y erosionado.

La cuenca de sedimentación, de tipo fluvio-lacustre, debió estar sometida a cierta inestabilidad tectónica durante su desarrollo, produciéndose aportes masivos diferenciados de restos vegetales y de material detrítico diverso, que han dado lugar a depósitos con abundantes cambios de facies horizontales y verticales.

Desde el punto de vista estratigráfico, la serie está constituida por pudingas, micropudingas, areniscas y lutitas, entre las que se intercalan dos niveles principales de carbón que presentan fuertes fluctuaciones de potencia. Estos niveles, denominados Capa I (el de más a muro) y Capa II, son los que actualmente se explotan a cielo abierto.

Localmente, aparece en la parte superior de la serie un tercer nivel (Capa III) de escaso desarrollo e interés.

Estructuralmente, la cuenca forma un sinclinal muy apretado, asimétrico, con el flanco oriental buzando de 25° a 70° y el occidental de 70° a invertido (Figura 2), que cierra periclinalmente por el Sur y está limitado por una falla transversal en el Norte.

La rama Oeste está afectada por una falla inversa de dirección N-S e inclinación entre 65° y 80° al Oeste, que afecta localmente a la Capa I en las cotas más altas. Existen fallas transversales con

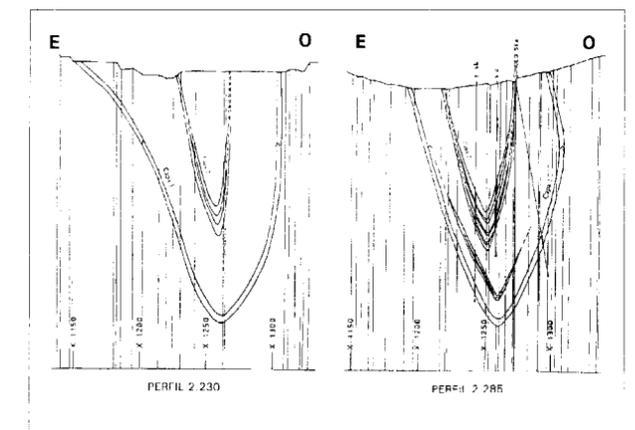


Figura 2. Perfiles geológicos de la zona sur del Yacimiento.

(*) Dr. Ingeniero de Minas. E.T.S. Ingenieros Industriales y de Minas, Universidad de Vigo.

Este del núcleo urbano de Ordial, aguas arriba del pantano de Pilotuerto. Ocupa la cabecera de un estrecho valle y tiene unas dimensiones de 1.500 m. de longitud por 200 de anchura (Figura 1).



Figura 1. Situación del yacimiento de Buseiro

La zona es de orografía fuerte, con pendientes de hasta 25°, variando las cotas entre 540 y 740 m.s.n.m.

En el pasado, el yacimiento fue objeto de explotación por minería subterránea hasta 1991, fecha en la que dichas labores se cerraron al decidir la empresa concesionaria y explotadora la extracción del carbón por métodos de cielo abierto, hecho que ha sucedido sin interrupción hasta el momento presente.

El destino del carbón es térmico, distando la mina 15 km de la Central Térmica de Soto de la Barca, donde se utiliza como combustible.

SINTESIS GEOLOGICA DEL YACIMIENTO

El yacimiento de antracita de Buseiro (E.N. ADARRO, 1993a) es una pequeña cuenca carbonífera

de edad estefaniense, orientada en dirección N-S, que se sitúa discordante sobre un basamento de cuarcitas cámbricas, previamente plegado y erosionado.

La cuenca de sedimentación, de tipo fluvio-lacustre, debió estar sometida a cierta inestabilidad tectónica durante su desarrollo, produciéndose aportes masivos diferenciados de restos vegetales y de material detrítico diverso, que han dado lugar a depósitos con abundantes cambios de facies horizontales y verticales.

Desde el punto de vista estratigráfico, la serie está constituida por pudingas, micropudingas, areniscas y lutitas, entre las que se intercalan dos niveles principales de carbón que presentan fuertes fluctuaciones de potencia. Estos niveles, denominados Capa I (el de más a muro) y Capa II, son los que actualmente se explotan a cielo abierto.

Localmente, aparece en la parte superior de la serie un tercer nivel (Capa III) de escaso desarrollo e interés.

Estructuralmente, la cuenca forma un sinclinal muy apretado, asimétrico, con el flanco oriental buzando de 25° a 70° y el occidental de 70° a invertido (Figura 2), que cierra periclinalmente por el Sur y está limitado por una falla transversal en el Norte.

La rama Oeste está afectada por una falla inversa de dirección N-S e inclinación entre 65° y 80° al Oeste, que afecta localmente a la Capa I en las cotas más altas. Existen fallas transversales con

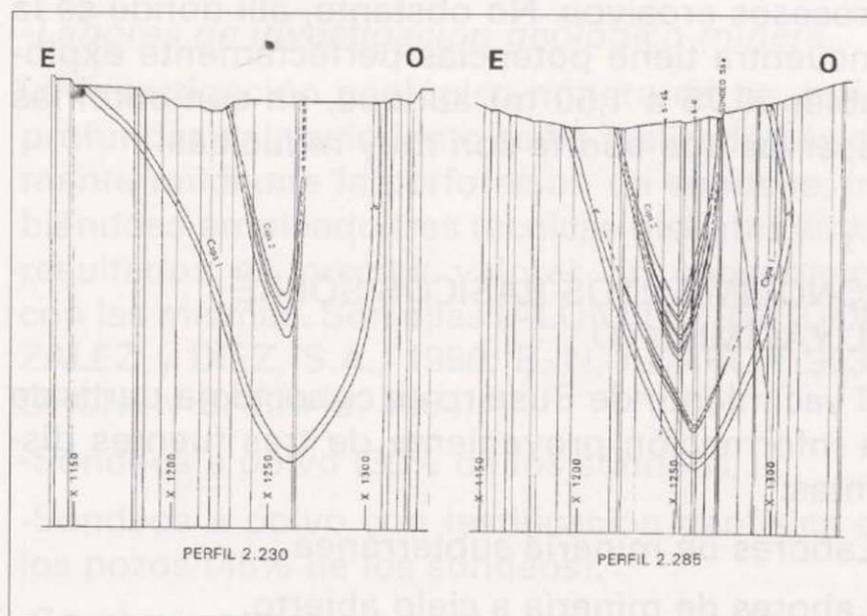


Figura 2. Perfiles geológicos de la zona sur del Yacimiento.

una cierta componente horizontal que, ocasionalmente, desplazan las capas algunos metros.

La charnela del sinclinal es muy rectilínea y, a nivel del techo de la Capa I de carbón, se sitúa a cota prácticamente constante, con ligeros cabeceos de escasa relevancia.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS CAPAS DE CARBÓN

En la cuenca existen tres capas de carbón, de las cuales sólo dos tienen interés comercial.

La de mayor tradición minera, y por tanto mejor conocida, es la Capa I, situada en la parte inferior del paquete. Sobre esta capa se centraron las labores subterráneas. A la vista de los datos aportados por los sondeos y por las explotaciones mineras, esta capa se comporta como una gran caja de capa con diversas intercalaciones estériles que, localmente, llegan a tener espesores métricos; presenta pues gran variación lateral tanto en el número de pasos de carbón como en su potencia total de caja, que varía de 1 a 8 m.

Por encima de la Capa I, y con mucha menor extensión superficial, se encuentra la Capa II, apenas explotada por minería subterránea. Al igual que la anterior, presenta frecuentes cambios laterales de facies, digitándose en venas de potencia y continuidad variables. El espesor de la caja de la capa es muy heterogéneo, variando de 2 a 11 m.

Finalmente, la Capa III, a techo de la serie, tiene una presencia muy restringida, probablemente debido a su eliminación prácticamente total por procesos erosivos. No obstante, allí donde se la encuentra tiene potencias perfectamente explotables (0,75 a 1,50 m) aunque, en conjunto, las reservas que aporta son muy reducidas.

CONOCIMIENTOS BÁSICOS SOBRE EL YACIMIENTO

El yacimiento de Buseiro es conocido a partir de la información proveniente de tres fuentes distintas:

- Labores de minería subterránea.
- Labores de minería a cielo abierto.
- Labores de investigación geológico-minera.

Los planos de labores subterráneas proporcionan una buena imagen de la geometría del yacimiento, al menos a nivel de la Capa I, que es la más explotada. Estas labores son útiles fundamentalmente para el control espacial de los planos de isobatas de las capas y de los perfiles geológicos, sobre todo cuando existe un levantamiento estratigráfico de las mismas, como a veces ocurre.

Por su parte, las labores a cielo abierto, al exponer las capas de carbón en tajos, bermas, taludes y plataformas, permiten la realización de levantamientos estratigráficos de detalle y el seguimiento en superficie de los niveles de carbón, facilitando con ello la correlación de unos puntos a otros y ayudando a definir el correcto emplazamiento de los sondeos de investigación.

Las labores de investigación geológico-minera llevadas a cabo han sido principalmente sondeos para detectar las capas en profundidad, concretamente en los flancos y en el fondo del sinclinal, y los correspondientes estudios de interpretación de resultados. Dichas labores se han efectuado con anterioridad al inicio de la explotación a cielo abierto o en los primeros estadios de ella. En concreto, fueron realizadas tres campañas en los años 1990 (ALONSO, 1990), 1992 y 1993 (ORCHE y BARRAS, 1994); la primera y la tercera fueron contratadas a ingenierías especializadas, mientras que la segunda fue ejecutada directamente por la empresa concesionaria. Otras labores de investigación consistieron en zanjas y pocillos, como apoyo para la determinación de la serie estratigráfica general y control de afloramientos de las capas. Adicionalmente, fue efectuado un estudio geotécnico para la definición de los taludes de la explotación a cielo abierto, con amplio soporte de muestras de campo y sondeos, y de los análisis de laboratorio correspondientes.

CUBICACIÓN DE RESERVAS

Como se ha indicado anteriormente, la cubicación general del yacimiento, explicitada mediante el cálculo de cinco variantes geométricas distintas, forma parte del estudio de planificación minera que tiene por objeto determinar la manera más adecuada de explotarlo desde el punto de vista técnico-económico (ORCHE y BARRAS, 1994).

La descripción del proceso de evaluación de reservas que se hace seguidamente se ha dividido en las siguientes partes:

- Objetivos generales de la cubicación
- Factores que la condicionan.
- Método de cubicación empleado.
- Partición del yacimiento en bloques.
- Cálculo de reservas.

Cada uno de ellos se comenta a continuación.

a) *Objetivos generales de la cubicación.*

El objetivo que pretende la cubicación es triple. Por una parte, se trata de calcular las reservas explotables a cielo abierto del yacimiento aprovechando al máximo todos los datos geológico-mineros disponibles.

En segundo lugar, el método de cubicación debe permitir la evaluación rápida y tan exacta como sea posible de distintas configuraciones de mina, con objeto de tener un abanico de explotaciones posibles entre las cuales seleccionar la más favorable, que será desarrollada posteriormente.

Finalmente, dado que la explotación de la variante elegida debe ser planificada en el tiempo, es necesario que las reservas se desglosen en bloques de un tamaño tal, que puedan ser utilizados para el desarrollo de la misma, desde la situación de partida hasta el agotamiento del yacimiento. A tal efecto, debe preverse un método de cubicación que permita una partición adecuada del yacimiento.

b) *Factores condicionantes.*

A efectos de su cubicación, el yacimiento de Buseiro presenta una serie de peculiaridades importantes que es necesario considerar, porque condicionan seriamente el método de evaluación de sus reservas. Son las siguientes:

-*Minados subterráneos.*

Como se ha señalado previamente, el yacimiento ha sido explotado, en alguna de sus zonas, por minería subterránea hasta 1991, fecha a partir de la cual cesaron estas labores siendo sustituidas por métodos de cielo abierto que ahora se emplean sistemáticamente.

La información que se posee de las zonas minadas proviene de dos fuentes: la oral y la docu-

mental. Ambas coinciden en el hecho de que las capas no fueron totalmente extraídas en las zonas explotadas, por lo cual es necesario considerar que todavía queda en ellas, in situ, una cierta cantidad de carbón remanente. La cuantía de este carbón se puede fijar, por capa y sector, mediante la aplicación de coeficientes reductores al carbón virgen original.

Por otro lado, los datos documentales, consistentes básicamente en los planos de labores y en el levantamiento geológico de algún transversal, proporcionan información que puede utilizarse para el control geométrico de las capas en el proceso de elaboración de los planos de isobatas correspondientes.

-*Explotación a cielo abierto.*

La explotación actual del yacimiento a cielo abierto da lugar a dos fenómenos.

El primero es que las capas de carbón están expuestas en superficie y, por ello, pueden reconocerse adecuadamente su estructura interna, potencia y calidad. Además, es posible el seguimiento de los afloramientos en la explotación, lo que ayuda para la correlación de los niveles en profundidad.

El segundo fenómeno es que la topografía primitiva ha sufrido fuertes alteraciones como consecuencia de la excavación y banqueo de la mina. Por esta razón, la cubicación del estéril más superficial debe hacerse con un método de gran precisión con objeto de evitar errores cuantitativos importantes. El estéril más profundo, como es lógico, no presenta este problema y puede cubicarse, en principio, por cualquier método.

-*Labores de investigación geológico-minera.*

La investigación geológico-minera de las zonas profundas del yacimiento se ha realizado básicamente mediante la perforación de sondeos, habiéndose empleado tres técnicas distintas cuyos resultados es preciso valorar en consonancia con las mismas. Son ellas (ALONSO, 1990; GONZALEZ y DIEZ, S.A., 1990; E. N. ADARO, 1993a; ORCHE y BARRAS, 1994):

- Sondeos a polvo (30% de los sondeos).
- Sondeos a polvo con testificación geofísica de los pozos (45% de los sondeos).
- Sondeos a testigo continuo con testificación geofísica de los pozos (25% de los sondeos).

Como es evidente, el nivel de exactitud de los datos proporcionados por los sondeos aumenta desde los citados en primer lugar hasta los últimos.

La distribución de los sondeos por el área a investigar es la que se cita a continuación:

Los del primer tipo (a polvo) están situados en la parte Norte del yacimiento; los del segundo tipo se localizan en el Sur, y los perforados a testigo continuo están repartidos por toda su superficie.

Los sondeos están dispuestos normalmente en grupos de dos o tres, alineados según una dirección determinada que, a veces, coincide con la perpendicular al eje del sinclinal.

-Calicatas.

Existen cinco zanjas y otros tantos pocillos excavados en diversas épocas, con objeto de reconocer la serie estratigráfica y los afloramientos de las capas.

-Geometría y estructura de las capas.

El yacimiento es un sinclinal apretado, con las capas buzando fuertemente o, incluso invertidas. Uno de los flancos está afectado por una falla inversa que llega a eliminar parte de la capa principal.

La estructura interna de las capas es sumamente variable, presentándose frecuentes cambios laterales de facies, tanto en dirección longitudinal como transversal. Las digitaciones de los niveles carbonosos son abundantes y, por tanto, también lo son la aparición y desaparición de cuñas estériles entre ellos.

La potencia de las capas presenta valores muy dispares, que suelen ser tanto mayores cuanto más cerca se está de la charnela del sinclinal, zona en la que existen fuertes acumulaciones locales de carbón.

La calidad del carbón no se distribuye uniformemente, siendo mejor el de determinados niveles y zonas del sinclinal.

-Representación gráfica del yacimiento.

Con objeto de visualizar espacialmente el yacimiento, en la última campaña de investigación se analizó la naturaleza y disposición de la información existente, llegándose a la conclusión de

que la representación por perfiles era, objetivamente, la más adecuada presentando, además, la ventaja de aprovechar la favorable colocación en líneas transversales de los sondeos.

En conclusión, se trazaron diez perfiles verticales paralelos, que se hicieron coincidir con sondeos existentes, y se apoyaron, además, en los datos proporcionados por las explotaciones subterráneas y a cielo abierto.

Los perfiles se han dibujado coincidentes en dirección con el eje X de las coordenadas locales (transversales al yacimiento), y se han denominado con el número que les corresponde según su situación (desde Y = 1.588 a Y = 2.400).

La Figura 2 muestra dos perfiles correspondientes a la zona Sur del yacimiento. En ellos es perfectamente observable la variabilidad de las capas, a pesar de estar distanciados sólo 55 m. Esta tónica se mantiene en el resto de los perfiles, acrecentada incluso en la parte Norte.

Además de por perfiles, el yacimiento se ha representado por medio de los planos de isobatas del muro explotable de las dos capas de carbón principales. Como queda patente en la Figura 3, la complejidad del flanco Oeste del sinclinal condiciona bastante su utilización como documentos base para las cubicaciones.

-Planificación minera.

La necesidad de efectuar una planificación minera detallada de la explotación, obliga a dividir el yacimiento en bloques tan regulares, uniformes y manejables como sea posible, con objeto de realizar y controlar mejor las cubicaciones de las posiciones planificadas, hecho que deberá ser compatible con el método de evaluación de reservas que se seleccione.

c) Método de cubicación.

A la vista de los condicionantes mineros, del número, tipo y disposición de las labores de investigación, de la geometría y estructura de las capas, de la representación gráfica del yacimiento, del número previsible de variantes a cubicar y de los requerimientos de la planificación en cuanto a su división en bloques, se revisaron los métodos de cubicación existentes con objeto de seleccionar el más adecuado.

Tras un análisis de los mismos (ORCHE y BARRAS, 1994), se desecharon sucesivamente el

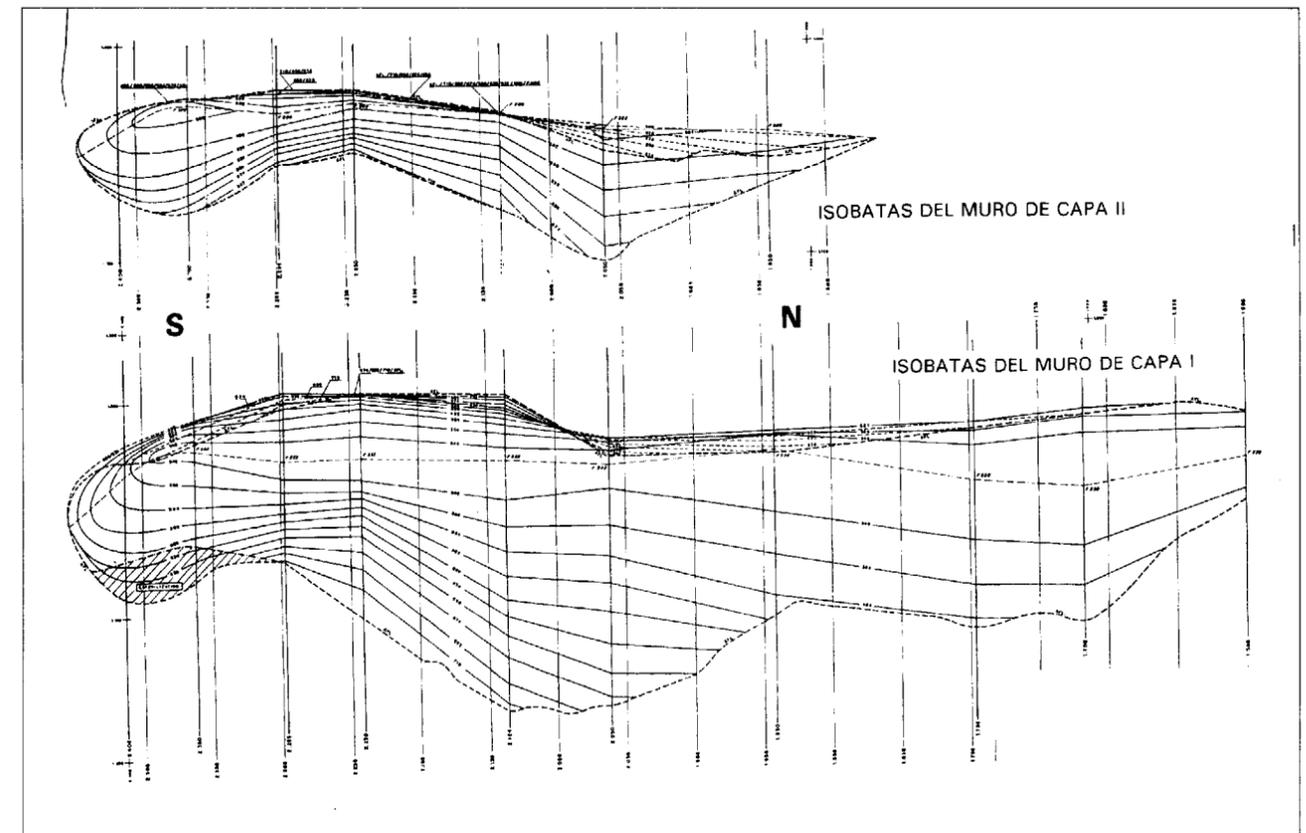


Figura 3. Planos de isobatas del muro de las capas.

método geoestadístico (por la heterogeneidad de la información y la complejidad estructural y topográfica del yacimiento), el de polígonos de influencia (por la irregularidad del tamaño y la forma de los polígonos resultantes, y la dificultad para discretizar el yacimiento en bloques relativamente regulares), el de triángulos (básicamente por las mismas razones que el anterior), el de plantas horizontales (por la incidencia del trabajo manual y su lentitud y laboriosidad, especialmente teniendo en cuenta la necesidad de cubicar diversas configuraciones geométricas) y el de isopacas para la cubicación del carbón (debido a la dificultad para la elaboración de los planos de isopacas, que habría que recalculara cada vez que se modificara algún criterio de selectividad, como la potencia explotable o la calidad).

Restaba, pues, el método de perfiles. Este método es el que mejor se ajusta a la información dis-

ponible sobre el yacimiento, pues utiliza la representación gráfica del mismo mediante perfiles verticales que integran todos los conocimientos, existentes e interpretados, sobre las capas de carbón de la forma más completa y exacta posible; no obstante, tiene el inconveniente de que no es apropiado para la cubicación del estéril de la parte más superficial del yacimiento. En efecto, la topografía de estas zonas ha sido alterada por la explotación a cielo abierto, y la interpolación entre dos perfiles consecutivos no puede apreciar las irregularidades de bancos, bermas, rampas, plataformas, etc., en toda su dimensión, excepto cuando están muy próximos, que no es el caso de Buseiro. Por eso, la cubicación de este estéril, con el nivel de precisión requerido para la planificación minera, debe hacerse por otro método. Para cubicar un macizo con estas características, el más indicado es el de plantas horizontales, que permite un

cálculo muy aproximado mediante la planimetría de los contornos de las curvas de nivel del techo y muro de las plantas consideradas y, por ello, es el seleccionado para cubicar esta parte superficial.

En resumen, tras el análisis de los métodos de cubicación posibles, se llegó a la conclusión de que ninguno de ellos, por sí solo, era capaz de responder adecuadamente a los planteamientos de partida, teniéndose que recurrir a la combinación de dos de ellos (perfiles y plantas horizontales) para cubicar la totalidad del yacimiento, de acuerdo con la siguiente distribución:

Zona alterada en superficie

- Estéril: plantas horizontales.
- Carbón: perfiles.

Zona profunda

- Estéril: perfiles.
- Carbón: perfiles.

El paso siguiente es determinar el alcance en vertical de cada una de estas zonas de forma inequívoca, lo que se ha hecho como sigue:

Como punto de partida se toma la representación geométrica del yacimiento mediante los

diez perfiles geológicos elaborados en la última campaña de investigación (E. N. ADARO, 1993a).

El macizo rocoso comprendido entre dos perfiles consecutivos constituye un bloque geológico, que es la unidad elemental en la que se define el alcance de cada zona. Para ello se localizan en cada perfil límite del bloque geológico los puntos a cota más baja afectados por la explotación a cielo abierto; el de menor valor de los dos fija la cota de un plano horizontal que es el límite entre zonas en ese bloque. La parte inferior de la Figura 4 muestra gráficamente un esquema del proceso. En el bloque A, limitado por los perfiles P-1 y P-2, las cotas mínimas de las zonas afectadas son 656 m y 680 m y, por tanto, se toma la primera de ellas como cota del plano de separación de las zonas alterada y profunda. Por su parte, en el bloque B, dichos puntos están situados a una elevación de 680 m y 710 m respectivamente, eligiéndose 680 m como cota del plano límite entre zonas.

Repitiendo este proceso con cada par de perfiles geológicos del yacimiento se obtienen las cotas de los planos de separación entre las dos zonas, por bloque, que resultan ser las que se indican en la parte superior de la Figura 4. Al estéril de

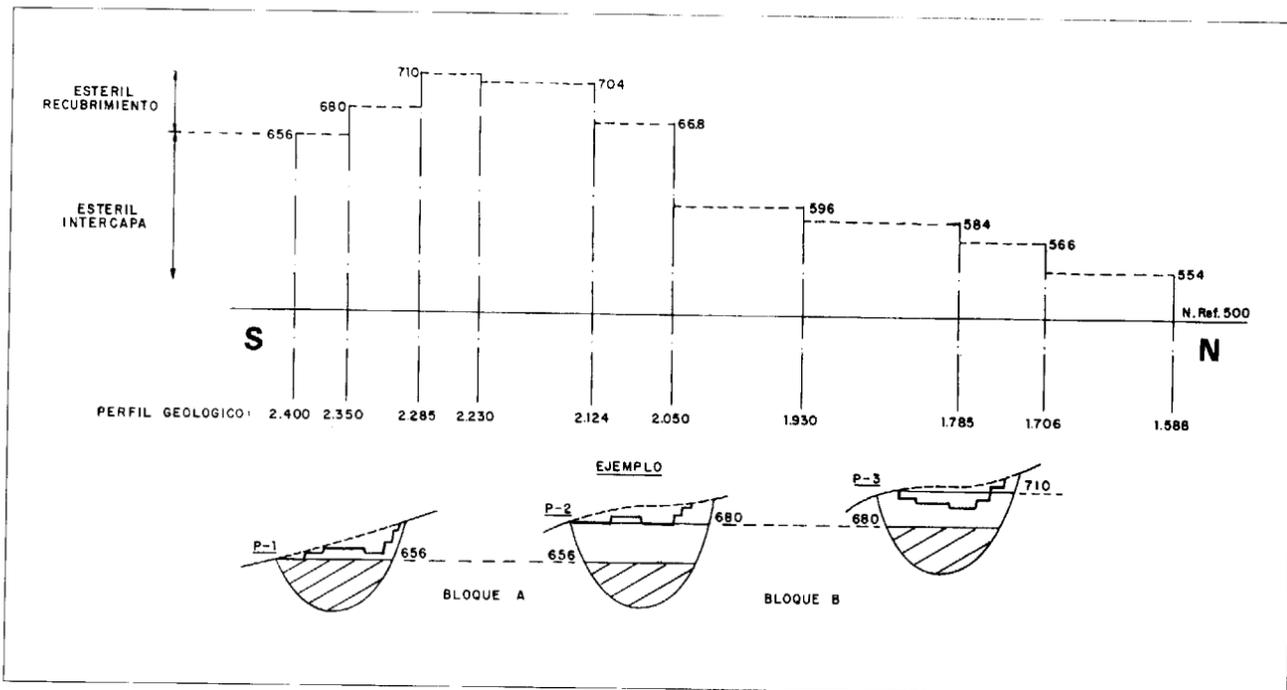


Figura 4. Cotas de los planos de separación del estéril de recubrimiento e intercapa.

la zona superior alterada se le ha denominado de recubrimiento; al de la parte inferior, de intercapa, y como tales aparecen en las hojas de cubicación.

De esta forma se tiene el yacimiento dividido en bloques geológicos definidos por dos perfiles transversales paralelos y, dentro de ellos, delimitadas en vertical dos zonas en las que el estéril se cubica por métodos distintos, como acaba de indicarse.

d) Discretización del yacimiento.

Para planificar una explotación con detalle se necesita que el yacimiento esté dividido en bloques de tamaño apropiado, manejables, de modo que las cubicaciones de las posiciones estudiadas sean fiables, pormenorizadas y rápidas de calcular.

Es evidente que, dada la separación de los perfiles geológicos representativos (de 45 a 145 m, con una media de 80 m aproximadamente), los bloques definidos por cada par de ellos son inapropiados para este cometido debido a su tamaño excesivo y diverso. Es necesario, entonces, una partición del campo explotable en bloques de menores dimensiones.

Dada la periodicidad prevista para las posiciones de la planificación, se considera suficiente la aproximación obtenida con los bloques cuyos tamaños sean los siguientes:

-Anchura (medida en la dirección longitudinal del yacimiento, N-S, según el eje Y de coordenadas locales): 50 m

-Longitud (medida en dirección transversal al yacimiento, según el eje X de coordenadas locales): el ancho del mismo.

Los nuevos bloques así definidos están separados por planos verticales cada 50 m. Su representación esquemática puede verse en la Figura 5. Se han trazado desde la coordenada local Y = 1.588, límite Norte de la cubicación, a la Y = 2.388. A los 16 que resultan hay que añadir, como otro bloque más, el Cierre Sur que, por tener forma de semitronco de cono (cierre periclinal del sinclinal), debe tener un tratamiento específico. El Cierre Norte empalma con las labores actuales que han llegado al fondo del sinclinal y, por ello, se supondrá que es un plano vertical por la coordenada Y = 1.588.

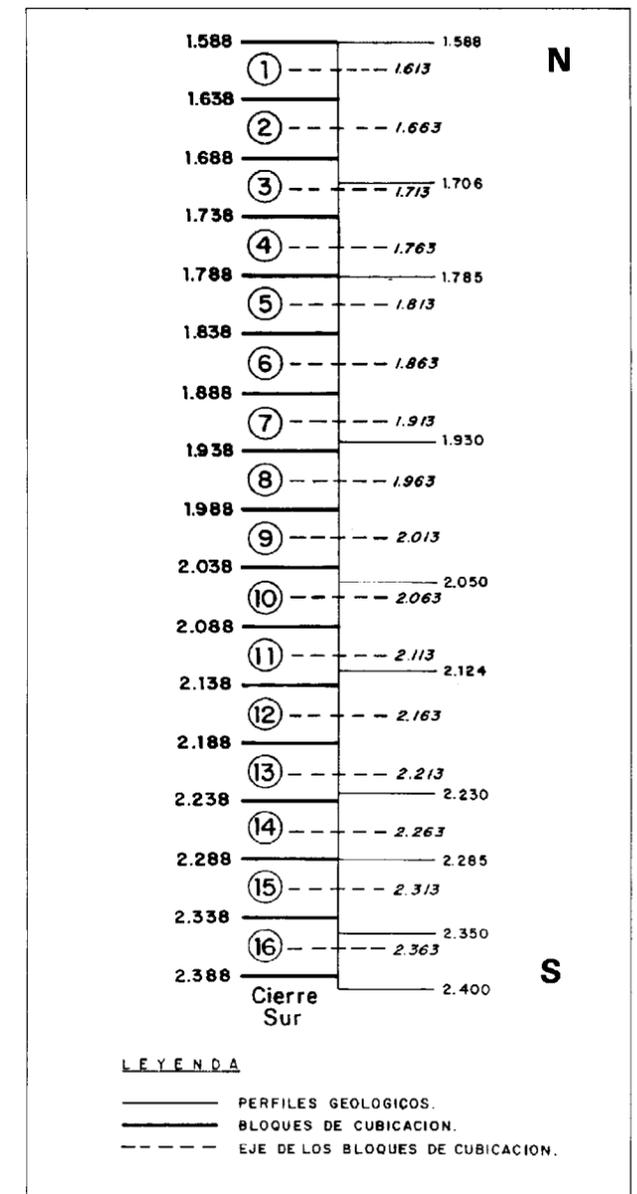


Figura 5. Esquema de situación de perfiles geológicos y bloques de cubicación.

Los 17 bloques, a su vez, han sido divididos en plantas o rebanadas horizontales mediante planos cada 6 m de altura, que es la que corresponde al alcance operativo del brazo de las máquinas de carga existentes en la mina, desde la cota topográficamente más alta (728 m) a la más baja en la charnela del sinclinal (530 m).

Se tiene así reticulado el yacimiento en 34 bancos de 6 m de altura y 17 bloques (16 bloques de 50 m de anchura y el Cierre Sur) que suman un total de 578 subbloques posibles de cubicación. De ellos, por ejemplo, 504 tienen existencia real en la variante de cubicación de mayor tonelaje y 334, en la de menores reservas.

e) Cálculo de reservas.

Se trata ahora de calcular el volumen de estéril y/o las reservas de carbón de cada subbloque de cubicación, de acuerdo con el método adecuado a su localización espacial (zona profunda o zona alterada superficial). Para ello se necesitan respectivamente los perfiles y la configuración del vaciado de la variante de explotación correspondiente (se han cubicado un total de cinco). De los primeros se dispone ya y sólo es preciso adaptarlos a las condiciones específicas de la variante; por el contrario, en cada uno de los cinco casos estudiados es necesario dibujar la planta del vaciado de la explotación respectiva.

A tal fin, en cada tanteo, se procede como sigue:

-Se dibuja en cada perfil el fondo de corta que resulta de aplicar los criterios de selectividad que se definen en cada caso.

-Se proyectan hasta la superficie los taludes con las inclinaciones deducidas en el estudio geotécnico, que son de 55° con carácter general o la pendiente del muro de la capa más profunda si es inferior.

-Se llevan las trazas de los taludes a una planta.

-Se construyen las isolíneas de taludes y el fondo, a las cotas de los bancos.

-Se dibuja el Cierre Sur mediante las isolíneas correspondientes, a partir de los planos de capa y la inclinación de los taludes que corresponda.

En este momento se tienen preparados los perfiles y dibujado el vaciado de la variante a cubrir. La Figura 6 es una representación de uno de estos vaciados. Las isolíneas de los taludes se han trazado cada 18 m, esto es, agrupando tres bancos de 6 m de altura. El fondo es plano, con anchura variable que depende de la geometría de la capa de muro en la charnela del sinclinal.

El Cierre Sur se cubica íntegramente (estéril y carbón) por plantas con planímetro dada su particular geometría.

Los cálculos numéricos de la cubicación se realizan mediante una Hoja de cálculo comercial. El fichero correspondiente a cada variante de cubicación ocupa aproximadamente unos 850 kb de memoria.

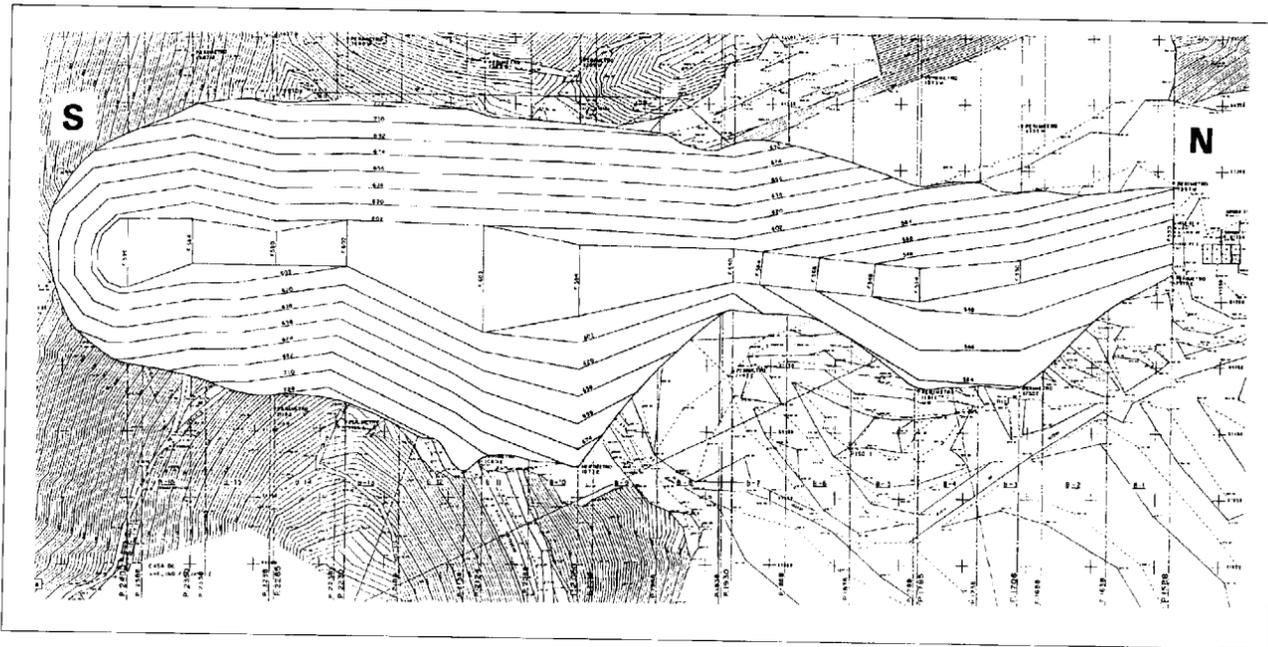


Figura 6. Vaciado correspondiente a una variante geométrica de la explotación.

El proceso de las distintas cubicaciones es como sigue.

-Cubicación por perfiles.

Se utilizan los perfiles con la representación de los taludes de la variante de mina correspondiente. En la medida en que no sean perpendiculares a la traza del perfil, debe adecuarse la inclinación de los taludes dibujados en ellos a los valores aparentes que geoméricamente resulten. La cubicación del carbón y del estéril de intercampa de cada subbloque por metro lineal, R , se obtiene a partir de los perfiles más próximos por cada uno de los laterales, ponderando sus tonelajes/volúmenes por metro lineal, R_i , en función del inverso del cuadrado de la distancia de cada perfil al eje del subbloque, d_i , (Figura 5), es decir:

$$R = \frac{\sum_i \frac{R_i}{d_i^2}}{\sum_i \frac{1}{d_i^2}}$$

Con esta función se consigue que el peso de los datos de cada uno de los perfiles utilizados dependa de la distancia existente entre ellos y el eje del bloque, siendo superior el peso del perfil que se encuentra más cercano.

El exponente 2 que se aplica a la distancia es el que estadísticamente resulta más adecuado para representar este fenómeno.

El Cuadro 1 muestra para cada bloque de cubicación los perfiles utilizados y las distancias consideradas. El Cierre Sur, dada su peculiar geometría, se cubica directamente.

En la práctica, en cada perfil geológico se trazan los taludes que corresponden a cada variante geométrica considerada y se divide la zona bajo la cota de alteración superficial en bancos de 6 m de altura a las cotas de referencia.

En cada banco se superficializa con un planímetro tanto el estéril como el carbón. Aplicando el valor de la densidad y el factor de remanencia al carbón en las zonas explotadas, se obtiene la cubicación de las brutas de carbón y m^3 de estéril por metro lineal de cada perfil.

BLOQUE DE CUBICACION	PERFILES DATO	DISTANCIA AL EJE DEL BLOQUE	BLOQUE DE CUBICACION	PERFILES DATO	DISTANCIA AL EJE DEL BLOQUE
1	1.588 1.705	25 m 63 m	10	2.090 2.124	13 m 61 m
2	1.588 1.705	75 m 43 m	11	2.090 2.124	69 m 11 m
3	1.705 1.785	7 m 73 m	12	2.124 2.230	39 m 67 m
4	1.705 1.785	57 m 23 m	13	2.124 2.230	89 m 17 m
5	1.785 1.930	28 m 117 m	14	2.230 2.285	53 m 22 m
6	1.785 1.930	78 m 67 m	15	2.285 2.308	28 m 37 m
7	1.785 1.930	138 m 17 m	16	2.308 2.400	13 m 37 m
8	1.930 2.090	33 m 67 m	CERRIE SUR	CUBICACION DIRECTA	
9	1.930 2.090	63 m 27 m			

Cuadro 1. Distancia de los perfiles geológicos a los ejes de los bloques de cubicación.

Los Cuadros 2 y 3 muestran las cubicaciones de dos perfiles concretos (P-2.124 y P-2.230), que se utilizan para cubicar un bloque determinado (el número 12) para la variante de explotación que se representa en la Figura 6. Los tonelajes/volúmenes por metro lineal, R_i , son los que se indican en los Cuadros respectivos citados, por banco; las distancias que ponderan, d_i , son 39 m (P-2.124) y 67 m (P-2.230), como se aprecia en el Cuadro 1, o en el encabezamiento de los correspondientes a cada perfil (Cuadros 2 y 3). A partir de estos datos, cada par de valores, banco a banco, se promedia en función de la distancia de la forma que se ha indicado. El valor resultante, que expresa la cubicación ponderada del perfil en el banco respectivo por unidad de anchura del bloque, se multiplica por ésta, que es precisamente 50 m, obteniéndose la cubicación del carbón y del estéril de intercampa en el subbloque en cuestión. El Cuadro 4 muestra el resultado de la cubicación del bloque 12, la cual está discretizada conforme requiere el estudio de planificación.

Como evidencia el Cuadro 1, el mismo par de perfiles puede utilizarse para cubicar bloques diferentes. El elemento diferencial es la situación relativa de ambos respecto al eje del bloque en cuestión, lo que da lugar a distintas distancias de ponderación d_i , o lo que es igual, a distinto peso de las cubicaciones de cada uno de los perfiles en el bloque.

-Cubicación por plantas horizontales.

Al cubicar por este sistema se pretende reflejar, con la máxima fidelidad posible, las irregulari-

BANCO	CARBON (t)		ESTERIL INTERCP. (m3ap)	RATIO MEDIO (m3ap/tv)	
	CAPA I				TOTAL
	Rama E	Rama W			
728				0,0	
722				0,0	
716				0,0	
710	18,1	8,8	26,9	11,7	38,6
704	15,8	17,6	33,4	74,3	107,7
698	18,1	17,6	35,7	90,1	125,8
692	19,4	17,6	37,0	90,1	127,1
686	21,6	17,6	39,2	90,1	129,3
680	21,6	17,6	39,2	90,1	129,3
674	19,4	17,6	37,0	90,1	127,1
668	18,1	17,6	35,7	90,1	125,8
662	18,1	17,6	35,7	84,2	119,9
656	19,4	17,6	37,0	60,8	97,8
650	21,6	17,6	39,2	50,4	89,8
644	23,1	17,6	40,7	50,4	91,1
638	26,6	25,2	51,8	50,4	102,2
632	30,2	25,2	55,4	48,2	103,6
626	33,8	25,2	59,0	48,2	107,2
620	33,8	25,2	59,0	48,2	107,2
614	37,4	25,2	62,6	46,8	109,4
608	39,6	25,2	64,8	46,8	111,6
602	43,2	32,4	75,6	46,8	122,4
596	50,4	32,4	82,8	16,8	99,6
590	50,4	32,4	82,8	82,8	760
584	36,1	32,4	68,5	68,5	688
578	36,1	33,8	69,9	69,9	612
572	39,6	33,8	73,4	73,4	568
566	39,6	37,4	77,0	77,0	490
560	40,5	39,6	80,1	80,1	421
554	51,8	39,6	91,4	91,4	353
548	54,1	39,6	93,7	93,7	281
542	50,4	48,6	99,0	99,0	187
536	64,8	51,1	115,9	115,9	107
530	14,1	12,1	26,2	26,2	99
TOTAL	1006,8	818,8	1825,6	1224,6	3050,2

Cuadro 2. Cubicación del perfil P-2.124.

BANCO	CARBON (t)		ESTERIL INTERCP. (m3ap)	RATIO MEDIO (m3ap/tv)	
	CAPA I				TOTAL
	Rama E	Rama W			
728				0,0	
722	23,1		23,1	23,1	
716	25,2		25,2	25,2	
710	25,2	17,6	42,8	14,4	
704	22,7	17,6	40,3	14,4	
698	20,2	17,6	37,8	14,4	
692	20,2	17,6	37,8	14,4	
686	20,2	17,6	37,8	15,8	
680	20,2	17,6	37,8	19,4	
674	17,6	17,6	35,2	33,8	
668	17,6	17,6	35,2	42,5	
662	18,4	20,2	38,6	44,3	
656	19,5	25,2	44,7	45,8	
650	19,5	25,2	44,7	49,5	
644	19,5	25,2	44,7	54,1	
638	19,5	25,2	44,7	58,1	
632	21,1	25,2	46,3	61,8	
626	21,1	25,2	46,3	66,1	
620	23,4	25,2	48,6	81,6	
614	23,4	25,2	48,6	87,2	
608	23,4	25,2	48,6	88,0	
602	23,4	25,2	48,6	96,0	
596	23,4	25,2	48,6	15,1	
590	23,4	25,2	48,6	48,6	
584	23,4	26,6	50,0	50,0	
578	23,4	28,8	52,2	52,2	
572	23,4	30,2	53,6	53,6	
566	27,3	32,4	59,7	59,7	
560	27,3	33,8	61,1	61,1	
554	32,4	33,8	66,2	66,2	
548	33,8	33,8	67,6	67,6	
542	36,1	36,1	72,2	72,2	
536	47,3	50,4	97,7	97,7	
530	10,0	10,0	20,0	20,0	
TOTAL	775,6	779,3	1554,9	789,5	

Cuadro 3. Cubicación del perfil P-2.230

dades superficiales de la zona cuya topografía ha sido alterada por la explotación a cielo abierto actual.

Para la cubicación del estéril de recubrimiento se utilizan el vaciado de la mina y el plano topográfico de la explotación. A tal fin se han medido con planímetro las áreas correspondientes a la parte superior e inferior de cada banco de 6 m, a las cotas de referencia, cada una de las cuales está limitada por la isolinia de la cara del talud y la curva de nivel topográfico correspondientes. Estas áreas se miden desde la superficie hasta la cota del plano que divide el estéril de recubrimiento del de intercapa.

El volumen del todo uno de cada banco se calcula promediando los niveles de muro y techo y multiplicando por la altura de la planta (6 m). A la cantidad resultante se le deduce el volumen del correspondiente carbón in situ, calculado por el método anterior, con lo que se obtiene el volumen de estéril en cada bloque. Estos valores se llevan directamente a la columna correspondiente del Cuadro 4, que se integra en la cubicación general del bloque.

-Resultados de la cubicación por bloque

El Cuadro 4 resume, para un bloque, determinado, la cubicación completa del carbón y del estéril. En este caso el macizo está discretizado en 21 recintos (bancos), que todavía pueden subdividirse más considerando la cubicación individualizada cada capa y del estéril. Así, en cada banco, la cubicación se desglosa en doce conceptos distintos, con lo cual se consigue el objetivo de tener la información atomizada conforme requiere la planificación.

Los Cuadros resumen, por bloque, permiten conocer el comportamiento del yacimiento en profundidad. Por poner un ejemplo, en el Cuadro 4 se aprecia la mayor importancia relativa de la Capa II sobre la Capa I (prácticamente el doble de reservas), la pequeña cuantía de las reservas en la Rama W de la Capa I o la evolución a mejor del ratio medio a medida que se profundiza, aspectos estos que son de gran interés para el desarrollo conceptual y cuantitativo de la planificación.

-Cubicación de las variantes de explotación.

La integración de los Cuadros representativos

BANCO	CARBON (t)			ESTERIL (m3ap)			RATIO MEDIO (m3ap/tv)		
	CAPA I		CAPA II	TOTAL	TOTAL	INTERCP.	RECUBR.	TOTAL	ACUMUL.
	Rama E	Rama W							
728									
722							11012	11012	11012
716	319		319				52986	52986	63998
710	995	551	1546	619	2185	2484	88436	88436	152434
704	877	880	1757	2957	4714	7198	91316	91316	243750
698	932	880	1812	3547	5359	12557	92878	92878	336628
692	980	880	1860	3547	5407	17984	89587	89587	426195
686	1062	880	1942	3565	5507	23471	86431	86431	512628
680	1062	880	1942	3610	5552	29023	82909	82909	595535
674	947	880	1827	3793	5620	34643	80453	80453	675988
668	899	880	1779	3903	5682	40325	78617	78617	752605
662	909	913	1822	3705	5527	45852	73718	73718	826323
656	971	976	1947	2850	4797	50649	71354	71354	897677
650	1053	976	2029	2509	4538	55187	67292	67292	964969
644	1109	976	2085	2567	4652	59839	64864	64864	1029833
638	1240	1260	2500	2617	5117	64956	61703	61703	1091536
632	1395	1260	2655	2582	5237	70193	57718	57718	1149254
626	1529	1260	2789	2637	5426	75619	54417	54417	1203671
620	1558	1260	2818	2633	5651	81270	50866	50866	1254537
614	1693	1260	2953	2472	5425	86895	48057	48057	1302594
608	1775	1260	3035	2246	5281	91976	44812	44812	1347408
602	1909	1529	3438	2348	5786	97782	41450	41450	1388856
596	2178	1529	3707	818	4525	102287	39626	39626	1428482
590	2178	1529	3707		3707	105994	37140	37140	1465622
584	1844	1547	3191		3191	108185	33717	33717	1499339
578	1644	1627	3271		3271	112456	30119	30119	1529458
572	1775	1844	3419		3419	115875	27691	27691	1557149
566	1824	1807	3631		3631	119506	23969	23969	1581118
560	1858	1907	3765		3765	123271	20594	20594	1601712
554	2345	1907	4252		4252	127523	17220	17220	1618932
548	2448	1907	4355		4355	131878	13734	13734	1632666
542	2339	2272	4611		4611	136489	9401	9401	1642067
536	3019	2546	5565		5565	142054	5312	5312	1647379
530	653	578	1231		1231	143285	4292	4292	1651671
TOTAL	47119	40441	87560	55725	143285	143285	1407921	243750	1651671

Cuadro 4. Cubicación del bloque 12

de los 17 bloques y el Cierre Sur proporciona la cubicación total de cada variante estudiada.

A la vista de los resultados de las mismas, y conociendo los criterios de selectividad específicos empleados en cada una de ellas, se está ya en disposición de seleccionar la más favorable, la cual será planificada hasta su agotamiento.

CONCLUSIONES

Se ha cubicado un yacimiento de carbón, geológicamente complejo y muy condicionado por diversas causas externas e internas al mismo, por medio de los métodos de evaluación tradicionales, lo que ha permitido resolver un problema de

ingeniería minera satisfactoriamente. Dichos métodos se han preferido a otros más modernos y sofisticados, ante la duda razonable de que éstos últimos no pudieran resolver adecuadamente el problema en tiempo y contenido. El resultado final ha demostrado que los métodos de cubicación antiguos, combinados con el empleo de medios informáticos suficientes, pueden tener aún plena vigencia y sustituir en determinadas circunstancias a otros desarrollados posteriormente.

REFERENCIAS

ALONSO, T. (1990): Valoración de la zona sur del Sector de Buseiro. Estudio Técnico para González y Díez, S.A.

E.N. ADARO (1993): Investigación González y Díez, S.A. Zona Buseiro. Estudio Técnico para González y Díez, S.A.

E.N. ADARO (1993): Estudio geotécnico y de estabilidad de la corta Buseiro (Tineo, Asturias). Estudio Técnico para González y Díez, S.A.

GONZALEZ Y DIEZ, S.A. (1990) Plan de explotación a cielo abierto. Sector Buseiro. Informe interno.

ORCHE, E., BARRAS, F. (1994): Proyecto de explotación a cielo abierto de la zona de Buseiro. Estudio Técnico para González y Díez, S.A.

Original recibido: Noviembre de 1994.

Original aceptado: Enero de 1995.

Características edáficas condicionantes de la vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas situadas bajo fluvisoles calcáricos (*)

Por L. MORENO MERINO (**), C. GONZALEZ HUECAS (***) y A. LOPEZ LAFUENTE(***)

R E S U M E N

Se presenta un estudio de vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas basado en una visión edafológica del problema. Para ello se ha seleccionado una zona con el nivel freático suficientemente cercano a la superficie del terreno (1 a 3 metros) de forma que pueda asegurarse que los procesos de depuración se van a producir en su mayor parte en el suelo. Se ha procedido al estudio de los perfiles seleccionados por medio de las técnicas clásicas de caracterización edafológica, pero haciendo una interpretación novedosa, encaminada en todo momento, no a la clasificación genética de los perfiles ni a su idoneidad agrícola, sino a su comportamiento como protectores del agua subterránea frente a las agresiones potencialmente contaminantes.

Palabras clave: Fluvisoles calcáricos, Aguas subterráneas, Vulnerabilidad, El Encín.

A B S T R A C T

A study of vulnerability of ground water based on an pedologic view of the problem is presented. To do this, the study of one area with a piezometric level close enough to the surface is selected, in such degree that the purification processes will take part in the greatest zone of the vadose zone. Profiles selected were studied under classical techniques of edafologic characterization, but the interpretation is newness, focusing always the behaviour of how ground water is protected against contaminants potentially aggressive, instead the study of genetic identification of profiles or the study of agricultural fitness.

Key words: Calcaric Fluvisols. Ground Water. Vulnerability. El Encín.

OBJETIVOS

El trabajo se plantea con un doble objetivo, de un lado demostrar que los estudios clásicos de Edafología son adecuados, y en muchos casos suficientes para cuantificar la influencia del sue-

lo sobre la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación, lo que permite, por una parte emplear técnicas que no son complejas ni caras y por otra aprovechar la gran cantidad de análisis de suelos (de capacidad agrícola o puramente genéticos) disponibles para su reinterpretación en vista a la realización de la cartografía de vulnerabilidad.

Un segundo objetivo ha sido aplicar de forma práctica la metodología propuesta en la caracterización como depuradores de unos suelos concretos, en este caso Fluvisoles calcáricos situados en El Encín (provincia de Madrid).

(*) Este trabajo ha sido realizado en el marco del convenio de colaboración entre la Universidad Complutense de Madrid y el Centro Experimental del Encín perteneciente a la CAM.

(**) Instituto Tecnológico Geominero de España.

(***) Departamento de Edafología UCM.

INTRODUCCION

La vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación, viene condicionada por un numeroso conjunto de factores que interactúan de forma compleja. Entre dichos factores pueden citarse las características de la formación acuífera (porosidad, permeabilidad, materiales constitutivos, gradiente hidráulico) propiedades del recubrimiento (suelo y zona no saturada) y otros condicionantes externos, principalmente relacionados con los regímenes térmicos y pluviométricos; además, claro está, de la propia naturaleza de los focos contaminantes. La importancia de disponer de una herramienta eficaz para cuantificar la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación es evidente, no sólo en trabajos generales de protección de los acuíferos frente a la contaminación, sino especialmente en trabajos de detalle como puede ser la cartografía de orientación al vertido, elaboración de perímetros de protección de captaciones destinadas al abastecimiento, planificación, gestión del uso de fitosanitarios, etc.

El primer intento de establecer una metodología de estudio de vulnerabilidad que integre todas las variables importantes, es el sistema DRAS-TIC diseñado para elaborar cartografía de vulnerabilidad frente a la contaminación por los plaguicidas empleados en agricultura, en el cual el suelo es considerado como un factor esencial pero a nuestro parecer tratado de forma excesivamente simplista. Hay que tener en cuenta que el suelo es la primera barrera que debe atravesar el agua en su viaje hacia los acuíferos, y de estos hacia el cauce de los ríos y manantiales o los pozos de abastecimiento y que en numerosas ocasiones es la única barrera, como el modelo elegido para este estudio, en el que el nivel freático está muy cerca de la superficie del terreno (1 a 3 metros).

MATERIALES Y METODOS

Se han seleccionado seis perfiles representativos de la zona en estudio, elegidos en base a las variaciones de vegetación y la distancia al cauce fluvial, pues no existe ningún otro criterio morfológico o fisiográfico diferenciador, manteniendo constantes los demás factores formadores. Los perfiles se han dividido en horizontales en

base a criterios edafológicos de variaciones de textura, estructura y color, tomándose tres muestras representativas de cada uno de ellos, una para la realización de análisis generales, caracterización y clasificación de los suelos, una segunda de volumen conocido, para determinar la conductividad hidráulica (en cilindros de latón de 60 mm de diámetro, 70 mm de longitud y pared de 1 mm, lo que supone un volumen útil de 184,914 ml) y una tercera muestra empleada en el cálculo de la humedad y densidad aparente.

Sobre todas las muestras se han hecho las determinaciones recogidas en la tabla 1 mediante las técnicas que se señalan.

CARACTERIZACION DE LA ZONA DE MUESTREO

El relieve del área en estudio es prácticamente llano, como corresponde al carácter aluvial de estos terrenos, la cercanía al río facilita su inundación durante las avenidas, pero no se han detectado fenómenos asociados con la humedad, debido seguramente a lo infrecuente de estos episodios, a la posición del nivel freático a más de 150 cm de profundidad, y a las extracciones de aguas subterráneas que impiden su ascenso.

Los materiales sobre los que se han tomado las muestras corresponden a los más recientes, cuaternario, ampliamente representados en su entorno, aunque con espesores reducidos comparados con las series neógenas aflorantes. Se sitúa en un valle fuertemente disimétrico con un modelo de terrazas a la derecha. En la margen izquierda, que es la cuesta del páramo hay un importante complejo de glaciares cubiertos y de acumulación, encajados unos en otros.

Hidrogeológicamente la finca se encuentra en el sistema acuífero N° 14 según la nomenclatura del ITGE denominado Terciario Detrítico de Madrid Toledo Cáceres, y según la nomenclatura del MOPU en la Unidad Hidrológica N° 4 de la cuenca del Tajo. El sistema está formado por un conjunto de lentejones irregulares de gravas y de arenas arcillosas de escasa permeabilidad distribuidos en una matriz arcillosa-arenosa de mucha menor permeabilidad, a nivel local se trata de un acuífero superficial, libre, formado por materiales arenosos, que se recargan por infiltración del agua de lluvia y se descargan hacia

DETERMINACIÓN	TÉCNICA ANALÍTICA
pH en Agua.	ISRIC 1987.
pH en Cloruro Potásico.	ISRIC 1987.
Capacidad Tampón.	Duchoufour 1987 modificado.
Contenido en Carbonatos.	Método gasométrico, Cobertera 1993.
Carbono orgánico.	Técnica de Walkley y Black.
Materia orgánica.	Carbono orgánico x 1,724.
Nitrogeno Kjeldal.	Modificación de Bouat y Crouzet 1965.
Permeabilidad alterada.	ISRIC 1987.
Permeabilidad inalterada.	A. Klute 1986.
Densidad Aparente.	Blake en Adams 1974.
Densidad Real.	Lopez Ritas modificado 1990.
Caracterización de Arcillas.	Difractometría de rayos X. Brindley y Brown 1980.
Conductividad eléctrica.	Lopez Ritas 1990.
Análisis granulométrico.	Método internacional o de Atteburg, ISRIC 1987.
Porosidad Total.	Cálculo a partir de d. real y aparente.
Porosidad Eficaz.	Método de correlación granulométrica Briggs y Shatz 1967.
Capacidad de Cambio Catiónico.	Desplazamiento con acetato amónico ISRIC 1987.
Poder Depurador del Terreno.	Según Rhese 1977 y Drastic (EPA) 1985.

Tabla 1.-Determinaciones realizadas y técnicas analíticas.

el río, salvo en puntos localizados en los que se invierte el flujo de agua debido a los bombeos.

La vegetación característica es la propia de las terrazas próximas al río Henares, en las que la serie climatofila basófila de la encina es sustituida por las comunidades que constituyen la cadena riparia basófila de los ríos mediterráneos. La serie completa, sería, partiendo de las zonas más alejadas del cauce fluvial, las siguientes: primero la serie mesomediterránea manchega y aragonense basófila de la encina, a ésta le sustituye la serie edafófila del olmo (*Aro italicum-Ulmetum minoris*), a ésta le sigue la serie edafófila del álamo blanco (*Rubio tinctoriae Populetum albae*) que ocupa las terrazas aluviales bajas, más próxima al río se desarrolla la serie edafófila del sauce frágil (*Salicetotriando fragilis*) dando paso, por último, a la vegetación permanente de los cañaverales (*Scirpo lacustris Phragmitetum mediterranea-*

neum) y juncales de glicerías (*Glycerio plicatae Sparganietum mediterraneum negloti*).

La mayoría de la finca se encuentra cultivada a excepción de la superficie comprendida entre el camino del soto y el río Henares, así como la ribera de dicho río en su parte sur. En el cultivo se alteran zonas de secano y de regadío.

El estudio climatológico se ha realizado en base a los datos disponibles de la estación de "Alcala de Henares, El Encín" y en los datos del texto sobre El Encín publicados por el Ministerio de Agricultura. En las tablas 2 y 3 se muestran los resultados del cálculo de la ETP por el método de THORWAITE (1957) y la ficha climática, en la figura 1 se representan gráficamente estos resultados. Los meses más cálidos son Julio y Agosto (medias de 24,4 y 23,4°C respectivamente) y los más fríos Enero y Diciembre (medias de 5,2 y 6,2°C respectivamente). La precipitación media anual para el período considerado es de

Mes del año	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Tª media anual	5,2	6,9	10	10,6	16	20,6	24,7	23,4	20,2	14,5	9,27	6,2
Índice de calor	1	1,6	2,8	3,1	5,8	8,5	11	10,3	8,2	5	2,5	1,4
Suma Ic	61,6											
e	0,4	0,7	1,1	1,2	2,2	3,2	4	3,8	3,15	1,9	0,9	0,5
N	9,7	10,6	12	13,3	14,4	15	14,7	13,7	12,5	11,2	10	9,4
ETP	10,6	15,9	35,2	40,6	84,6	120	156	139	98,4	56,8	24	12,5

Tabla 2.-Cálculo de la Evapotranspiración.

Mes del año	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8
Temperatura media	20,2	14,5	9,27	6,23	5,2	6,9	10	10,6	16	20,6	24,7	23,4
Precipitación media	41,1	60,9	42	46,5	36,7	34	12,7	65,3	36,6	20,7	23,8	7,9
ETP	98,4	56,8	24	12,5	10,6	15,9	35,2	40,6	84,6	120	156,2	138,6
Variación de la reserva	0	4,1	18	34	26,1	18,1	-23	24,8	-48	-100	0	0
Reserva	0	4,1	22,1	56,1	82,3	100	77,4	102	54,2	0	0	0
ETA	41,1	56,8	24	12,5	10,6	15,9	35,2	40,6	84,6	120	23,76	7,88
Falta de agua	57,3	0	0	0	0	22,5	0	48	99,7	132,4	130,7	
Exceso de agua	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0
Desagüe	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
Coef. de humedad	-0,58	0,07	0,75	2,71	2,46	1,14	-0,6	0,61	-0,6	-0,8	-0,85	-0,84

Índice aridez/humedad	58,2	-7,3	-75	-271	-246	-114	64	-61	56,7	82,8	84,8	94,3
Índice de aridez	61,8	Índice de exceso		-36,8								
Índice de exceso	0,25	ETP total		793,8								

Tabla 3.-Ficha climática de la estación "Alcala de Henares, El Encín".

Perfil	Horizonte	Prof.	Situación	Altitud (msnm)	Drenaje	Color Seco	Color Humedo	Textura	Estructura ¹	Porosidad	Calcáreo.	Raíces.	Restos vegetales	Límite inferior
EI		2-0	40°31'04"N 03°17'03"W	595	Clase 5	Forma								
	Au1	0-5				10YR 3/4	10YR 2/4	Arenosa	GFD	Elevada	Si	Abundantes	Abundantes	Neto y plano
	Au2	5-21				10YR 5/2	10YR 4/2	Arenosa	GF	Baja	Si	Frecuentes	Escasos	Difuso y plano
	AC	21>50				10YR 6/4	10YR 4/4	Arenosa	Sin.	Poca	Si	No	No	
EII		2-0	40°31'05"N 03°17'06"W	596	Clase 5	Forma								
	Au1	0-5				10YR 4/4	10YR 5/4	Ar. Franca	GFD	Elevada	Si	Abundantes	Abundantes	Neto y plano
	Au2	5-30				10YR 5/4	10YR 3/3	Ar. Franca	GFD	Elevada	Si	Frecuentes	No	Difuso ondulado
	AC	30>50				10YR 6/4	10YR 4/4	Ar. Franca	Sin	Media	Si	Pocas	No	
EIII	Ah	0-20	40°31'43"N 03°17'01"W	595	Clase 5	10YR 5/4	10YR 4/3	Ar. Franca	GF	Media	Si	Abundantes	Abundantes	Neto y plano
	AC1	20-50				10YR 5/4	10YR 4/4	Arenosa	GFD	Baja	Si	Pocas	No	Difuso y plano
	AC2	50>80				10YR 6/4	10YR 4/3	Arenosa	Sin	Muy baja	Si	No	No	
EIV	Ah	0-15	40°31'08"N 03°17'04"W	596	Clase 5	10YR 5/4	10YR 4/3	Arenosa	GF	Elevada	Si	Frecuentes	Si	Gradual plano
	C	15>80				10YR 5/4	10YR 4/3	Arenosa	GF	Baja	Si	Pocas	Si	Difuso plano
EV	Au1	0-5	40°31'31"N 03°17'05"W	594	Clase 3	10YR 5/3	10YR 4/2	Fr. Limosa	GF	Alta	Si	Abundantes	Si	Neto plano
	Au2	5-20				10YR 5/4	10YR 4/3	Fr. Limosa	LF	Baja	Si	Abundantes	Si	Gradual plano
	C	20>50				10YR 5/4	10YR 4/3	Franca	LF	Media	Si	Muchas	No	
EVI	Au1	0-5	40°31'34"N 03°17'02"W	596	Clase 3	10YR 5/2	10YR 4/2	Fr. Arenosa	GF	No	Si	Abundantes	Abundantes	Neto plano
	Au2	5-30				10YR 5/3	10YR 3/2	Fr. Arenosa	GF	Pocos	Si	Abundantes	No	Gradual Plano
	AC	30>80				10YR 5/4	10YR 4/3	Fr. Arenosa	GF	Muy pocos	Si	Frecuentes	No	

Todos los perfiles han sido clasificados como Fluvisoles Calcáreos (FLc). En ningún perfil se ha detectado la presencia de piedras o afloramientos rocosos, tampoco evidencias de erosión. La pendiente en todos ellos es menor al 2%. Su origen es común, depósitos aluviales calcáreos.
Estructura: G= Granular, F= Fina, D=Débil, L=Laminar.

Tabla 4.-Situación y características morfológicas principales de los perfiles.

fácil comparación de los resultados entre suelos de diferente naturaleza.

En los primeros 5 centímetros de los perfiles se encuentran los mayores porcentajes de materia orgánica. Se trata de restos vegetales apenas transformados, consistentes en fragmentos de hojas, ramas y raíces. Como es de esperar el carbono orgánico total es muy elevado en el primer horizonte de todos los perfiles (entre el 9% y el 16%) salvo en EIII y EIV en los que es algo más reducido (próximo a 3,5%). Los restos vegetales se unen entre sí por mediación de los materiales más finos (arcillas, limos, materia orgánica más transformada y diversos cationes) que hacen de cemento dando lugar a una estructura de muy elevada permeabilidad, condicionando la aparición de una porosidad secundaria con un diámetro de poro muy grande, que si bien ocupa un espesor pequeño, es suficiente para disminuir de forma notable la escorrentía superficial, cuando las lluvias no son intensas, facilitando la infiltración del agua.

En profundidad el contenido en carbono orgánico desciende bruscamente no acumulándose a este nivel, pues los fenómenos de lavado de la materia orgánica apenas son perceptibles en estos suelos, de forma que más allá de 50 cm. los valores medidos no superan nunca el 2%. Sin embargo, la situación fisiográfica de los terrenos, en la llanura de inundación del río, hace que el aporte de nuevos materiales de aluvión entierre horizontes orgánicos superficiales que luego pueden ser encontrados a notable profundidad.

La relación carbono/nitrógeno presenta una distribución lógica, siendo mayor en los perfiles superiores y descendiendo en profundidad; únicamente el perfil EIII muestra un comportamiento anómalo al estar invertidos los valores medidos respecto al resto de las muestras (también se produce en otras determinaciones y como veremos parece deberse a la acción humana); el descenso en la relación C/N es notable al pasar de los horizontes más superficiales (C/N entre 16 y 21) a los más profundos (C/N normalmente me-

ALCALA DE HENARES. EL ENCIN

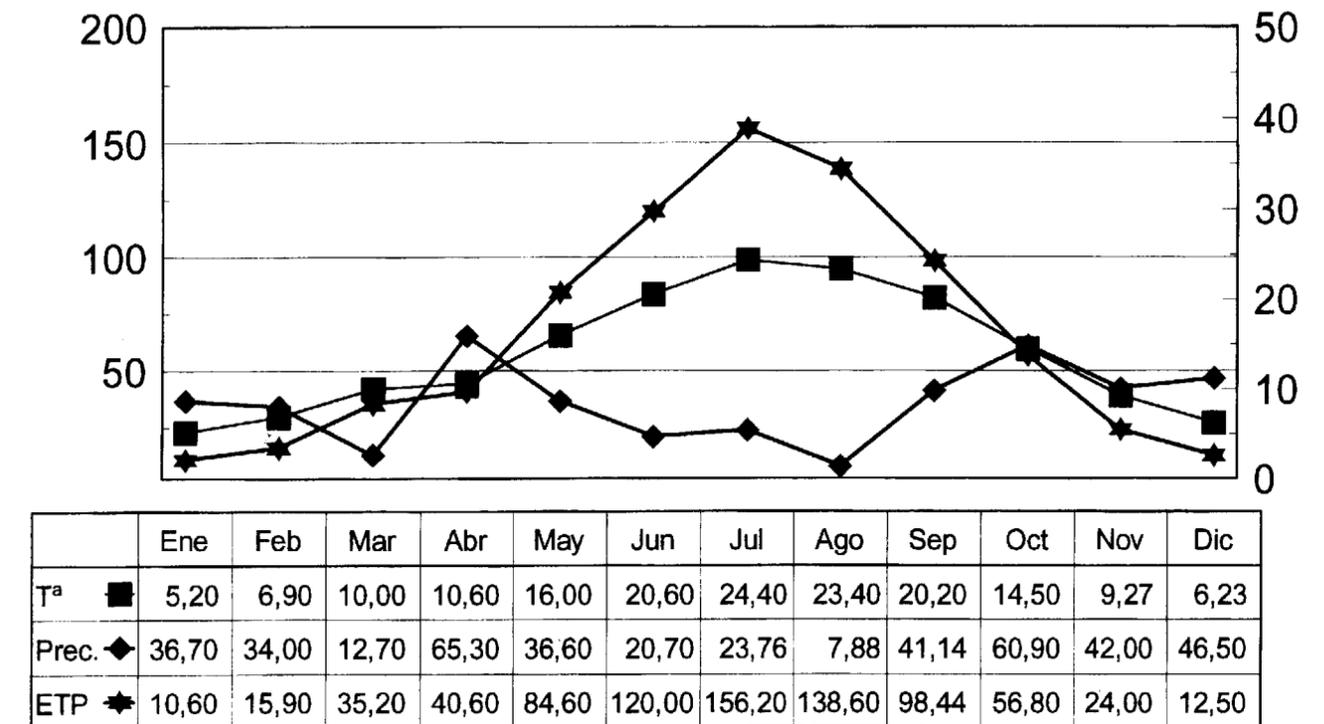


Figura 1.-Características climáticas de la zona del Encín.

Perfil	Horizonte	pH Agua	pH KCl	Carbonatos %	Carbono %	MO %	N %	C/N	Perm. Alt. (cm/h)	Perm. Inalt. (cm/h)	D. Apa (g/cc)	D. Real (g/cc)	Conductividad (mS/cm)	CIC (cmol/kg)	Por. Tot. (%)	Por. Ef. (%)
EI	Au1	7	6,6	7,67	9,98	17,21	0,47	21,16				2,52	0,86	17,82		
	Au2	7,7	7,2	8,16	2,32	4,01	0,12	19,39	21	19,4	1,09	2,68	0,33	7,72	59,57	46,86
	AC	7,7	7,3	9,8	1,45	2,49	0,12	12,04	14,1	14,7	1,23	2,73	0,47	6,83	54,95	47,01
EII	Au1	7,4	6,8	8	11,36	19,59	0,62	18,4				2,52	0,36	15,14		
	Au2	8	7,2	8,96	3,02	5,2	0,18	16,55	6	7,5	1,25	2,69	0,2	10,1	53,55	36,74
	AC	8	7,3	9,8	0,57	0,98	0,16	3,51	3,8	3,5	1,4	2,73	0,28	7,42	48,63	35,59
EIII	Ah	7,7	7	8,98	3,64	6,27	0,22	16,34	6,5	6,4	1,32	2,67	0,19	11,88	50,64	32,67
	AC1	7,7	7,2	8,49	1,83	3,16	0,11	15,94	8	6,2	1,29	2,72	0,15	8,91	52,54	39,34
	AC2	8	7,2	8,65	2,06	3,54	0,1	20,68	13,2	10,4	1,23	2,68	0,2	8,61	54,14	43,97
EIV	Ah	7,7	7,2	8,65	3,42	5,89	0,19	18,21	8,6	16,6	1,12	2,69	0,34	7,72	58,51	45,91
	C	8	7,3	8,33	0,45	0,78	0,09	5,21	4,9	4,8	1,4	2,69	0,19	7,13	48,04	37,34
EV	Au1	7,2	6,7	8,82	13,34	22,99	0,59	22,72				2,45	0,71	30,29		
	Au2	7,5	6,9	11,43	5,2	8,97	0,36	14,3	4	4,7	1,18	2,65	0,29	21,38	55,46	
	C	7,6	7	12,73	1,17	2,01	0,15	7,9	0,9	1,2	1,35	2,74	0,25	17,22	50,6	
EVI	Au1	7,5	6,9	8,65	16,14	27,83	0,73	21,97				2,39	0,36	26,72		
	Au2	7,6	7	9,8	6,2	10,69	0,58	10,64	3,3	13,5	1,05	2,65	0,32	20,19	60,3	27,81
	AC	7,7	7,2	10,45	1,7	2,92	0,2	8,65	1,8	2	1,27	2,75	0,29	13,66	53,79	22,05

Tabla 5.-Resumen de los resultados analíticos.

nor de 10 salvo en el horizonte AC2 del perfil EIII en el que llega a 20,68) lo que significa que los restos vegetales aportados al suelo son mineralizados con cierta dificultad debido, posiblemente, al elevado contenido en calcio de los perfiles.

El contenido en materia orgánica y, en estos suelos en menor medida, la arcilla, son responsables de la capacidad de cambio catiónico total que presenta una distribución similar en todos los perfiles; los valores no varían mucho si exceptuamos el horizonte Ah del perfil EIV cuya CIC es aproximadamente la mitad que la de los horizontes equivalentes de los perfiles EI, EII y EIII debido a que su contenido en materia orgánica es también menor, y en EV y EVI en los que el importante incremento en la cantidad de arcilla produce un aumento proporcional de la CIC. El hecho de que en estos suelos la CIC disminuya notablemente con la profundidad (al igual que la MO), corrobora la hipótesis de que la capacidad de cambio sea debido principalmente a los coloides orgánicos y no a los inorgánicos.

Sin embargo es preferible que las posiciones de cambio se encuentren en las arcillas, pues los contaminantes unidos a MO pueden ser liberados si esta se biodegrada.

Los valores del coeficiente de correlación hacen suponer que la técnica empleada en la determinación granulométrica haya provocado que el limo medido corresponde en buena parte con la arcilla de mayor tamaño, pues si no, sería difícil de entender la mayor correlación de la CIC con el limo que con la arcilla (figura 2).

La porosidad es responsable de la circulación de fluidos a través del suelo, una porosidad elevada implica (si el diámetro de poro es suficiente) una circulación rápida del agua, el lavado inten-

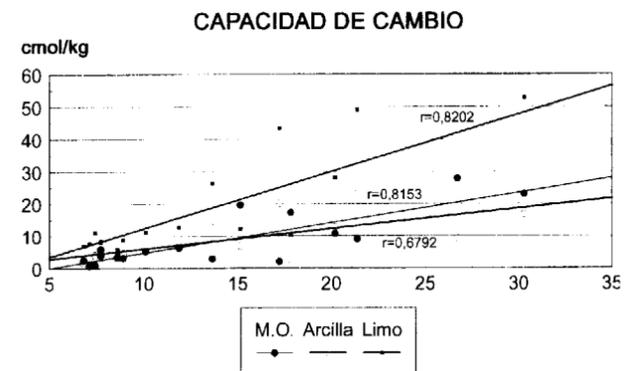


Figura 2.-Correlación CIC, materia orgánica, arcilla y limo.

so de los contaminantes y una aireación adecuada del suelo lo que permite el desarrollo de una flora aerobia activa. Los valores calculados para la porosidad total son relativamente elevados en términos absolutos, esto es debido a varios factores entre los que pueden destacarse:

a) la distribución granulométrica de la muestra, en especial el predominio de un tamaño de partícula sobre el resto (arena fina en los cuatro primeros perfiles y limo en los dos restantes). Un tamaño homogéneo aumenta la porosidad porque resulta menos eficaz el empaquetamiento de las partículas. Cuando hay varias clases granulométricas los clastos más finos se interponen entre los más gruesos, rellenando los poros que de otra forma quedarían vacíos. Reseñar también que las partículas más finas interpuestas entre las de mayor diámetro reducen notablemente la porosidad eficaz.

b) La forma del grano, predominantemente redondeada.

c) La formación de agregados con la materia orgánica, responsable de la formación de numerosos huecos.

La porosidad total, es muy homogénea, algo mayor en los horizontes superficiales (salvo en EIII en el que la distribución está invertida). La máxima medida es de 60,3% en el horizonte Au2 del perfil EVI y la mínima 48,04% en el horizonte Au2 del perfil EIV, lo cual significa una diferencia de 12,26, es decir un 20,33% sobre el mayor de los valores, lo que evidentemente no explica por sí solo la variabilidad de la permeabilidad inalterada, que oscila entre 1,2 y 19,4 cm. h⁻¹ en sus valores extremos (1616,6% sobre el valor mayor).

La conductividad hidráulica general de los perfiles puede ser considerada como moderadamente rápida en los horizontes EI a EIV, y lenta en EV y EVI. Esta permeabilidad viene condicionada sin duda por la granulometría dominante, arenosa a arenosa franca en el primer caso y franco limosa a franco arenosa en el segundo.

Si bien la variabilidad de la permeabilidad interperfiles no es muy elevada si comparamos idénticos horizontes (dentro de cada uno de los grupos anteriormente expuestos), la variabilidad intra-perfiles es notable y merece un comentario más detallado.

Los factores que condicionan la permeabilidad de un sedimento son puramente geométricos (tamaño y distribución de grano), en el caso de los suelos naturales, a estos se añaden los factores responsables de la formación de estructuras (materia orgánica y arcilla principalmente) que pueden modificar drásticamente las características del espacio poral, de forma que la permeabilidad medida no tenga nada que ver con la que se deduciría de la distribución granulométrica.

En las muestras analizadas se observa una notable correlación entre la permeabilidad inalterada, la densidad aparente y la porosidad total confirmando claramente lo anteriormente expuesto (figura 3). No obstante puede plantearse la siguiente pregunta: si la estructura se debe principalmente a la acción de la materia orgánica y la arcilla, ¿porqué la permeabilidad muestra una correlación tan marcada con la densidad y mucho más baja con los otros dos factores?.

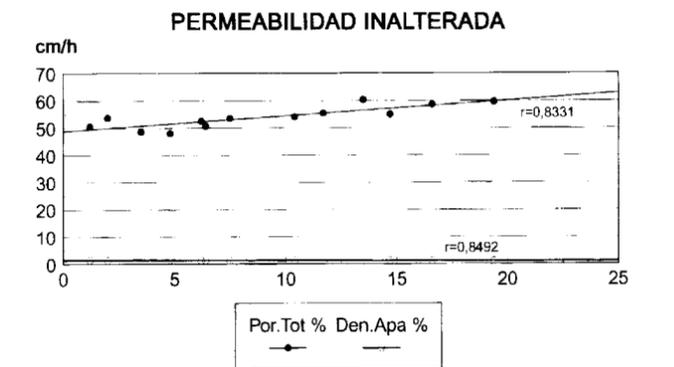


Figura 3.-Correlación permeabilidad inalterada, porosidad total y densidad aparente.

La elevada correlación con la densidad aparente se debe a que esta dependen directamente de la cantidad de espacios libres llenos de aire por los que puede circular el agua; la materia orgánica es responsable tanto de la disminución de la densidad total como de la aparente, pero el aumento de los poros y formación de estructura no sólo depende del contenido en materia orgánica, también de su distribución, disposición, gra-

do de maduración, y de otros factores como la actividad de la fauna del suelo, raíces, etc.

La permeabilidad alterada se mide después de destruir la disposición natural de los constituyentes que forman el suelo, por lo que debería depender principalmente de las características granulométricas, no obstante, como se emplea la fracción <2mm tras desecación al aire y ruptura mecánica de los agregados mayores, aún se mantienen agregados más pequeños, que hacen el efecto de una granulometría aparente más gruesa que la real. Los índices de correlación con las diferentes fracciones granulométricas, especialmente con la arcilla, arena fina y limo, ascienden notablemente, pero continúan manifestándose otros factores como el contenido en carbono orgánico que llegan a enmascarar la influencia de los anteriores.

En general la permeabilidad alterada e inalterada de los perfiles de textura más gruesa se mantiene muy similar (salvo en el caso del horizonte Ah del perfil EIV en el que es algo mayor, debido seguramente a la elevada estructuración de la muestra). La semejanza en dichos valores se debe a su estructura poco desarrollada y una textura relativamente gruesa, lo que da lugar a unos poros de diámetro elevado que facilitan el paso del agua. Sin embargo, en los perfiles EV y EVI, que son más arcillosos, la diferencia en los horizontes superficiales es notable pues la mayor parte de los poros por los que puede circular el agua son los causados por la formación de agregados o los debidos a la acción de las raíces o de la fauna del suelo; en los horizontes más profundos la diferencia es apenas significativa precisamente por la inexistencia de procesos favorecedores de la formación de poros de gran diámetro.

Es interesante observar cómo en la permeabilidad inalterada la relación con la densidad real y el carbono cede paso a la densidad aparente (figura 4), pues el efecto de la estructuración es dominante sobre cualquier otro, enmascarando la influencia de factores tan importantes como son la granulometría y la materia orgánica (aunque depende de ellos).

La textura dominante se encuentra entre arenosa y arenosa franca, si bien el perfil EV se aleja algo al presentar una estructura franco limosa y el EVI franco arenosa; llama la atención el domi-

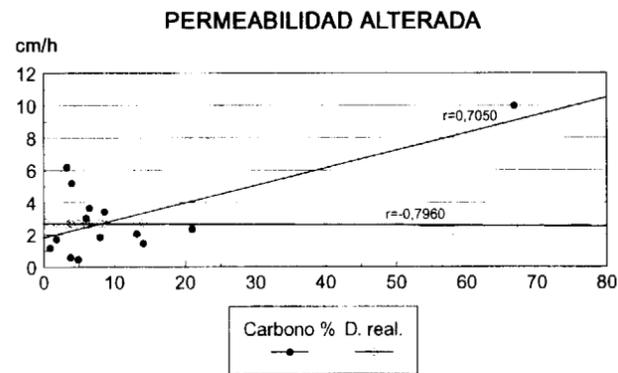


Figura 4.-Correlación permeabilidad alterada, carbono y densidad real.

nio de una fracción granulométrica sobre el resto dentro de cada perfil, en especial la arena fina, que en los perfiles E1 a EIV siempre supera el 60%, llegando a un máximo en el horizonte AC2 del perfil EIII con un 89,78%. En los perfiles EV y EVI, que son algo más finos, domina en el primero de ellos el limo y en el segundo la arena fina y el limo. Consecuencia de esta particular distribución granulométrica es la elevada permeabilidad de los suelos, no sólo por el tamaño relativamente grande de las partículas, sino también por su homogeneidad de tamaño, lo que supone un aumento del espacio libre por el que puede circular el agua.

La textura más fina que presentan los perfiles EV y EVI y las particulares condiciones que hubo en el momento de la sedimentación han causado una disposición en láminas, estructura claramente deposicional más que edafogénica, que contribuye notablemente a disminuir su conductividad hidráulica.

La densidad aparente muestra el efecto de la estructuración de la materia orgánica, y se relaciona directamente con la porosidad total; en general aumenta con la profundidad (salvo en el perfil EIII) y se mantiene en unos valores similares para horizontes equivalentes; muestra, como era previsible, una elevada correlación con la permeabilidad inalterada ($r = -0,8492$) pues la disminución de la densidad se debe principalmente al aumento de porosidad y de ésta se deriva una mayor permeabilidad. Además la per-

meabilidad inalterada se correlaciona fuertemente con la densidad aparente ($r = -0,8492$) que en cierta medida es un índice de la cantidad de poros, y no así con la densidad real en la que no intervienen los poros presentes en el suelo.

La disminución de la densidad de los horizontes superiores se debe a tres causas, que en los suelos en estudio muestran una importancia similar:

a) En primer lugar a la presencia de materia orgánica procedente de la vegetación, que tiene una densidad mucho menor que los minerales del suelo y al mezclarse con éstos produce una disminución de este valor.

b) A las estructuras debidas a la formación de agregados entre la materia orgánica, los restos vegetales y las partículas minerales del suelo.

c) Por último, a la presencia de raíces y actividad biológica (en nuestro caso era frecuente encontrar túneles debido a la actividad de lombrices, hormigas y pequeños escarabajos).

La densidad real evoluciona de forma similar a la aparente aunque, claro está, su valor es bastante más elevado. Puede observarse como en los horizontes más profundos las densidades reales son muy parecidas en todos los perfiles, cercano a 2,7 pues al descomponerse la materia orgánica tienden a aproximarse a la densidad del material original, mientras que en los horizontes superiores son bastantes diferentes, por ejemplo para el primer horizonte varían desde un mínimo de 2,393 en el horizonte Au1 del perfil EVI a un máximo de 2,691 en el horizonte Ah del perfil EIV.

La densidad real presenta una correlación notablemente elevada con el contenido en carbono ($r = 0,9821$) mientras que ésta disminuye en la densidad aparente, sin dejar de ser significativa; ello se debe a que la densidad real depende únicamente de la proporción de los componentes del suelo (materia mineral y materia orgánica), mientras que la densidad aparente depende de la disposición de estos componentes.

Los pH medidos, en agua y en cloruro potásico, son los normales en unos suelos sobre material calizo, saturados como muestra la diferencia de aproximadamente 0,7 unidades entre ambas determinaciones. La disminución del pH en los horizontes superiores se debe a la acción de la materia orgánica en descomposición que neutraliza

parte del carbonato de calcio presente y pone en libertad ácidos orgánicos de muy diversa naturaleza.

Los suelos calizos están en general bien tampoados respecto a los ácidos; el poder tampón depende de la riqueza en coloides y de su naturaleza, los suelos arenosos están muy poco tampoados y los húmicos y arcillosos mucho mejor. En las muestras estudiadas se observa una ruptura clara en la pendiente de la curva de neutralización en las proximidades del pH 7 y pH 4. Seguramente se deba, como explica RUELLAN (1987), al desplazamiento de los diferentes cationes del suelo de las funciones ácidas saturadas. Convendría en próximos estudios aplicar el método de GIROD y LACROIX para determinar que cationes son responsables de estos saltos y cuantificar mejor la capacidad tampón.

El contenido en carbonatos es elevado, como corresponde a unos suelos desarrollados sobre sedimentos calizos, aumenta ligeramente con la profundidad. La diferencia mayor se produce en el perfil EV, pues entre los horizontes Au1 y C es del 44,3%, y la menor en EII con un 19%. De todas formas hay que tener en cuenta el efecto de la dilución mecánica en los horizontes superiores debida a la materia orgánica por lo que las diferencias en profundidad son menores a las que parece a primera vista.

La conductividad eléctrica, que se debe a las formas iónicas en disolución, muestra unos suelos sin problemas de salinidad, pues se encuentran siempre valores menores a 1 mS/cm, lo cual es propio de suelos con escaso contenido en sales solubles; la razón de que se detecten valores tan variables entre perfiles, y, en la mayoría de las ocasiones notablemente más elevados en los horizontes superiores, está en el riego, que se hace con aguas ligeramente salinas tras ser sometidas a un proceso de descalcificación.

En la tabla 6 se muestran los valores de los coeficientes de correlación entre las principales variables.

CONCLUSIONES

Los suelos estudiados son jóvenes, habiendo sido clasificados como Fluvisoles calcáricos (FLc); desarrollados a expensas de los sucesi-

	Arcilla	Arena Fina	Arena Gruesa	CIC	CO ₃ ²⁻	Carbono	Condu. Eléctrica	Densidad Aparente	Densidad Real	Limo	Nitrogeno	Perm. Alterada	Perm. Inalterada	pH Agua	pH KCl	Porosidad Total	Profundidad.
Arcilla	1																
Ar. Fina	-0,879	1															
Ar. Gruesa	-0,564	0,165	1														
CIC	0,679	-0,718	-0,437	1													
CO ₃ ²⁻	0,737	-0,63	-0,318	0,174	1												
Carbono	0,21	-0,306	-0,179	0,815	-0,332	1											
Condu. Elec.	0,003	-0,351	0,382	0,486	-0,261	0,583	1										
D. Aparente	-0,104	0,184	-0,182	-0,273	0,163	-0,728	-0,491	1									
D. Real	-0,137	0,253	0,135	-0,772	0,411	-0,982	-0,58	0,553	1								
Limo	0,948	-0,929	-0,507	0,82	0,624	0,38	0,216	-0,074	-0,323	1							
Nitrogeno	0,325	-0,363	-0,272	0,838	-0,179	0,94	0,503	-0,543	-0,89	0,451	1						
P. Alterada	-0,384	0,139	0,507	0,136	-0,523	0,705	0,884	-0,429	-0,796	-0,318	0,349	1					
P. Inalterada	-0,221	-0,001	0,571	-0,12	-0,396	0,468	0,582	-0,849	-0,519	-0,247	0,211	0,734	1				
pH Agua	-0,325	0,523	-0,079	-0,708	0,105	-0,734	-0,819	0,474	0,684	-0,543	-0,7	-0,706	-0,264	1			
pH KCl	-0,41	0,48	0,196	-0,804	0,104	-0,814	-0,686	0,289	0,788	-0,515	-0,793	-0,637	-0,001	0,908	1		
Porosidad T.	0,085	-0,184	0,214	0,239	-0,138	0,664	0,542	-0,992	-0,446	0,062	0,497	0,439	0,833	-0,484	-0,231	1	
Profundidad	-0,16	0,281	-0,061	-0,533	0,281	-0,734	-0,523	0,55	0,698	-0,239	-0,687	-0,44	-0,562	0,686	0,705	-0,513	1

Tabla 6.-Índices de correlación entre las variables principales.

vos meandros abandonados por el río Henares, sobre materiales aluviales recientes de naturaleza caliza. Los perfiles son más deposicionales que edafológicos, de forma que los procesos de lavado y traslocación de arcillas, materia orgánica y carbonatos son aún incipientes por lo que su influencia en el efecto protector de los suelos sobre las aguas subterráneas es inapreciable. Su comportamiento frente a las agresiones potencialmente contaminantes pueden resumirse en:

A) Comportamiento frente a la contaminación microbiológica.

A1) Factores positivos:

La abundancia de calcio en los horizontes favorece la adsorción de virus.

Son suelos con baja capacidad de retención de agua, lo que unido al clima poco lluvioso supone que, en especial en los horizontes superiores, más alejados del nivel freático, se sequen con rapidez en épocas de estío.

Apenas se producirá la estabilización de virus por las arcillas

A2) Factores negativos:

Elevada permeabilidad y cercanía del nivel saturado

que permiten un acceso rápido de los microorganismos a las aguas subterráneas.

Escaso contenido en arcillas responsables de la adsorción de virus y bacterias.

Baja CIC.

Los pH alcalinos favorecen la supervivencia de las bacterias.

Son suelos bien aireados que permiten un rápido desarrollo de bacterias aerobias.

B) Capacidad de protección frente a plaguicidas:

B1) Factores positivos.

Son suelos con escasa cubierta vegetal, a los que llega la luz solar con toda su intensidad, alterando rápidamente las sustancias fotolábiles.

Los horizontes superficiales, con elevado contenido en materia orgánica pueden retener una proporción significativa de los productos aplicados.

Si los plaguicidas no son arrastrados por las aguas de riego o por la lluvia la elevada porosidad secundaria de los horizontes superficiales favorecerá su volatilización.

B2) Factores negativos.

La baja capacidad de retener agua frenará su ad-

sorción, pues la mayoría de los plaguicidas son adsorbidos en fase líquida.

Escaso contenido en arcilla que pueda absorberlos.

Elevada permeabilidad.

Conviene el empleo de plaguicidas de corta semivida, a ser posible no líquidos. La aplicación directa en el suelo producirá, probablemente, su llegada a las aguas subterráneas.

C) Características frente al abonado: es necesario tener en cuenta que se trata de suelos con una escasez de elementos nutritivos, lo que obliga a un abonado intenso para conseguir cosechas rentables. En la zona se suelen emplear abonos inorgánicos complejos (NPK).

C1) Factores positivos:

pH ligeramente alcalino que permite la eliminación de los abonos amoniacales como NH₄.

El elevado contenido en calcio facilitará la formación de sales insolubles de fósforo y calcio.

La humificación de los abonos verdes se verá frenada por el elevado contenido en carbonato cálcico.

C2) Factores negativos:

Elevada permeabilidad que arrastra rápidamente hacia las aguas subterráneas los abonos no adsorbidos por las plantas. Los abonos líquidos pueden llegar por idéntico motivo, con rapidez al agua subterránea.

Se trata de suelos bien aireados en los que se producirán con facilidad fenómenos de nitrificación, (el ión nitrato es muy móvil). Por el contrario la desnitrificación apenas se producirá.

La escasa cantidad de arcillas supone que apenas se produzca retención del amonio.

Así pues, los abonos nitrogenados no encontrarán una barrera importante si se exceptúan los amoniacales que a pH como los de estos suelos, ligeramente básicos, sufren una importante pérdida por evaporación del NH₄. El fósforo, por el contrario, será retenido con facilidad debido a la formación de fosfatos cálcicos muy insolubles, la acción de hidróxidos de hierro y aluminio, y la

inmovilización por acción biológica son despreciables frente a la formación de sales de calcio.

Dada la elevada permeabilidad de los perfiles conviene que los abonos se apliquen en forma sólida, y que los riegos se moderen de forma que el exceso de agua no los arrastre más allá de la zona no saturada.

D) Protección frente a metales pesados:

D1) Características positivas.

Los pH superiores a 7 reducen la movilidad de los metales pesados.

La abundancia de carbonatos produce la adsorción de Zn y otros metales

D2) Características negativas.

La materia orgánica, cuando se transforma en ácidos fúlvicos o húmicos es capaz de complejar muchos elementos traza, pero en estos suelos, los restos vegetales se alteran con dificultad debido a la abundancia de calcio.

La capacidad de cambio catiónico mediada por las arcillas es muy reducida.

Estas conclusiones pueden resumirse en los siguientes apartados:

-Los suelos estudiados se han formado en una zona en la que, a pesar de la topografía llana, la presencia de una vegetación de fácil humificación, y un clima mediterráneo seco que pudieran hacer pensar en perfiles desarrollados con horizontes bien diferenciados, se han formado suelos de escasa evolución debido a los frecuentes aportes de aluviones por parte del río Henares.

Se trata de suelos poco protectores frente a focos de contaminación puntual, en especial si el vertido es de naturaleza líquida, pues el tiempo de tránsito de los contaminantes es muy pequeño a causa de su elevada permeabilidad y al escaso espesor de la zona no saturada.

El comportamiento frente a focos de contaminación areal, es muy variable en función del tipo de contaminante, en general la protección es media-baja debido a la granulometría poco favorable, a la escasa distancia al nivel piezométrico y al reducido contenido en arcillas; sin em-

bargo otros factores, como el elevado contenido cálcico, las condiciones aerobias del medio y la disposición de la materia orgánica favorecen la retención o degradación de numerosas sustancias.

REFERENCIAS

BAILEY, G. W. (1968): "Role of soils and sediment in water pollution control. Part. 1. Reaction of nitrogenous and phosphatic compounds with soils and geologic strata". U.S. Department of the Interior. Federal water pollution control administration, southeast water laboratory.

BAIZE, D. (1988): "Guide des analyses courantes en pédologie: choix, express, présentation, interprétation". Paris INRA.

BITTON, G.; GERBA, CH. (1986): "Ground water pollution microbiology". Willey Interscience Publication. John Wiley & Sons ed. New York.

COBERTERA LAGUNA, E. (1993): "Edafología aplicada. Suelos, producción agraria, planificación territorial e impactos ambientales." Ed. Cátedra. Madrid.

CRANE, S. R. and MOOR, J. A. (1984): "Bacterial pollution of groundwater: a review" Water, air and soil pollution, 22, pp 67-83.

CHENG, H. H.; KOSKINEN, W. C. (1986): "Processes and factors affecting transport of pesticides to ground water. Evaluation of pesticides in ground water. ACS Symposium Serie 315. Washington DC."

DANIEL, H. (1980): "Fundamentals of soil physics" Academic Press. New York.

DUCHAUFOR, P. SOUCHIER, B. (1984): "Edafología. 1. Edafogénesis y clasificación." Ed. Masson. Barcelona.

EPA Nº 600/2-85/018. (1988): "Drastic. A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings".

FAO. UNESCO (1991): "Mapa mundial de suelos" Leyenda revisa. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos nº 60.

FOSTER, S. S. D. (1987): "Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy" en "Vulnerability of soil and groundwater to pollutants". W. van Duijnboden y H. G. van Waegenigh editors. TNO Committee on Hydrological Proceedings and information nº 38. La Haya.

IGME (1972): "Mapa de vulnerabilidad a la contaminación de los mantos acuíferos. Escala 1:1000.000" Madrid,

ITGE (1990): "Mapa geológico de España escala 1:50.000. Algete, segunda serie-primer edición." Madrid

ITGE-UNESA (1991): "El agua en España" Ed. Instituto de la ingeniería de España. Comité de Energía y recursos minerales.

LOPEZ GETA, J. A.; MORENO MERINO, L. (1994): "Vulnerabilidad de los acuíferos a las actividades agrarias" Madrid. En imprenta.

LOPEZ RITAS, J.; LOPEZ MELIDA, J. (1990): "El diagnóstico de suelos y plantas. Métodos de laboratorio y de campo". Ediciones Mundi Prensa. Madrid.

LORENTE, J. M. "Meteorología" Cuarta edición. Editorial Labor S.A. Madrid, Barcelona.

LUDWIG LUCKNER, WSEWOLOD SCHESTAKOW, M. (1991): "Migration processes in the soil and groundwater zone". Lewis Publishers, INC. Michigan.

MUSY, A. SOTTER, M. (1991): "Physique du sol". Presses polytechniques et universitaires Romandes. Lausanne.

ITGE (1989): "Las aguas subterráneas en España. Estudio de síntesis" Instituto Tecnológico Geominero de España, Madrid.

PEREZ CARRERAS, M. L. (1991): "Influencia de los parámetros edáficos en los contenidos en metales pesados en suelos de cultivo de la comunidad de Madrid". Tesis Doctoral. Departamento de edafología de la facultad de farmacia de la U.C.M. Madrid.

PORTA, J. LOPEZ-ACEVEDO, M. ROQUERO, C. (1994): "Edafología para la agricultura y el medio ambiente". Ed. Mundiprensa. Madrid.

RUPELLAN, A; DELETANG, J. (1967): "Les phenomenes d'échange de cations et d'anions dans les sols." Horston. Paris.

SECO CEBADA, A. FERNANDEZ URIA, A., BATLLE GARGALLO, A. (1992): "Avance sobre una metodología para la determinación del tiempo de tránsito de contaminantes en la zona no saturada como base para la realización de mapas de vulnerabilidad." V Simposio de Hidrogeología. Alicante.

SECO CEBADA, A. FERNANDEZ URIA, A. TOLEDANO GRIJALVO, ANSELMA (1992): "Aplicación práctica del cálculo del tiempo de tránsito de contaminantes en la zona no saturada y determinación del grado de vulnerabilidad de un acuífero tipo (aluvial del Guadalquivir). V Simposio de Hidrogeología. Alicante.

SYKES, G.; SKINNER, F. A.: (1971): "Microbial aspects of pollution". Academic Press London.

VARIOS AUTORES (1977): "El Encín. Suelo y Clima". Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias. Ministerio de Agricultura.

ITGE (1990): "Estudio metodológico de los procesos de contaminación bacteriológica de las aguas subterráneas. Aplicación a los acuíferos del norte de España". Madrid.

Original recibido: Diciembre de 1994.

Original aceptado: Enero de 1995.

Caracterización hidrodinámica e hidroquímica de los acuíferos de la Cuenca Baja del río Loukkos (Marruecos).

Por B. BOUHMADI (*) J. BENAVENTE (*) J. CRUZ-SANJULIAN (*) y A. SANROMA (*)

R E S U M E N

El acuífero correspondiente a la llanura aluvial del río Loukkos (Marruecos) y la formación conglomerática de Oulad-Ogbane, que aflora en uno de los bordes de dicha llanura, han sido objeto de un estudio que ha consistido, básicamente, en: (a) la interpretación de la geometría del sustrato y la naturaleza de los materiales permeables, a partir de datos previos procedentes de columnas de sondeos mecánicos y de dos campañas de prospección geofísica eléctrica, (b) la determinación de los parámetros hidráulicos, a partir de la interpretación de varios ensayos de bombeo, y (c) la realización de cuatro campañas de muestreo hidroquímico a partir de las cuales se han identificado las facies de las principales familias de aguas, la distribución espacial de las variables físico-químicas, así como su variabilidad temporal, tanto mediante procedimientos gráficos como por métodos estadísticos multivariados.

Palabras clave: Aguas subterráneas, Llanura aluvial, Hidrodinámica, Hidroquímica, Río Loukkos, Marruecos.

A B S T R A C T

The aquifer of the alluvial plain of the Loukkos river (Morocco) and the Oulad-Ogbane conglomerate formation, which constitutes one of its borders, have been studied for, basically, (a) defining the geometry of the substratum as well as the character of the permeable materials, from data obtained in borehole columns and electrical geophysical prospection, (b) evaluating their hydraulic parameters from the results of some pumping test, and (c) hydrochemical assessment (types of groundwaters, spatial and temporal evolution of chemical quality) from four sampling campaigns, using conventional graphical methods as well as statistical multivariate procedures.

Key words: Groundwater, Alluvial plain, Hydrodynamic, Hydrochemistry, Loukkos river, Morocco.

1. INTRODUCCION

El sector estudiado se sitúa entre las ciudades de Larache y Ksar-El-Kebir, tiene una superficie de unos 280 km² y corresponde a la parte inferior de la cuenca del río Loukkos (fig. 1). Comprende la llanura aluvial de dicho río y la zona adyacente de Oulad-Ogbane, localizada al oeste de Ksar-El-Kebir. Aunque una cierta extensión de marisma ha sido drenada para uso agrícola, aún

persisten humedales de gran interés ambiental en los sectores próximos a la desembocadura (DAKKI y EL AGBANI, 1993). Una presa de retención (fig. 2) es utilizada como barrera frente a las mareas del océano. Además, la construcción del embalse de Oued-El-Makhazine en Mayo de 1979, el encauzamiento del río Loukkos y la construcción de un canal periférico para desviar los cursos naturales de los ríos Ouarour y El-Mekhazen han disminuido notablemente los riesgos de inundación en el área próxima a la desembocadura y han favorecido la explotación agrícola en la zona.

(*) Instituto del Agua; Universidad de Granada; c/ Rector López Argüeta s/n; 18071-Granada

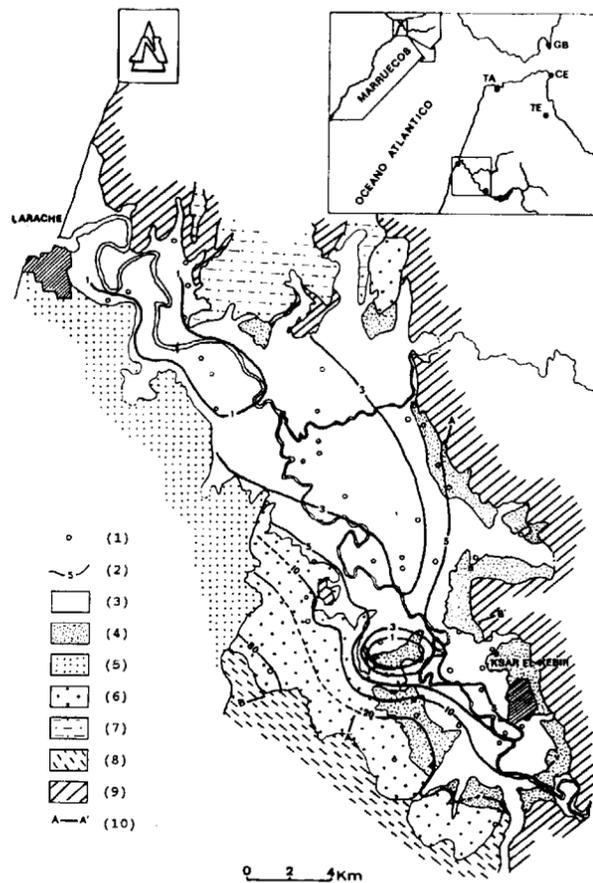


Figura 1. Situación geográfica, geología y piezometría del área estudiada. (1) Puntos de agua donde han sido realizadas las medidas del nivel piezométrico; (2) Línea isopiezia; (3) Aluviones (Cuaternario reciente); (4) Terrazas fluviales (Cuaternario antiguo); (5) Formación arenosa de Rmel (Villafrankiense); (6) Cantos con matriz arcillosa (Zona de Oulad-Ogbane, Villafrankiense); (7) Limos arenosos (Villafrankiense); (8) Margas azules (Mioceno superior); (9) Unidades preorogénicas indiferenciadas; (10) Situación de los cortes de la figura 6. (extraído de BOUHMADI et al., 1994)

La población de los núcleos de Larache y Ksar-El-Kebir y la del medio rural supera ligeramente los 200.000 habitantes, cuyas actividades se desarrollan preferentemente en el sector agrícola. Los cultivos son regados en su mayoría por las aguas superficiales, con excepción de algunas parcelas en el centro y el sur de la llanura que usan el agua subterránea.

La población se abastece exclusivamente de las aguas subterráneas cuya demanda es cada vez mayor, lo que confiere gran interés al estudio hidrogeológico de este sector.

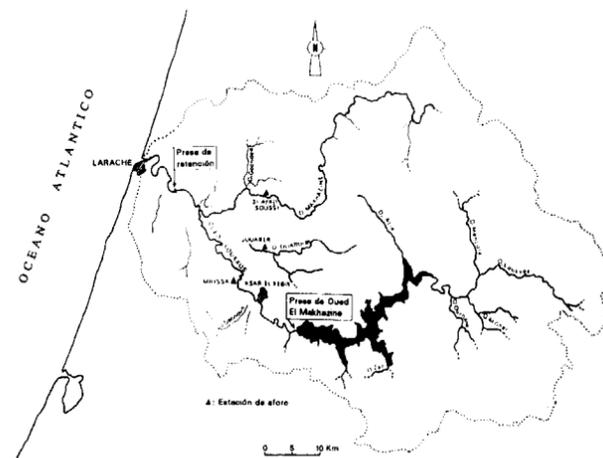


Figura 2. Cuenca hidrográfica del río Loukkos.

2. CLIMATOLOGIA E HIDROLOGIA

Según los datos de cinco estaciones meteorológicas, la precipitación media anual del área investigada es de aproximadamente 650 mm. El clima de la zona es subhúmedo y se caracteriza por dos estaciones bien diferenciadas: la primera, húmeda y fresca (90% de la precipitación anual), se extiende de octubre a abril con un máximo de precipitación (más de 100 mm) en el mes de diciembre, y la segunda, seca y cálida, de mayo a septiembre, con una precipitación casi nula en el mes de julio.

La temperatura media anual en Larache es de 17,1°C, con un máximo de 22,5°C en agosto y un mínimo de 12,2°C en el mes de enero. Esta temperatura aumenta ligeramente hacia el interior.

La evapotranspiración potencial media anual, calculada por el método de THORNTHWAITE, es de 890 mm, mientras que la evapotranspiración real anual, calculada por el mismo método, es de 476 mm. Estos datos permiten estimar la lluvia útil media anual en torno a 174 mm (aproximadamente el 26% de la pluviometría media anual), valor que coincide con el obtenido mediante un balance del suelo si se utiliza una capacidad de campo de 150 mm.

En la figura 3 se representa el balance hídrico para la estación de Larache, del que se desprende que el balance precipitación-evapotranspiración es negativo a partir de la segunda quincena del mes de abril.

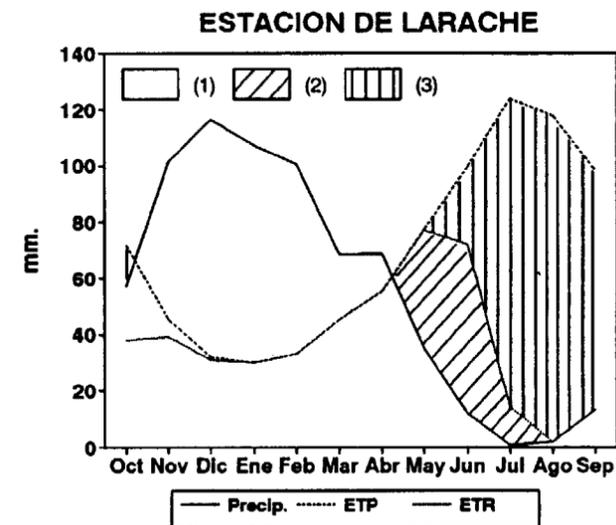


Figura 3. Balance hídrico de la estación de Larache. (1): Restitución de la reserva más excedentes; (2): Utilización de la reserva del agua; (3): Déficit estricto del agua.

El río Loukkos drena una cuenca de 3748 km²; es aforado desde 1961 en la estación de Mrissa (fig. 2) que controla una cuenca vertiente de 2120 km². El caudal del río alcanza su máximo (más de 90 m³/s) en el mes de enero (fig. 4)

El río Mekhazen es el principal afluente del río Loukkos, tiene una cuenca vertiente de 848 km² y es aforado en la estación de Sidi-Ayad-Soussi (fig. 2), que controla el 74% de esta cuenca. El caudal mensual medio máximo de este río supera ligeramente los 20 m³/s y corresponde al mes de febrero (fig. 4).

El río Ouarour, con 176 km² de cuenca vertiente, es aforado en la estación de Jouaber (fig. 2), y presenta caudales mensuales que no alcanzan los 3 m³/s (fig. 4).

3. CONTEXTO GEOLOGICO

La región estudiada forma parte de la cuenca postorogénica del Gharb (dominio externo del Rif), situada en el antepaís rifeño occidental (AÏT BRAHIM, 1991).

Las formaciones preorogénicas representadas en este sector son el manto intrarrifeño del Habt (SUTER y FIESCHTER, 1966) y el manto prerrifeño, cabalgado por el anterior (EL FATH y HAD-

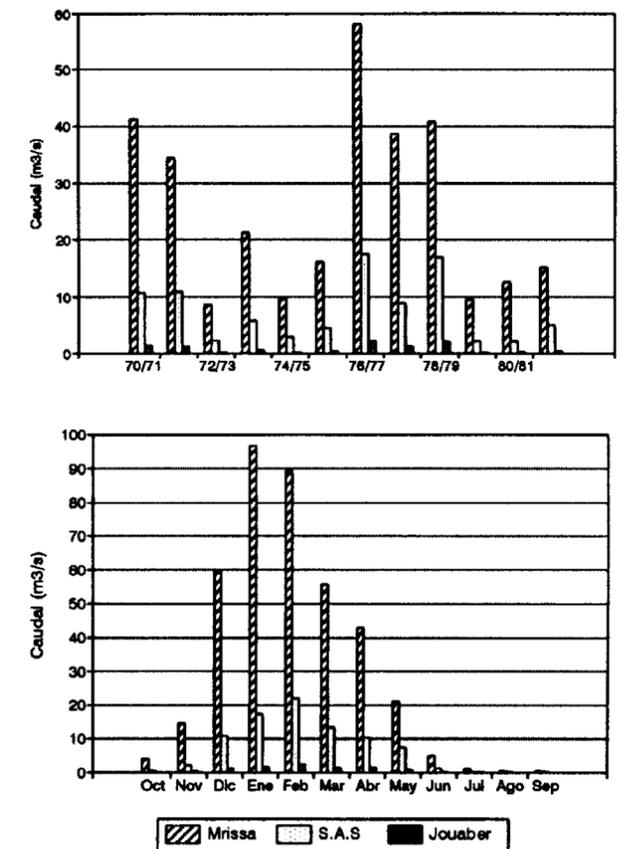


Figura 4. Caudales anuales medios durante el período 1970-1982 y caudales mensuales medios para el mismo período, en las estaciones de Mrissa, Sidi-Ayad-Soussi (S.A.S.) y Jouaber.

DANE, 1991). Ambas presentan litología predominantemente margosa y se han representado conjuntamente en la figura 1.

Las formaciones postorogénicas son los aluviones cuaternarios y los materiales villafrankienses que afloran fundamentalmente a lo largo del borde occidental de la llanura aluvial. Entre estos últimos cabe distinguir dos formaciones: la de Rmel, al sur de Larache, y la de Oulad-Ogbane, al oeste de Ksar-El-Kebir (fig. 1). La diferencia entre ambas se basa en la facies litológica predominante: materiales arenosos, en la primera, y conglomeráticos de matriz arcillosa en la segunda (EL GHARBAOUI, 1981). El sustrato de estas formaciones permeables corresponde generalmente a las margas azules del Mioceno superior, las cuales afloran al sur del sector estudiado.

4. HIDROGEOLOGIA

4.1. Antecedentes

El grado de conocimiento hidrogeológico de los diferentes sectores que integran el área es desigual. La formación de Rmel está sometida a una intensa explotación, destinada sobre todo a regadíos así como al abastecimiento a Larache y como complemento al abastecimiento a Ksar-El-Kebir; los datos hidrogeológicos disponibles han sido suficientes, incluso, para elaborar varios modelos matemáticos de simulación (DRH, 1987). Por el contrario, el trabajo de MESSAOUD (1961) es el único estudio hidrogeológico previo relativo a los sectores de la llanura aluvial y de la formación de Oulad-Ogbane en los que se ha centrado nuestra investigación.

4.2. Características geométricas

Los datos acerca de la geometría de los materiales permeables son relativamente numerosos, debido al elevado número de sondeos mecánicos realizados en este sector y también gracias a las dos campañas de prospección geofísica eléctrica realizadas en 1961 y 1974 por la ONI y la "Direction de la mise en Valeur" del Ministerio de Agricultura de Marruecos.

A partir de tales datos, se ha realizado un mapa de cotas del sustrato bajo los materiales permeables (fig. 5), que pone de manifiesto una depresión alargada en la dirección NO-SE al oeste de Ksar-El-Kebir, en el centro de la cual el sustrato alcanza una profundidad de más de 50 m bajo el nivel del mar. A uno y otro lado de esta depresión disminuye considerablemente la profundidad del sustrato, que llega incluso a aflorar al norte de la zona de Oulad-Ogbane.

En el centro de la llanura el sustrato alcanza igualmente una profundidad mayor de 50 m, que llega a ser superada hacia el oeste, bajo la meseta de Rmel.

La morfología general del sustrato en este sector sugiere la existencia de estructuras de plegamiento, que serían el resultado de una situación compresiva postmiocena de dirección NE-SO.

Los datos correspondientes a las columnas de los sondeos realizados se han sintetizado en los

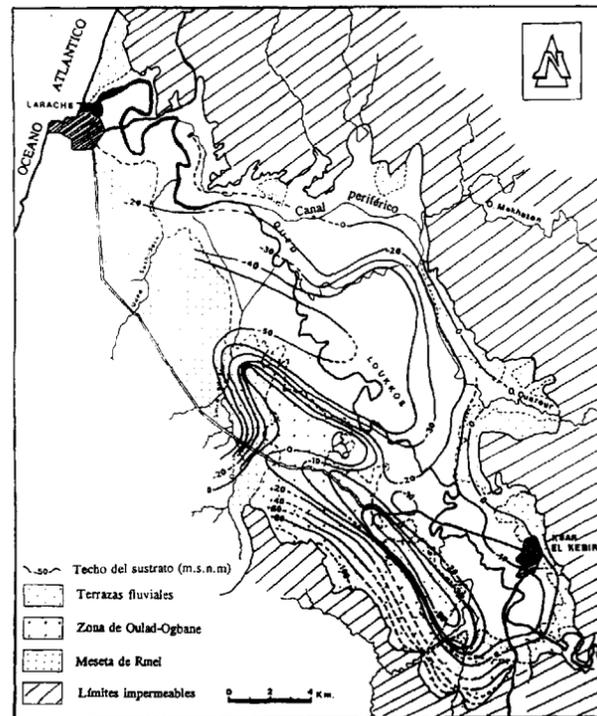


Figura 5. Cotas del techo del sustrato impermeable.

cortes litológicos de la figura 6. La formación aluvial presenta en la mayoría de los casos una capa superior de naturaleza limo-arcillosa, bajo la que se identifican materiales detríticos más gruesos, con frecuentes cambios laterales de granulometría. El carácter lenticular y discontinuo de los materiales aluviales aconseja considerar el acuífero de la llanura como unicapa heterogéneo. No obstante, en determinados sectores de la orilla derecha, pueden identificarse con cierta claridad dos niveles acuíferos superpuestos (MESSAOUD, 1961), como es el caso de la zona donde se encuentran los sondeos 478 y 489 (corte AA', fig. 6). El citado autor puso también de manifiesto que, de los dos niveles superpuestos citados, el inferior estaba ocupado por aguas de salinidad relativamente alta en comparación con el nivel superior. Más adelante se tratará con más detalle este hecho, a la luz de los datos presentados en este trabajo.

Aunque predominantemente conglomerática, la formación villafraniense de Oulad-Ogbane presenta intercalaciones margosas y margo-are-

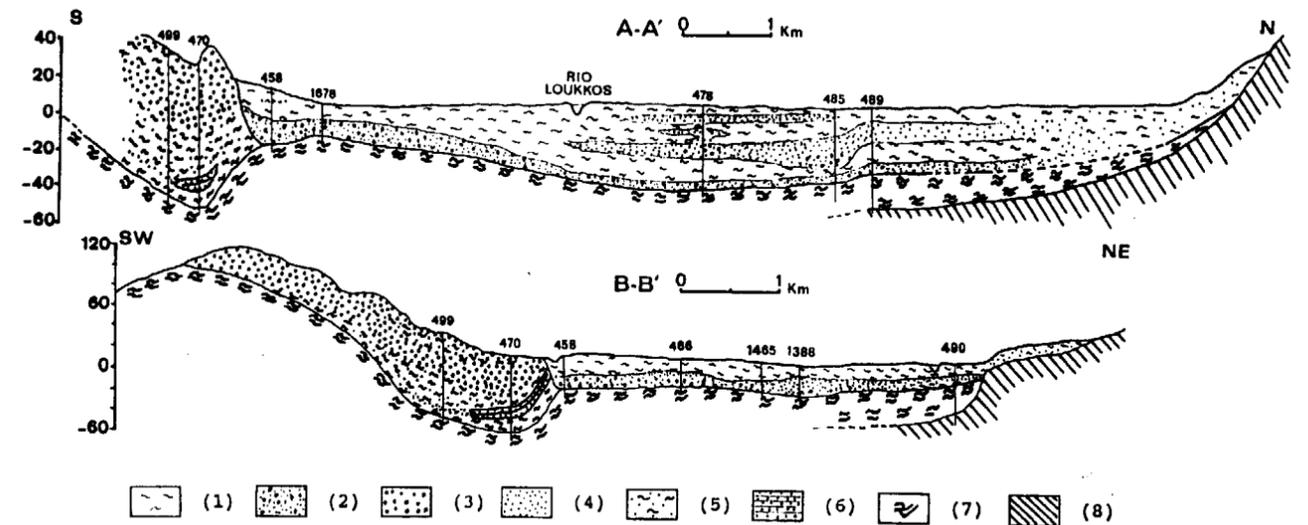


Figura 6. Cortes litológicos (ver situación en fig. 1; el B-B' modificado de MESSAOUD, 1961). (1) Limos y arcillas (Cuaternario); (2) Gravas y arenas aluviales (Cuaternario); (3) Cantos con matriz arcillosa (Villafraniense); (4) Arenas (Villafraniense); (5) Margas arenosas y arenas margosas (Villafraniense); (6) Areniscas (Astiense); (7) Margas azules (Mioceno superior); (8) Unidades preorogénicas indiferenciadas.

nosas; en su parte inferior aparecen arenas, areniscas y margas del Astiense.

4.3. Características hidrodinámicas

Los datos piezométricos (fig. 1) indican que el flujo regional en la llanura aluvial se realiza hacia la desembocadura (BOUHMADI et al., 1994). Dichos datos muestran también el carácter impermeable del borde nororiental y que el contacto con las formaciones permeables de Rmel y Oulad-Ogbane corresponde a un límite de recarga. Se pone asimismo de manifiesto una depresión de la superficie piezométrica a pocos kilómetros al NO de Ksar-El-Kebir, en cuyo centro el nivel está ligeramente por debajo del nivel del mar. Esta depresión es el resultado de la explotación en los sondeos situados en este sector, que extraen en conjunto un caudal continuo de aproximadamente 85 l/s para el abastecimiento de la ciudad de Ksar-El-Kebir.

En lo que a parámetros hidráulicos se refiere, los resultados de ensayos de bombeo llevados a cabo en 22 sondeos (fig. 7) muestran que el 60% de los puntos tienen una transmisividad inferior a $5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (tabla 1). El valor mínimo es de

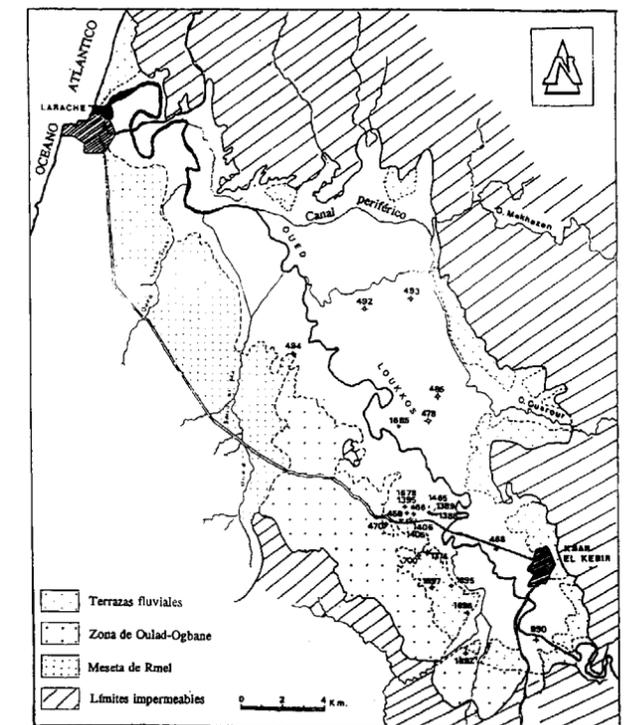


Figura 7. Situación de los sondeos donde se han realizado los ensayos de bombeo.

aproximadamente 10^{-4} m²/s y se ha obtenido en la zona de Oulad-Ogbane, mientras que las transmisividades más altas son del orden de 10^{-2} m²/s y han sido registradas en algunos sondeos que captan niveles de gravas aluviales (1465 y 466, ver corte BB' de la figura 6) -que constituyen probablemente un paleocauce del río Loukkos- y que están situados en el área de influencia de la depresión piezométrica antes citada.

Nº	T (m ² /s)	K (m/s)
492	$3 \cdot 10^{-3}$	$2,14 \cdot 10^{-4}$
493	$4,5 \cdot 10^{-3}$	$2,83 \cdot 10^{-4}$
494	$2,9 \cdot 10^{-3}$	$9,5 \cdot 10^{-5}$
478	$6,9 \cdot 10^{-3}$	$9,8 \cdot 10^{-4}$
485	$4,25 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$
1665	$2,15 \cdot 10^{-3}$	-
458	$5,2 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-4}$
468	$3,7 \cdot 10^{-3}$	$5,69 \cdot 10^{-4}$
466	$2,2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-3}$
1388	$5,28 \cdot 10^{-3}$	$2,78 \cdot 10^{-4}$
1389	$1,92 \cdot 10^{-2}$	-
1465	$7,05 \cdot 10^{-2}$	$6,41 \cdot 10^{-3}$
1405	$7,15 \cdot 10^{-3}$	$5,96 \cdot 10^{-4}$
1406	$5,2 \cdot 10^{-3}$	$3,71 \cdot 10^{-4}$
1395	$8,02 \cdot 10^{-4}$	$1,34 \cdot 10^{-4}$
1678	$1,94 \cdot 10^{-3}$	$2,77 \cdot 10^{-4}$
990	$1,59 \cdot 10^{-3}$	$7,95 \cdot 10^{-5}$
470*	$4,45 \cdot 10^{-3}$	$7,42 \cdot 10^{-5}$
1374*	$1,61 \cdot 10^{-3}$	$5,07 \cdot 10^{-5}$
1696*	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$6,72 \cdot 10^{-5}$
1697*	$8,6 \cdot 10^{-4}$	$1,16 \cdot 10^{-5}$
1692*	$1,25 \cdot 10^{-4}$	$2,4 \cdot 10^{-6}$

*: Sondeos situados en la zona de Oulad-Ogbane.

Tabla I.-Resultados de los ensayos de bombeo. T: Transmisividad, K: permeabilidad.

Para la estimación de valores de los coeficientes de almacenamiento, sólo se dispone de datos para su cálculo en 4 ensayos de bombeo. Los valores obtenidos están comprendidos entre $1 \cdot 10^{-3}$ y $4 \cdot 10^{-4}$ en la llanura aluvial (en la zona del cono de depresión) y entre $1 \cdot 10^{-2}$ y $3 \cdot 10^{-3}$ en la zona de Oulad-Ogbane; son, pues, característicos de un acuífero de carácter semi-confinado a confinado.

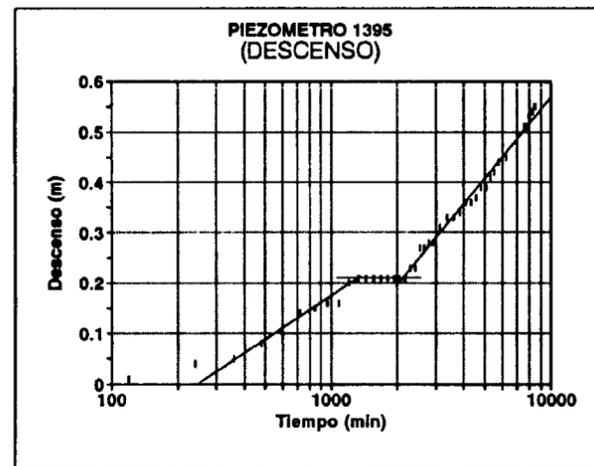


Figura 8. Evolución del nivel piezométrico en el piezómetro de observación 1395 durante el ensayo de bombeo simultáneo y de larga duración.

Los resultados de un ensayo de bombeo de larga duración (6 días), realizado simultáneamente en 5 sondeos situados en un entorno de unos 2 km², que coincide con el centro de la depresión piezométrica, han sido representados en varios gráficos. A este respecto, la evolución del nivel en el piezómetro de observación 1395 (fig. 8) es representativa del comportamiento general observado, que ha sido interpretado como un efecto de la disminución de la transmisividad entre el inicio y el fin del bombeo, y que sugiere la existencia de un límite impermeable, que corresponde probablemente a la elevación del sustrato situada al E y al NO de este sector (DRH, 1985). También se ha puesto de manifiesto, en 4 sondeos y en el piezómetro de observación (fig. 8), una estabilización de los niveles entre las dos rectas de la gráfica, durante un período que varía entre 6 y 30 horas; este fenómeno es probablemente debido a una alimentación lateral de la formación de Oulad-Ogbane por una intercalación lenticular muy permeable.

4.4. Funcionamiento del acuífero. Datos para un balance

El principal elemento de recarga del acuífero es la infiltración pluvial, con un coeficiente de infiltración de 18.5%, que corresponde a un aporte de 7 hm³/año en la zona de Oulad-Ogbane y 26 hm³/año en la llanura aluvial. Las aportaciones

laterales del manto de Rmel a la llanura aluvial han sido estimadas a partir de la ley de Darcy y son del orden de 2.2 hm³/año. La realización de aforos diferenciales en los principales cursos de agua a lo largo del acuífero no ha sido posible, por lo que no puede hacerse una estimación de este elemento del balance.

En cuanto a las salidas, la descarga principal corresponde a la evapotranspiración en las zonas donde el nivel piezométrico está a una profundidad inferior a 2 metros, y es del orden de 21 hm³/año.

De los siete sondeos destinados al abastecimiento de Ksar-El-Kebir, los cuatro situados en la zona de la depresión piezométrica de la llanura aluvial extraen en conjunto un caudal de 45 l/s. Los tres sondeos restantes, situados en la zona de Oulad-Ogbane, extraen un caudal de 40 l/s.

Los aportes de la zona de Oulad-Ogbane a la llanura aluvial han sido estimados, por el mismo método, en unos 2.8 hm³/año (BOUHMADI, 1994).

4.5. Características hidroquímicas

Se han llevado a cabo cuatro campañas de muestreo hidroquímico: la primera en febrero de 1991, la segunda en noviembre de 1991, la tercera en abril de 1992 (en la que el número de puntos llegó a ser de 67) y la cuarta en agosto de 1992. Los puntos muestreados son pozos excavados o sondeos de explotación (fig. 9), a excepción de algunos pozos cerca de la desembocadura del río Loukkos, que están abandonados a causa de sus aguas relativamente salinas. Las medidas tomadas "in situ" son la conductividad eléctrica, el pH, el potencial redox y la temperatura. Se utilizaron como envases botellas de polietileno, previamente lavadas con ácido clorhídrico diluido y enjuagadas con agua destilada hasta la eliminación total de su acidez. En el momento del muestreo cada botella es enjuagada 3 veces con el agua a muestrear y luego se llena completamente, evitando burbujas de aire y se cierra herméticamente. Antes de su llegada al laboratorio, donde son analizadas lo más pronto posible, las muestras son preservadas en frigorífico, en la oscuridad y a una temperatura de 4°C. Los análisis se iniciaron, en todos los casos, en un plazo inferior a 2 semanas.

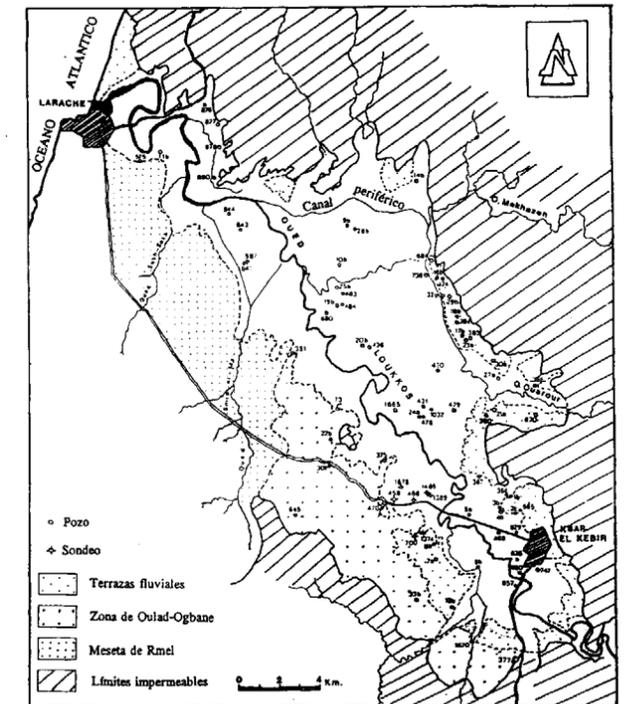


Figura 9. Red de control hidroquímico.

En el laboratorio del Instituto del Agua de la Universidad de Granada se han analizado los contenidos en los constituyentes mayoritarios: cloruros, sulfatos, bicarbonatos, carbonatos, calcio, magnesio, sodio, potasio y silice. A partir de las concentraciones individuales, se ha obtenido el valor de la mineralización total (TSD).

El contenido salino de las muestras (TSD) varía entre 133 mg/l y 29970 mg/l. En cuanto a la facies hidroquímica, es clorurada cálcica y/o sódica en los puntos de la llanura aluvial y bicarbonatada cálcica en los puntos situados en la zona de Oulad-Ogbane.

Las aguas del río Loukkos tienen una facies bicarbonatada-clorurada-cálcica y un contenido salino de aproximadamente 500 mg/l.

4.5.1. Análisis multivariable

El análisis multivariable de los datos es una herramienta de gran utilidad en el caso de estudios hidroquímicos donde se dispone de un número

relativamente elevado de análisis. Dos metodologías de análisis han sido aplicadas: el Análisis Cluster y el Análisis en Componentes Principales (ACP). Los resultados de los análisis químicos del muestreo de abril de 1992 han sido la base de estos tratamientos estadísticos; diez era el número de las variables y el número total de las observaciones ha sido de 67 puntos de agua (tabla 2).

Para realizar el análisis cluster, se ha hecho uso de un paquete de programas elaborado por RAMON LLUCH (1987) y que ha sido adaptado a Basic por M. OLIAS ALVAREZ (Instituto del Agua de la Universidad de Granada) para su utilización en PC compatible.

El análisis cluster permite agrupar jerárquicamente parejas de variables o de observaciones en función de su grado de semejanza. Después de la formación de las primeras parejas, éstas son consideradas como una sola unidad y comparadas de nuevo con las observaciones o variables restantes. En este trabajo, la medida de similitud utilizada ha sido el coeficiente de distancia (distancia euclidiana).

El cluster de las variables está representado en la figura 10; en ella se observa que la temperatura y la sílice son las variables más distantes; en cambio, los cloruros y el sodio son las variables menos distantes respecto a la conductividad.

En lo que se refiere a las observaciones, el dendrograma obtenido (fig. 11) pone de manifiesto dos familias principales, a las cuales se añaden algunas observaciones aisladas, a una distancia superior a 2.5. Las distancias más altas corresponden a las aguas de los puntos 880, 844 y 843; se trata de aguas salinas situadas en el sector de desembocadura.

La familia "1" agrupa los puntos de agua pertenecientes a la zona de Oulad-Ogbane, mientras que la familia "2" integra los puntos de agua que pertenecen a la llanura aluvial. Las observaciones aisladas pertenecen también a la llanura aluvial, con la particularidad que se ha citado anteriormente.

El ACP ha sido efectuado sobre un total de 9 variables físico-químicas; el número de observaciones ha sido de 58, lo que implica una eliminación de ciertas muestras, a la luz de los resultados del análisis cluster. Concretamente,

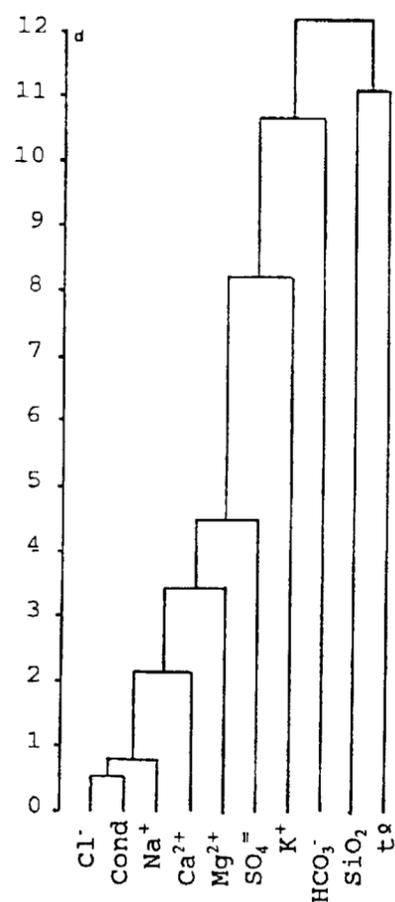


Figura 10. Cluster de variables.

no se han tenido en cuenta algunas de las observaciones que aparecían como más puntuales en el correspondiente dendrograma. Se trata de puntos de agua que tienen, en general, una conductividad superior a 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y una semejanza casi nula con el resto de las observaciones.

La matriz de coeficientes de correlación, que ha sido la base del ACP (Tabla 3), muestra la existencia de una correlación elevada entre la conductividad, los cloruros y el sodio. También se observa una correlación del orden de 0.7 entre la conductividad, el calcio y el magnesio. En cambio, se constata una correlación inferior a 0.5 entre los sulfatos y la conductividad.

La distribución de las variables en el plano principal -que explica el 64.3% de la varianza- muestra que los cloruros, el sodio, el calcio, el mag-

Nº	Ca2+ (mg/l)	Mg2+ (mg/l)	Na+ (mg/l)	k+ (mg/l)	Cl- (mg/l)	CO3H- (mg/l)	SO4= (mg/l)	SiO2 (mg/l)	tº (°C)	cond. microS/cm
1465/3	186	19.5	202	1.8	468.6	457	28	19	20.4	2200
1389/3	150	14	149	1.5	284	358	26	18	20.9	1472
466/3	87	16	150	1.2	210	319	15	18	20.7	1152
458/3	107	21	634	2.6	1242.5	442	105	17	20.6	4620
470/3	46.5	4.6	27	1	44	160	7	17	21.6	427
700/3	38.5	3	27	1.1	37.6	88	12.7	20	22.2	356
1374/3	40.5	4	22	0.7	31	137	9.7	21	21.7	364
5b/3	90.5	14	53	1.6	96	327	35.6	11	17.7	902
380/3	102	23	134	8	255.6	76	31.7	15	20.6	1362
479/3	44	11	62	62	192	137	52.7	25	18	1035
11b/3	107	7	151	7.7	181	190	65.6	12	18.6	1390
876/3	101	20	264	11	394	251	131	17	16	2070
887/3	58	5.4	35	2.7	77.4	183	12	14	19.6	577
2b/3	175	13	56	0.4	195	312	60.5	19	20.6	1216
3b/3	266	28	79	1.2	347.9	282	72.4	15	20.7	1983
476/3	216	29	105	3.1	255.5	366	144	14	18.8	1760
21b/3	93.5	34	73	7.1	216.5	167	65	18	18	1245
383/3	148	41.4	146	12.4	405	145	75	15	18.6	1839
384/3	76.5	17	144	4.6	262.7	129	24.7	20	18.5	1190
469/3	75	15	50	2.3	108	366	64	14	17.2	973
424/3	168	41	140	71	355	190	98	15	18.2	1975
684/3	56.5	16	48	14.4	139	46	12.2	15	19.7	834
10b/3	90	11	54	4	119	175	23.3	18	19.6	797
367/3	104	11	50	18	99.5	244	41.3	15	21	909
680/3	354	56	248	395	593	587	208	21	18.3	4020
430/3	37.5	3	12	16.4	18	160	12.6	16	16.7	312
375/3	52	12.4	73	4.1	166	137	21.4	18	18	910
843/3	2120	296	8720	195	17608	175	840	17	16.9	47000
844/3	1520	512	6640	162	16365	282	645	10	15.5	42500
877/3	56	13.6	151	10.2	156	343	57.5	19	18	1042
431/3	128	6	50	0.7	142	274	28.7	14	18.9	953
665/3	194	10	60	0.5	241	312	84.7	20	20.6	1365
1b/3	220	21	55	0.8	348	282	17	19	20.2	1920
747/3	200	41.1	127	2.8	241	640	270	13	21.7	1950
6b/3	39.5	3	23	35	35.5	183	26.2	38	18.2	450
8b/3	9.5	3	21	0.3	37.6	30.5	11.8	19	20.2	199
73/3	60.5	4	30	8.6	48.3	198	9.3	18	21	513
377/3	15.5	2.4	18	14.8	35.5	30.5	12.8	15	19.7	267
1670/3	35.5	6	22	14.2	64	61	11	15	19.7	446
13b/3	77	19	78	39	233.5	23	13.5	13	19	1352
635/3	166	31	192	17	429.5	449	39.7	27	16.1	2120
1665/3	228	52	297	0.8	291	388	748	11	18.5	2800
878/3	161	174	1544	44	3578	152	388	7	15.1	11600
880/3	1710	490	5740	96	12212	129	999	9	15.5	34300
351/3	11.5	7	41	1.7	83	137	12.8	17	20	535
19b/3	149	9	67	2.6	369	274	38	14	19.5	1170
17b/3	78	15	82	2.5	216	168	59	18	20	992
841/3	200	30	400	33	866	793	62.4	23	16.5	3920
628/3	50	17	221	9	412	244	75.5	7	20	1890
629/3	230	27	126	1.4	341	358	119	17	19.1	1969
388/3	534	136	596	13	1690	571	332	19	17.6	6440
366/3	93.5	7	30	20	64	327	13	20	17.7	721
4b/3	254	31	86	2	369	236	43.8	20	19.8	2020
657/3	238	25	73	0.5	199	419	98	16	17.9	1675
650/3	226	34	131	6.7	362	449	77.5	23	18.3	1911
575/3	56.5	9.4	58	4.4	35.5	274	106	11	20.1	955
22b/3	48	11	74	21	167	99	62.4	18	19	815
301/3	67.5	15	50	1.5	89	183	41	17	21	760
16b/3	81	28	72	19	216	38	13.6	19	20	1220
24b/3	70	11	181	0.8	549	89	85.5	13	17.1	1206
20b/3	240	14.6	61	0.7	302	335	73	14	18.7	1537
25b/3	176	8	49	0.6	145.5	297	68	19	18.8	1130
7b/3	44.5	5	16	0.3	34	34.3	110	16	20.5	180
645/3	24.5	5.8	38	12.2	62.5	46	56	18	17.9	465
1032/3	108	8.2	45	0.6	92	289	60	12	19.4	766
23b/3	70	21.4	71	4.3	231	129	12.6	18	18.9	1038
18b/3	64	13	45	1.8	124	160	18.8	16	20.3	677

Tabla 2. Resultados de los análisis químicos de las aguas subterráneas, correspondientes al mes de abril de 1992.

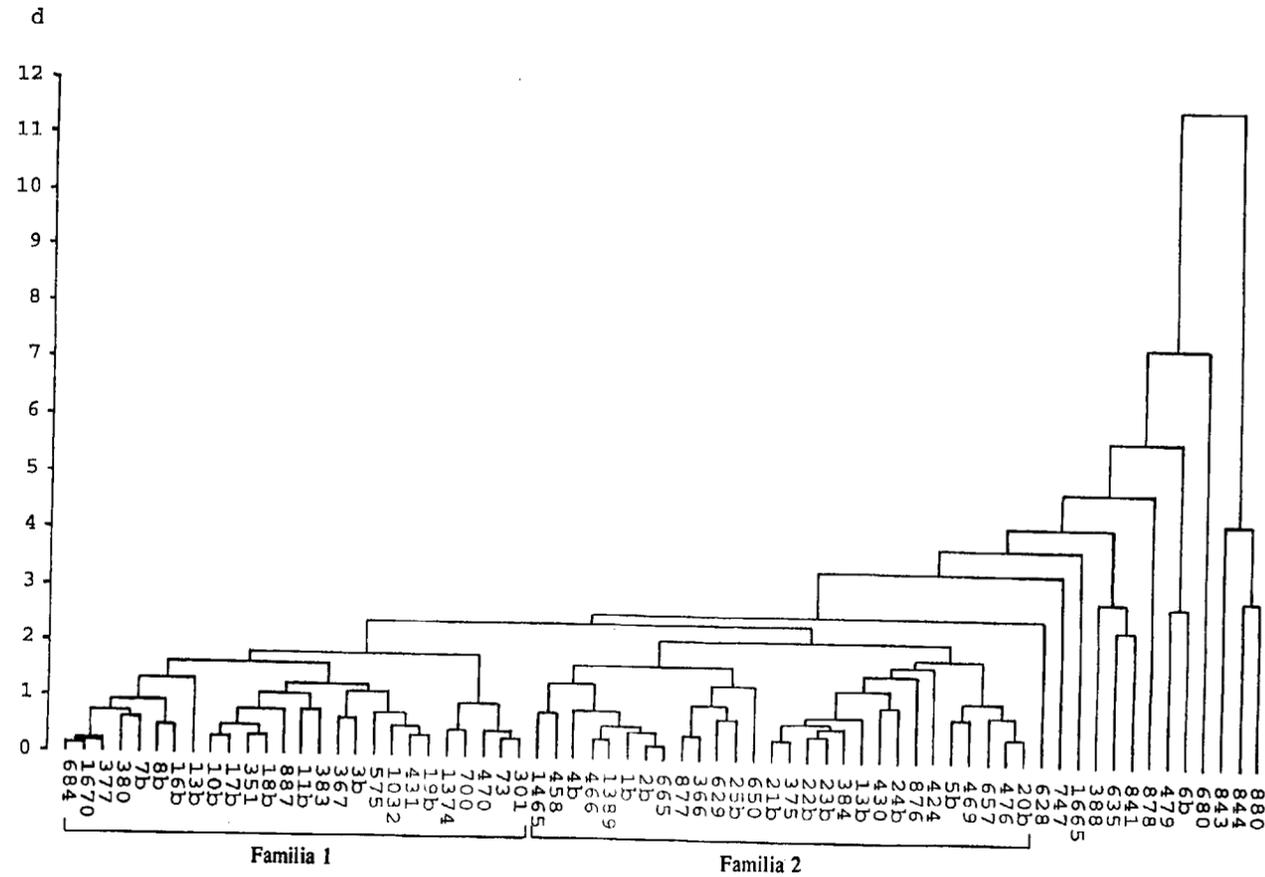


Figura 11. Cluster de observaciones.

	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁼	SO ₄ ⁼	SiO ₂	TSD	COND.	Temp
Ca ⁺⁺	1.00										
Mg ⁺⁺	0.66	1.00									
Na ⁺	0.27	0.46	1.00								
K ⁺	-0.17	0.10	-0.04	1.00							
Cl ⁻	0.45	0.49	0.88	-0.03	1.00						
HCO ₃ ⁼	0.69	0.45	0.43	-0.21	0.41	1.00					
SO ₄ ⁼	0.40	0.58	0.41	-0.07	0.20	0.38	1.00				
SiO ₂	-0.11	-0.12	-0.07	0.34	-0.02	-0.05	-0.29	1.00			
TSD	0.70	0.69	0.84	-0.09	0.85	0.75	0.57	-0.10	1.00		
COND.	0.67	0.71	0.87	-0.03	0.90	0.63	0.46	-0.08	0.96	1.00	
Temp.	0.08	-0.10	0.03	-0.26	0.05	0.12	-0.12	-0.02	0.04	0.04	1.00

Tabla 3.-Matriz de los coeficientes de correlación entre las variables físico-químicas (Muestreo de Abril 1992).

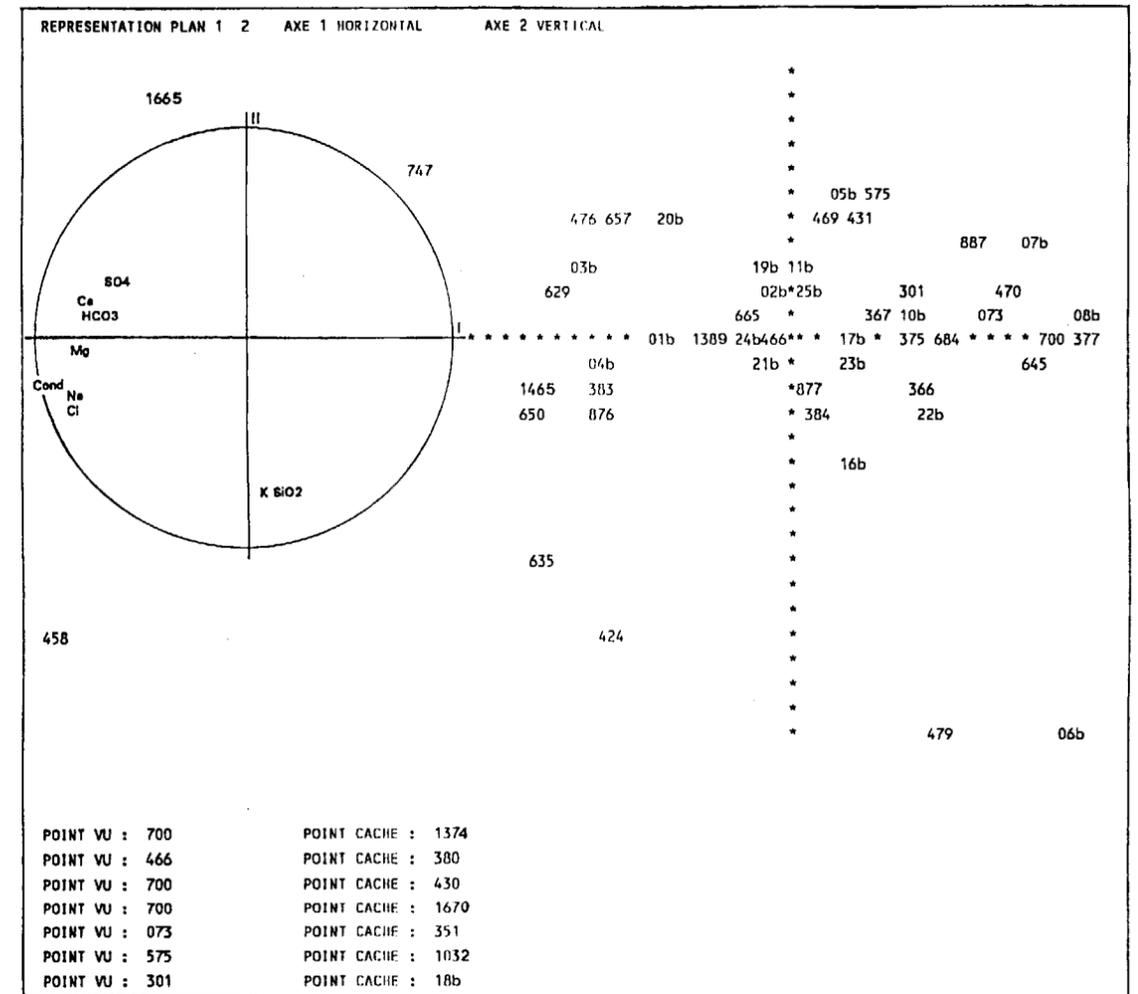


Figura 12. Representación gráfica del ACP.

nesio y los bicarbonatos, contribuyen fuertemente en el eje I, con el que mantienen un coeficiente de correlación superior a 0.7 (en valor absoluto). Por lo tanto, este eje refleja el grado de mineralización del agua (fig. 12).

El eje II está caracterizado por la sílice y el potasio. La asociación de estos dos constituyentes hace pensar en un origen de la sílice ligado a la disolución de los silicatos potásicos (fig. 12).

La distribución de las observaciones en el plano principal (fig. 12) pone de manifiesto la existencia de dos grupos de muestras: uno en la parte negativa del eje principal y otro en la parte positiva. El primero está formado por puntos de agua pertenecientes a la llanura aluvial y que tie-

nen una conductividad generalmente superior a 1000 μ S/cm; estas aguas tienen una facies hidroquímica clorurada-cálcica o clorurada cálcico-sódica, a excepción de los puntos 458 y 1665 que tienen una facies clorurada-sódica y sulfatada-sódico-cálcica, respectivamente. En la parte positiva del eje I se agrupan puntos de agua de escasa mineralización y facies hidroquímica diversa. Este grupo contiene los puntos de la zona de Oulad-Ogbane, con facies bicarbonatada-cálcica, los puntos de las terrazas fluviales y algunos puntos de la llanura aluvial con facies clorurada-sódica y/o cálcica.

Estos dos grupos identificados por el ACP coinciden de manera bastante exacta con las dos familias identificadas en el análisis cluster.

Para esquematizar las características químicas de estos dos grupos de puntos de agua, se han efectuado diferentes representaciones en diagramas de PIPER Y SCHOELLER (fig. 13).

4.5.2. Distribución espacial

La cartografía de los parámetros físico-químicos ha sido realizada basándose en los datos del muestreo de abril de 1992. A continuación, se describen los resultados obtenidos para las principales variables físico-químicas.

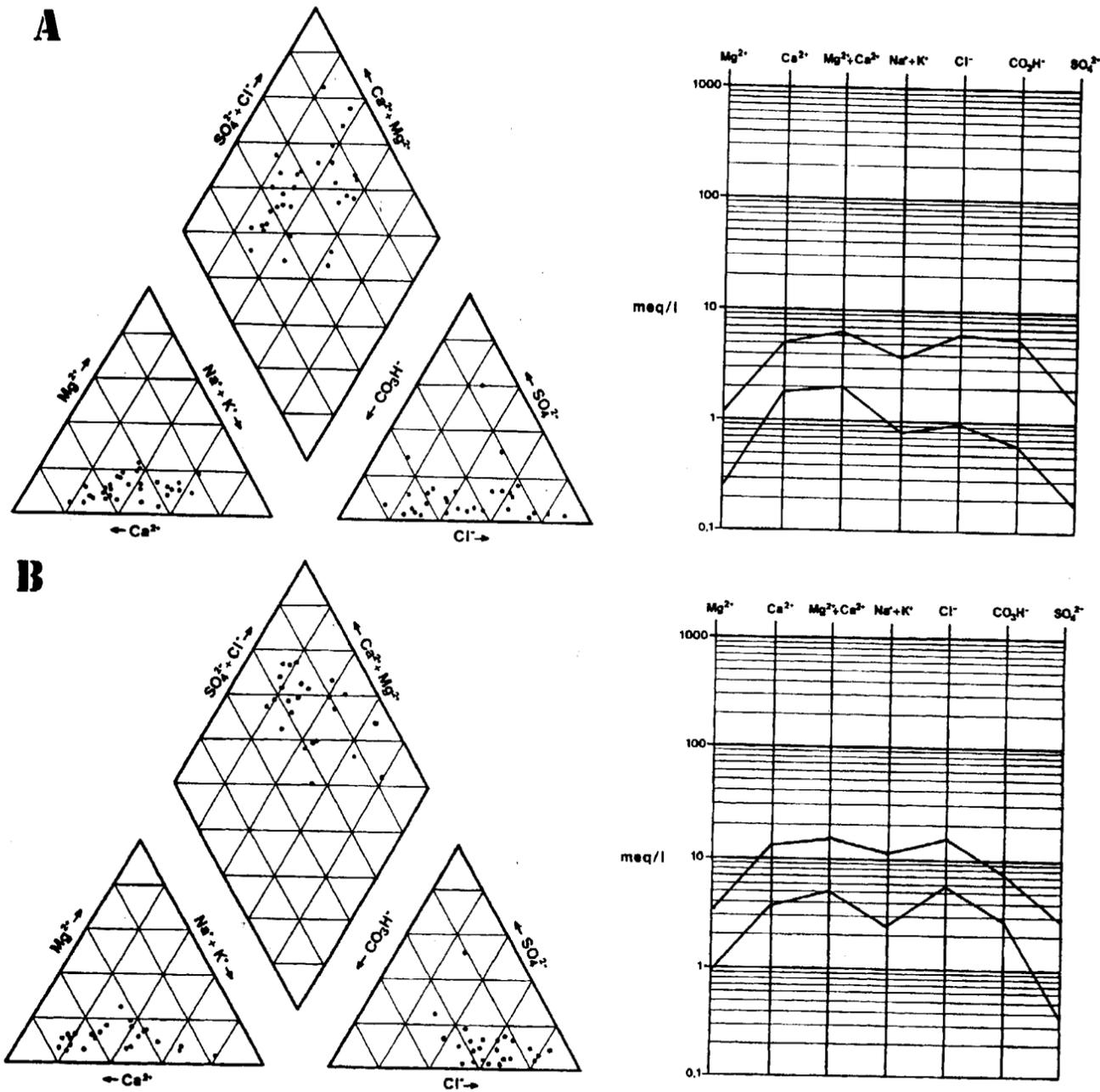


Figura 13. Diagramas de PIPER y SCHOELLER para los dos grupos de agua identificados por el análisis multivariable. (A) Grupo de Oulad-Ogbane; (B) Grupo de la llanura aluvial.

El mapa de isovalores de la conductividad eléctrica (fig. 14) pone de manifiesto un incremento en el valor de dicha variable hacia la parte inferior de la llanura del río Loukkos. En la zona de Oulad-Ogbane, las conductividades están generalmente por debajo de 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. En la zona de la depresión piezométrica se observa un incremento anormal de la conductividad, que alcanza un valor de 4620 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el sondeo 458; esta anomalía es debida a la aparición de las aguas saladas del nivel inferior. Aguas abajo de la llanura, las conductividades sobrepasan el valor de 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$; esto es el resultado de varios factores, como, por ejemplo, la naturaleza del suelo (salino y poco permeable), la escasa circulación de las aguas y la evapotranspiración, ya que el nivel del agua en esta zona está a menos de dos metros de profundidad.

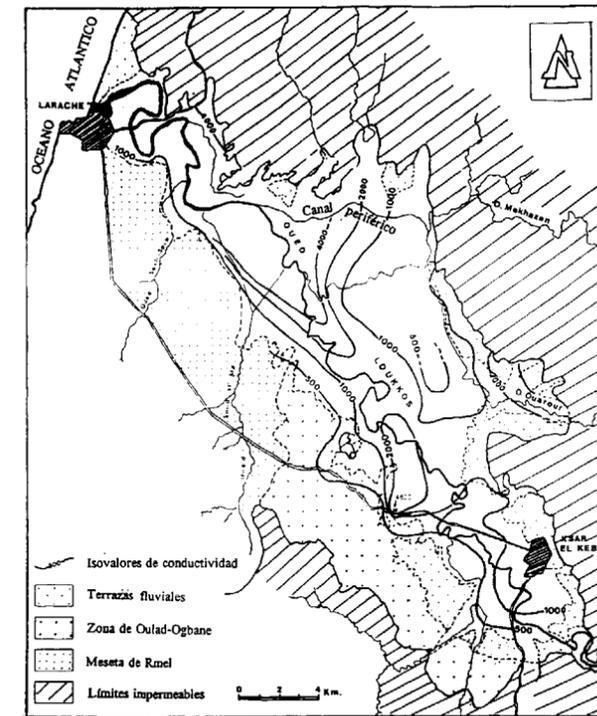


Figura 14. Mapa de isovalores de conductividad en $\mu\text{S}/\text{cm}$ (abril 1992).

Se han confeccionado también los mapas de isocontenidos en cloruros, sulfatos y calcio (BOUHMADE, 1994). En general, la distribución espacial de las concentraciones en estos iones

mayoritarios es muy semejante a la mostrada por la conductividad eléctrica, por lo que no se incluyen en este trabajo. No obstante, a continuación se describen las principales características de tales mapas.

El contenido de los cloruros aumenta generalmente de la parte superior a la parte inferior de la llanura del río Loukkos, donde se observa un aumento notable de las concentraciones en el sentido del flujo. En la zona de Oulad-Ogbane, el contenido en cloruros es generalmente inferior a 50 mg/l. En la zona de la depresión del nivel piezométrico existe un máximo relativo (sondeo 458), en el que el contenido en cloruros alcanza un valor de 1242 mg/l.

Las concentraciones más elevadas en sulfatos se alcanzan cerca de la desembocadura del río Loukkos. En la zona de Oulad-Ogbane el contenido en sulfatos es generalmente inferior a 50 mg/l. En el centro de la llanura se encuentra un valor máximo de 748 mg/l en el pozo 1665.

En cuanto a los contenidos en calcio, se observa igualmente que en la zona de Oulad-Ogbane las concentraciones son generalmente inferiores a 50 mg/l, mientras que los valores máximos son alcanzados en la parte inferior de la llanura.

4.5.3. Variaciones en el tiempo de las características físico-químicas. Mezclas de agua

Durante el período de control, se ha constatado que la conductividad varía notablemente en la llanura aluvial, mientras que en la zona de Oulad-Ogbane las variaciones son más moderadas.

En la llanura aluvial se observa en general un incremento de la conductividad en el invierno y una disminución en el verano. La evaporación estival intensa debe provocar la concentración de las sales en la zona no saturada. Después de las precipitaciones del invierno, el lixiviado de las mismas induce el incremento de la conductividad.

En algunos sondeos de la zona de depresión de la superficie piezométrica, y sobre todo en el sondeo 458 (ver corte AA' y BB' de la figura 6), se han observado frecuentes variaciones de la calidad química del agua que no están ligados al efecto de la evaporación.

En el sondeo 458, se ha registrado una variación de la conductividad entre 361 y 4620 $\mu\text{S}/\text{cm}$ entre febrero de 1991 y agosto de 1992. Este sondeo presenta desde hace varios años variaciones periódicas de su mineralización, según algunas medidas efectuadas por la ONEP (Office Nationale des Eaux Potables).

Entre las cuatro campañas de muestreo realizadas, las medidas de conductividad tomadas son las siguientes: 361 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en Febrero 91, 460 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en Noviembre 91, 4620 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en Abril 92 y 3660 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en Agosto 92. La facies del agua cambia también; es bicarbonatada-cálcica cuando las conductividades son bajas y clorurada-sódica en el caso de las conductividades altas.

La explicación de este fenómeno se encuentra en la alimentación lateral del acuífero. En efecto, si observamos el corte litológico AA' (fig. 6), se constata que la formación permeable del sondeo 458 es realmente una prolongación de los niveles ocupados por aguas salinas del centro de la llanura. Por otra parte, en la parte meridional de este corte, entre el sondeo 458 y 470, se observa la existencia de una capa margosa que impide un contacto completamente abierto con los conglomerados de Oulad-Ogbane. Por lo tanto, la alimentación subterránea hacia el sondeo 458 depende del nivel piezométrico en la zona de

Oulad-Ogbane: se produce recarga de este tipo en el caso de una situación tipo "Trop-plein". Así, cuando hay alimentación de parte de la zona de Oulad-Ogbane, el agua captada en el sondeo 458 es agua dulce, que tiene las características hidroquímicas de la zona de Oulad-Ogbane (facies bicarbonatada-cálcica y baja mineralización). En cambio, cuando el nivel del agua baja, el agua captada aumenta sensiblemente su mineralización y su facies pasa a ser clorurada-sódica, de acuerdo con lo establecido para los niveles inferiores de la llanura central.

Se aprecia como la variación de la conductividad en este sondeo está ligada sobre todo a la distribución e intensidad de las aportaciones pluviométricas, pero también puede estar condicionada por otros factores que, a su vez, tienen influencia sobre la alimentación lateral de la llanura aluvial, como el funcionamiento o el paro del bombeo en los sondeos de la zona de Oulad-Ogbane.

En algunos sondeos situados en la zona de depresión de la superficie piezométrica (466, 1389 y 1465) se aprecia también el efecto de la mezcla de aguas salinas del nivel inferior de la llanura (representado por la muestra del sondeo 458) y de las aguas de la zona de Oulad-Ogbane (muestras 470 y 1374), aspecto que se corrobora por la

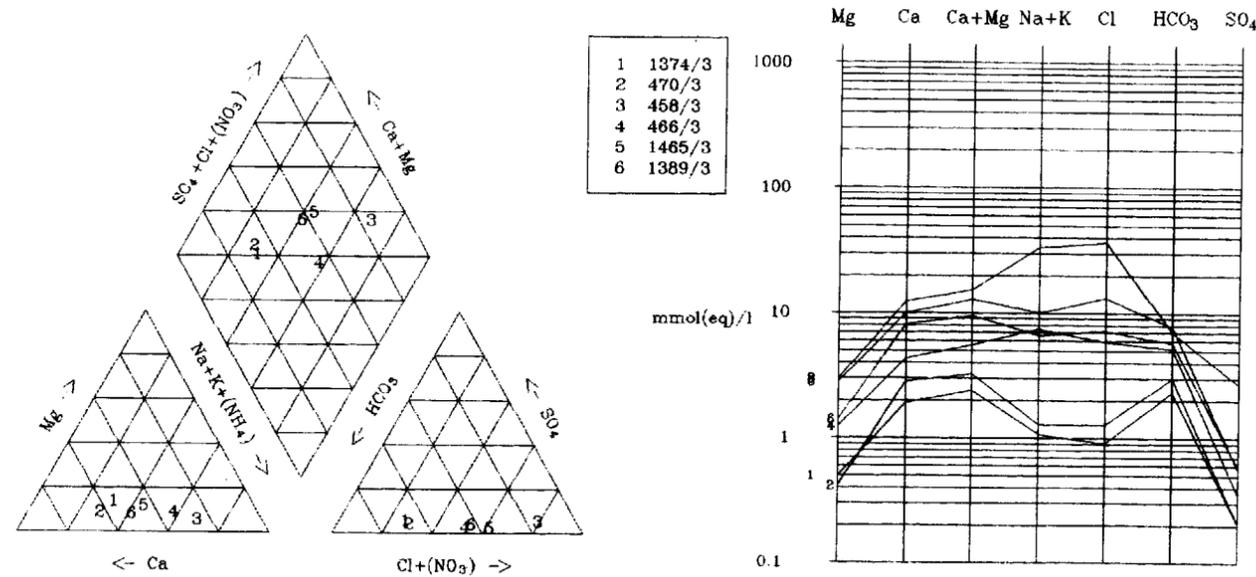


Figura 15. Representación del fenómeno de mezcla de aguas en el diagrama de PIPER y SCHOELLER.

posición de los puntos de agua en el diagrama de PIPER (fig. 15).

Este proceso de mezcla ha sido confirmado también por el análisis cluster y el ACP. En el primero, se constata que los puntos de agua 1465, 1389, 466 y 458 están estrechamente relacionados y, por otra parte, presentan una correlación notable con la familia de las aguas de Oulad-Ogbane. En el plano principal del ACP, los puntos de agua 1465, 1389 y 466 están situados entre los dos casos extremos: el punto 458 y los puntos de agua de la zona de Oulad-Ogbane.

4.5.4. Calidad de las aguas

La ciudad de Ksar-El-Kebir se abastece exclusivamente a partir de las aguas subterráneas. Una parte de estas aguas proviene del manto de Rmel y la otra parte es bombeada en 7 sondeos (466, 458, 1389, 1465, 470, 1374 y 700) situados en un sector de aproximadamente 10 km^2 al NO de Ksar-El-Kebir, que coincide en general con el cono de depresión de la superficie piezométrica. Las aguas de estos sondeos son recogidas en un depósito de la ONEP y distribuidas posteriormente después de su tratamiento.

En lo que se refiere a la calidad química, las aguas de los sondeos de Oulad-Ogbane (470, 1374 y 700) son consideradas potables y de buena calidad. Las aguas de los sondeos 466, 1389 y 1465 son generalmente aceptables, mientras que las aguas del sondeo 458 presentan una variación en su calidad: a veces el agua captada es dulce y otras veces es salobre, con contenidos de cloruros y de sodio que sobrepasan los valores máximos admisibles, por las razones que ya se han descrito.

El abastecimiento de la población rural dispersa se realiza gracias a varios pozos. Con excepción del pueblo Snaija, que se abastece del pozo 1665, que tiene un agua que sobrepasa los límites de potabilidad para el sodio y el sulfato, la mayoría de los pueblos consumen agua de calidad aceptable a tolerable.

Actualmente, el perímetro cultivado en la vega del Loukkos es regado esencialmente por aguas superficiales. Sin embargo, aún persisten agricultores que usan el agua subterránea. Para el análisis de la calidad de las aguas subterráneas

para el riego en el sector estudiado, se ha utilizado la clasificación del *United States Salinity Laboratory Staff*. En la figura 16, se puede ver la posición que ocupan las muestras de agua del sector estudiado. Se constata que las aguas de la zona de Oulad-Ogbane son generalmente del grupo C2-S1, es decir que no hay riesgo de alcalinización, mientras que el riesgo de salinización es medio; por consiguiente, estas aguas son de buena calidad para el riego. Las aguas de la llanura aluvial destinadas al regadío son generalmente del grupo C3-S1, es decir, con alto riesgo de salinización y bajo riesgo de alcalinización.

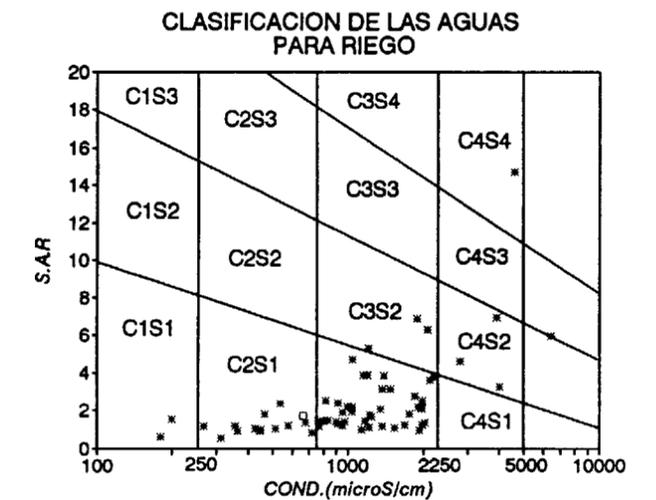


Figura 16. Clasificación de las aguas para riego (Abril 1992), en función de la conductividad eléctrica y la relación de absorción de sodio SAR. (El cuadrado representa las aguas del río Loukkos).

Por otra parte, las aguas superficiales que son utilizadas actualmente son del grupo C2-S1, según los análisis efectuados en el curso del presente estudio.

Entre las principales fuentes puntuales de contaminación de las aguas subterráneas se encuentran los residuos líquidos urbanos e industriales que son vertidos directamente y sin tratamiento en el río Loukkos, y los residuos sólidos urbanos que son depositados en un vertedero situado a 5 km al oeste de Ksar-El-Kebir.

En cuanto a las fuentes extensas de contaminación, corresponden esencialmente a las actividades agrícolas. La modernización de la agricultura, y por consiguiente la utilización intensa de fertilizantes y pesticidas, puede causar un deterioro de la calidad de las aguas subterráneas de la llanura aluvial.

En ambos casos, se carece -en el marco de la presente investigación- de datos suficientes para evaluar el posible impacto ambiental de las citadas fuentes sobre las aguas subterráneas del sector estudiado, aspecto que, por otra parte, se aleja de los objetivos generales de caracterización hidrogeológica que se perseguían.

5. CONCLUSIONES

Los materiales permeables de la cuenca baja del río Loukkos (Marruecos) son, en su mayoría, conglomerados villafranchienses en la zona de Oulad-Ogbane y aluviones cuaternarios en la llanura aluvial. La geometría del sustrato impermeable presenta al oeste de Ksar-El-Kebir una depresión alargada en la dirección NO-SE, con profundidades máximas de más de 50 m bajo el nivel del mar.

La precipitación media anual es de 650 mm, y la temperatura media anual supera ligeramente los 17° C; en cuanto a la evapotranspiración potencial media anual, es de 890 mm, mientras que la evapotranspiración real media anual es de 470 mm.

El flujo subterráneo regional se realiza hacia la desembocadura, aunque a pocos kilómetros al NO de Ksar-El-Kebir se ha puesto de manifiesto la existencia de una depresión de la superficie piezométrica, inducida por el bombeo en varios sondeos situados en este sector y que están destinados al abastecimiento de dicha población. A partir de varios ensayos de bombeo, se deducen transmisividades entre 10^{-4} y 10^{-2} m²/s, mientras que los coeficientes de almacenamiento están comprendidos entre $4 \cdot 10^{-4}$ y 10^{-2} .

La recarga del acuífero se produce principalmente a partir de la precipitación sobre los afloramientos permeables, con un coeficiente de infiltración del orden de 18.5%. En cuanto a las salidas, la descarga más significativa debe ser la

evapotranspiración en las zonas donde el nivel piezométrico está a una profundidad inferior a 2 metros.

Los análisis químicos realizados muestran que el contenido salino de las aguas subterráneas varía entre 130 mg/l y 30 g/l y que la facies hidroquímica es clorurada cálcica y/o sódica en la llanura aluvial, y bicarbonatada cálcica en la zona de Oulad-Ogbane. En la cartografía de las principales características físico-químicas, se observa un incremento de los contenidos en el sentido del flujo. El análisis multivariable de los datos hidroquímicos muestra la existencia de una correlación elevada entre la conductividad eléctrica, los cloruros y el sodio, e indica la existencia de dos familias principales de aguas que agrupan las aguas pertenecientes a la zona de Oulad-Ogbane, con bajo contenido salino, y las aguas que pertenecen a la llanura aluvial. El mismo de las aguas de la zona de Oulad-Ogbane debe responder fundamentalmente a la concentración por evapotranspiración del agua de lluvia y a la disolución de calcita en la zona de infiltración. En cuanto a las aguas de la llanura, la salinidad se incrementa básicamente debido al carácter menos permeable de parte de los materiales a través de los cuales se realiza el flujo, además del efecto adicional de evapotranspiración debido a la escasa profundidad del nivel piezométrico y a la naturaleza salina de algunos horizontes edáficos.

También se ponen de manifiesto fenómenos de mezcla de aguas en la zona de la depresión de la superficie piezométrica y se observan variaciones temporales de la calidad físico-química del agua en algunos puntos de la llanura, que están relacionadas con la alimentación lateral procedente de la formación de Oulad-Ogbane.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado con financiación parcial de la CICYT a través del Proyecto NAT91-0598. Queremos agradecer al Sr. ABDALLAH GAIZ, Ingeniero-Director de la Región Hidráulica del Loukkos y a los Sres. Kell y Bouaarfa, Ingenieros del Servicio de Hidrogeología de la DRH, por su ayuda a la hora de los muestreos y por facilitarnos parte de la información de base de esta investigación.

REFERENCIAS

- ÁIT BRAHIM, L. (1991): *Tectonique cassante et états de contraintes récentes du Maroc du Nord*. Thèse d'Etat. Univ. Mohamed V. Rabat.
- BOUHADI, B. (1994): *Etude hydrogéologique et hydrogéochimique des aquifères du bassin du Bas-Loukkos*. Thèse de 3^{ème} cycle. Univ. Abdelmalek Essaâdi, Tetuán.
- BOUHADI, B., BENAVENTE, J. y CRUZ-SANJULIAN, J. J. (1994): Geometría, piezometría y parámetros hidráulicos de los acuíferos de la cuenca baja del río Loukkos. *Geogaceta*. nº 16, pp. 11-14.
- DAKI, M. y EL AGBANI, M. A. (1993): Jornadas científicas sobre bases ecológicas para la restauración de humedales en la cuenca mediterránea. La Rábida (Huelva). 9 pp. (Difusión restringida).
- D. R. H. (1985): *Interprétation des essais de pompages entrepris sur les forages Sunabel entre le 27/9/85 et le 3/11/85*. Rapport nº 8, SHG/DRH. Inédito.
- D. R. H. (1987): *Etude hydrogéologique de la nappe de Rmel, Région de Larache*. Rapport nº 87/DRH/003/SHG. Inédito.

EL FATH, A. y HADDANE, M. (1991): *Note complémentaire sur le Habt de Larache*. Rapport/SRG/TANGER/nº 11. Inédito.

EL GHARBAOUI, A. (1981): *La terre et l'homme dans la péninsule tingitaine*. Trav. de l'Inst. Sc. Service géol. et géogr. phys. Rabat. 439 pp.

MESSAOUD M. (1961): *Note préliminaire sur l'hydrogéologie du bassin du Bas-Loukkos*. Rapport du Serv. des ress. en eau. 47 pp. Rabat. Inédito.

MINISTERE DE L'AGRICULTURE. DIRECTION DE LA MISE EN VALEUR (1974): *Reconnaissance géophysique par prospection électrique dans la région de Larache*. Inédito.

O.N.I. (1961): *Etude géophysique et sondages mécaniques au Loukkos*. Inédito.

RAMON LLUCH, R. (1987): *Tratamiento automático en microcomputadora de datos geológicos en forma gráfica*. Tesis Doctoral. Universidad del País Vasco.

SUTER, G. y FIESCHTER, G. (1966): Rif méridional: Aperçu structural sur la région de Zoumi-Ouezzane et le pays du Habt. *Notes et Mém. Serv. géol. Maroc*, nº 188, pp. 15-20.

Original recibido: Septiembre de 1994.

Original aceptado: Diciembre de 1994.

ROCAS INDUSTRIALES Y ORNAMENTALES

Caracterización y posibilidades de aprovechamiento de las arenas silíceas de la Unidad del Aljibe (Olvera, Cádiz).

Por M. LEON (*), M. I. CARRETERO (**) y J. ROBREDO (***)

RESUMEN

Las arenas silíceas estudiadas pertenecen a la Unidad del Aljibe, incluida en el Flysch del Campo de Gibraltar, de edad Oligoceno Superior-Mioceno Inferior. A partir de un estudio regional, se han seleccionado cuatro zonas en las que se tomaron 33 muestras representativas, para proceder a su caracterización granulométrica, mineralógica y química. Dadas las características del material bruto junto a las grandes reservas y buenos accesos, y teniendo en cuenta las especificaciones requeridas para los principales usos industriales de este tipo de materiales, se deduce que estas arenas son aptas para su utilización en vidrios, abrasivos, filtros, refractarios y moldes de fundición.

Palabras clave: Arenas silíceas, caracterización, aplicaciones, Unidad del Aljibe, Cádiz.

ABSTRACT

Siliceous sands from Aljibe Unit (Gibraltar Flysch, Upper Oligocene-Lower Miocene), located close to Olvera, Cádiz, have been studied. From a regional survey, four zones were selected and sampled. According to the granulometrical, mineralogical and chemical data of these sands, their main applications could be for glass, filters, refractories and mouldry sands.

Key words: Siliceous sands, applications, Aljibe Unit. Cádiz.

1. INTRODUCCION

El consumo de arenas silíceas se ha incrementado notablemente en España. Las arenas silíceas se emplean, fundamentalmente, en la industria del vidrio y cerámica, para la fabricación de moldes de fundición y refractarios, y como abrasivos y filtros (IGME, 1975; LEFOND, 1983; HARBEN, 1991; BUSTILLO, 1993).

Las arenas para vidrios deben ser cuarzosas, de gran pureza. La sílice debe encontrarse por encima del 95% (preferiblemente superior al 99%) y

el resto de los elementos presentar una cierta homogeneidad, dentro de un intervalo, a la hora de un suministro continuado. Impurezas como chert, calcedonia, arcillas y espinelas son indeseables. Los contenidos de las diferentes sustancias perjudiciales varían entre límites muy amplios, dependiendo de la calidad del vidrio que se pretende fabricar. Así, el porcentaje de Fe_2O_3 para vidrio óptico no debe ser superior al 0.01%, y no debiendo sobrepasar el 0.1% para el vidrio plano, sin embargo, para la fabricación de botellas de coloración verde puede llegar hasta el 0.25-0.30%, y la cantidad de Al_2O_3 para vidrio común puede llegar hasta el 1%, no debiendo sobrepasar el 0.1% para su empleo en vidrio óptico. Respecto de la granulometría, se requiere un porcentaje cuyo diámetro esté comprendido entre 0,8 y 0,1 mm.

Las arenas para refractarios, deben contener un elevado contenido en cuarzo, Al_2O_3 menor del 1.5%, Fe_2O_3 menor del 2.5%, TiO_2 inferior al 0,2% y mínima calidad de álcalis, buena cohesividad y una densidad mínima de 2 g/cc.

Las arenas de fundición y arenas de moldeo, se emplean en siderurgia para la elaboración, respectivamente, de núcleos y moldes para contener metales fundidos. Las arenas de fundición deben poseer más de un 98% de SiO_2 y álcalis inferior al 1%. Las arenas de moldeo requieren exigencias algo menores, con un contenido en sílice superior al 85% y la suma total de Fe_2O_3 , K_2O , Na_2O , MgO y CaO ser inferior al 5.8%. En ambos casos no deben contener sulfatos y el contenido en carbonatos, expresados como CO_2 debe ser inferior al 0.4%.

Las arenas que se emplean en la industria cerámica se caracterizan, fundamentalmente, por poseer una granulometría muy fina, estar exentas de granos calizos y tener bajas cantidades de Al_2O_3 y Fe_2O_3 .

Las arenas para filtros y abrasivos constituyen los rechazos groseros (0.8-1.6 mm de diámetro). Es deseable en ellas la ausencia de partículas finas y blandas, así como una composición mineralógica y química homogéneas. Las arenas para filtros además deben presentar un coeficiente de uniformidad y redondez alto.

En España, las explotaciones de arenas silíceas más importantes se sitúan en el norte y oeste de la península (ITGE, 1983; VAZQUEZ GUZMAN, 1987; GRIFFITHS, 1991), explotándose las arenas silíceas, más o menos caoliníferas, del Aptense-Albense de la Cordillera Ibérica, niveles cuaternarios e incluso areniscas de la formación Cuarcita Armoricana.

En Andalucía las principales explotaciones se localizan en la provincia de Cádiz asociadas a depósitos postorogénicos de edad Mio-Plioceno, destacando por su producción las canteras de Arcos de la Frontera. En otros casos se benefician arenas cuaternarias, como las de Gibraleón (Huelva). Sería de interés económico e industrial el conocimiento de nuevas reservas de estos materiales, o bien el estudio de las posibilidades de aprovechamiento a nivel industrial de yacimientos conocidos y no explotados en la actualidad.

La zona de Olvera (Cádiz) presenta buenas posibilidades para la explotación de arenas. Dos muestras representativas de esta formación (arena amarilla y arena blanca) han sido estudiadas por RUIZ ABRIJO et al. (1989) indicando el gran interés industrial de estos materiales.

El objetivo de este trabajo es caracterizar las arenas silíceas de la Unidad Aljibe en las proximidades de Olvera (Cádiz), diferenciando las zonas de interés económico y evaluando sus posibles aplicaciones industriales.

2. CONTEXTO GEOLOGICO

Las arenas silíceas estudiadas se encuentran en las proximidades de Olvera (Cádiz) (fig. 1), y pertenecen a la Unidad del Aljibe, que diferentes autores incluyen en el Flysch del Campo de Gibraltar, aunque su carácter flyschoides ha sido muy discutido (CRUZ SANJULIAN, 1974; PENDON, 1974). Esta unidad, claramente alóctona, está formada por areniscas silíceas, con limos y arcillas arenosas intercaladas en menor proporción (fig. 2), en capas de espesor variable, de techo plano y muro ligeramente curvo, que en conjunto puede alcanzar los 200 m de potencia. El color es blanquecino a amarillento, excepto cuando presenta una cierta ferruginización debido a procesos de meteorización y/o edáficos.

Las areniscas se encuentran fragmentadas en bloques movidos unos con respecto a otros, presentando, localmente, una disposición caótica. Su estructura interna es compleja, con pliegues disarmónicos, despegues y pequeñas fracturas. Por consideraciones regionales se les atribuye una edad Oligoceno superior-Mioceno inferior (CHAUVE, 1968, BOURGOIS et al., 1972). Se trata de facies proximales de depósitos de valles y cañones submarinos de borde continental, cuya área fuente podrían ser macizos ígneos ligeramente metamorfizados (PENDON, 1978).

3. MATERIALES Y METODOS

Tras un reconocimiento general de toda la zona, en el que se estudiaron diversas muestras superficiales, se seleccionó como área óptima por su posible interés económico, la situada al NE

(*) Area de Cristalografía y Mineralogía, Universidad de Extremadura. Avda. de Elvás, s/n, 06071 Badajoz

(**) Dpto. Cristalografía, Mineralogía y Q. Agrícola, Universidad de Sevilla. C/ Prof. García González s/n, 41071 Sevilla

(***) Geominas S.C. Constantina (Sevilla)

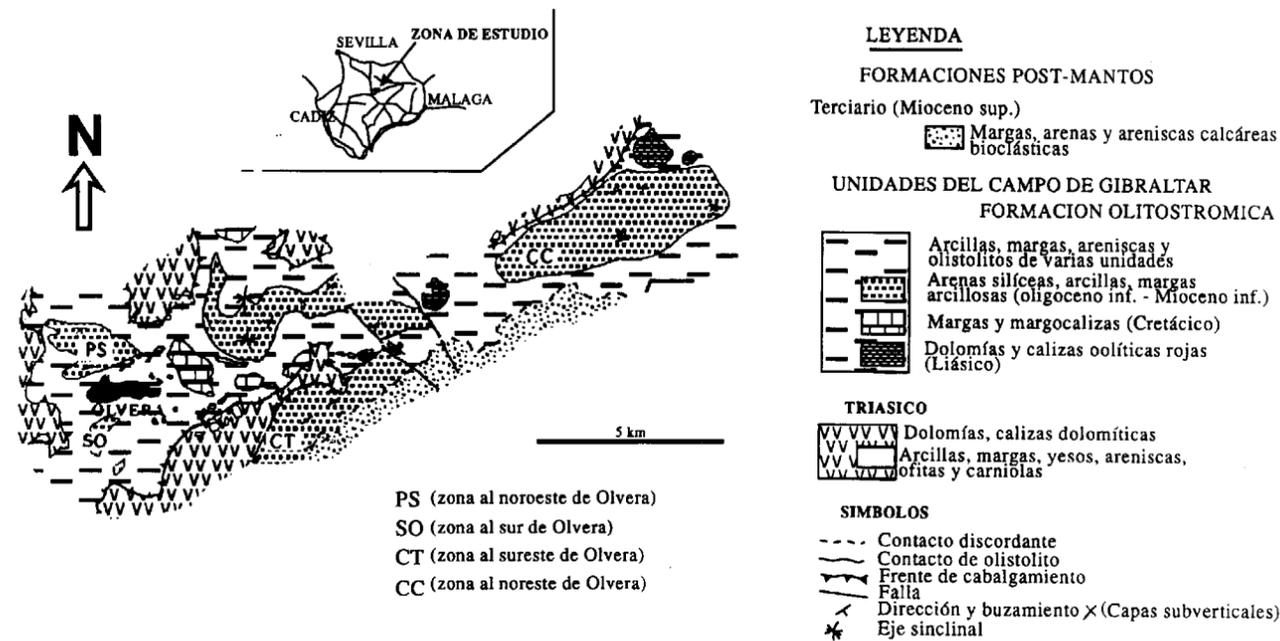


Figura 1.-Situación geológica de la zona de estudio.

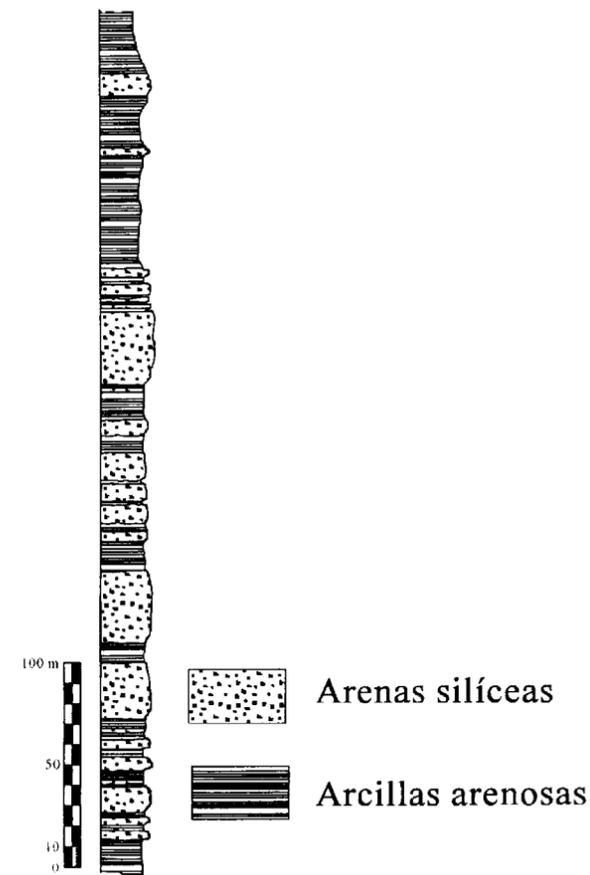


Figura 2.-Columna litológica de la Unidad del Aljibe, en la zona estudiada.

de Olvera, donde se realizó una prospección de detalle a partir de calicatas y sondeos mecánicos. En este área se eligieron cuatro zonas (fig. 1) de las que se tomaron en total 33 muestras, cuyas coordenadas de situación se presentan en la Tabla 1.

Zona CC. Corbones-La Cañada. Situada al Noroeste de Olvera. Muestras CC-1 a CC-14. Excelentes accesos y grandes reservas.

Zona SO. Olvera Sur. Localizada al Sur de Olvera. Muestras SO-1 a SO-4. Escasas reservas, malos accesos.

Zona CT. Carretera a Torre Alháuquime. Zona al Sureste de Olvera. Muestras CT-1 a CT-9. Grandes reservas, buenos accesos.

Zona PS. Puente Salado. Situada al Noroeste de Olvera. PS-1 a PS-6. Buenas reservas y regulares accesos.

La caracterización de las muestras se realizó mediante análisis mineralógico, granulométrico y químico. También se determinó la densidad en algunas de ellas.

Zona estudiada	X	Y
CC-1	311.000	4.094.700
CC-14	311.000	4.094.000
SO-1	298.300	4.089.000
SO-4	298.300	4.088.500
CT-1	303.300	4.089.200
CT-4	303.000	4.088.500
PS-1	298.000	4.091.500
PS-6	298.000	4.091.000

Tabla 1.-Coordenadas de situación de las muestras estudiadas.

El estudio mineralógico se efectuó a 14 muestras mediante difracción de rayos X, usando el método de polvo desorientado, barriendo el intervalo de 3-70° de 2θ, en un difractómetro Phillips PW 1730. Los minerales pesados se reconocieron con lupa binocular, previa separación con bromoformo.

El análisis granulométrico se realizó en todas las muestras por tamizado en vía húmeda, con luces de malla de 1.25, 0.85, 0.63, 0.1 y 0.05 mm. Las fracciones >1.25, 1.25-0.85, 0.85-0.63 y 0.63-0.1 se denominaron A, B, C y D, respectivamente.

Vidrios	Refractarios	Moldeo/Fundición	Cerámica	Abrasivos	Filtros
SiO ₂ 95-99.8%	Mínima cantidad de álcalis	SiO ₂ > 85% (moldeo) SiO ₂ > 98% (fund)	SiO ₂ > 97%	Composición mineralógica y química homogéneas	Composición mineralógica y química homogéneas
Homogeneidad en su composición	d ≥ 2g/cc	Sin caliza o sulfatos	Al ₂ O ₃ < 0.55%	Ausencia de partículas finas y blandas	Uniformidad y redondez alta
Fracción útil: 0.8-0.1 mm	Elevado contenido en cuarzo	Fe ₂ O ₃ +K ₂ O+Na ₂ O+Mgo+CaO < 5.8% (moldeo)	Fe ₂ O ₃ < 0.2%	Fracción útil 0.8-1.6 mm	Fracción útil: 0.8-1.6 mm
Fe ₂ O ₃ : 0.01-0.3	Fe ₂ O ₃ < 2.5 % TiO ₂ < 0.2 %	Alcalis < 1.0% (fund)	granulometría muy fina		
Al ₂ O ₃ : 0.1-1%	Al ₂ O ₃ < 1.5 %				

Tabla 2.-Algunas especificaciones para usos comunes de arenas silíceas (según IGME, 1975; HARBEN, 1991; BUSTILLO, 1993).

El estudio morfoscópico se llevó a cabo sobre las fracciones A y B de cinco muestras, evaluándose la forma de los granos (ZINGG, 1935), redondez (POWERS, 1953) y esfericidad (KRUMBEIN y SLOSS, 1955), y describiéndose las texturas superficiales, mediante lupa binocular.

La composición química fue determinada de cada una de las fracciones B, C y D de siete muestras. Los elementos mayoritarios, a excepción de la sílice, se midieron por espectrofotometría de absorción atómica (Na y K por emisión) previa disolución de la muestra mediante ataque triácido (BENNET y REED, 1971). La sílice se determinó por insolubilización mediante el método del clorhídrico-gelatina. La densidad se midió en tres muestras sin tamizar utilizando un picnómetro.

Para indicar las posibles aplicaciones industriales de estas arenas se han tenido en cuenta las especificaciones requeridas para el empleo industrial de arenas silíceas, que son diferentes dependiendo del uso al que se destinen. Algunas de estas especificaciones están recogidas en la tabla 2.

4. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1. Estudio mineralógico

El cuarzo es el mineral fundamental y a veces exclusivo de estas arenas, con trazas de feldes-

patos e illita. Se ha detectado también la presencia generalizada de minerales pesados como ilmenita y rutilo, y ocasionalmente zircón, magnetita y goethita.

4.2. Análisis granulométrico

Las arenas estudiadas presentan gran homogeneidad dentro de unos ciertos intervalos (tabla 3, fig. 3). Así, los tamaños inferiores a 0.1 mm constituyen el 20-40%, los comprendidos entre 0.63 y 0.1 mm el 50-65% y los superiores a éste último diámetro el 10-20%. Las diferentes zonas presentan distribuciones de tamaños similares entre ellas, pudiéndose considerar como de granulometría más grosera las muestras de la zona PS, con una media del 18% de los granos superior a 0.63 mm y sólo un 28% inferior a 0.1 mm.

ZONAS	>0.63	0.63-0.1	<0.1
CC	2-24 (12)	43-70 (61)	17-37 (27)
SO	1-15 (12)	58-65 (62)	18-30 (26)
CT	1-17 (4)	51-65 (55)	29-47 (41)
PS	13-33 (18)	43-66 (54)	23-36 (28)

Tabla 3.-Análisis granulométrico de las muestras estudiadas, agrupadas por zonas (valores extremos, media entre paréntesis)

Contrariamente, las muestras más finas corresponde a la zona CT, con un 4%>0.63 mm y un 41%<0.1 mm.

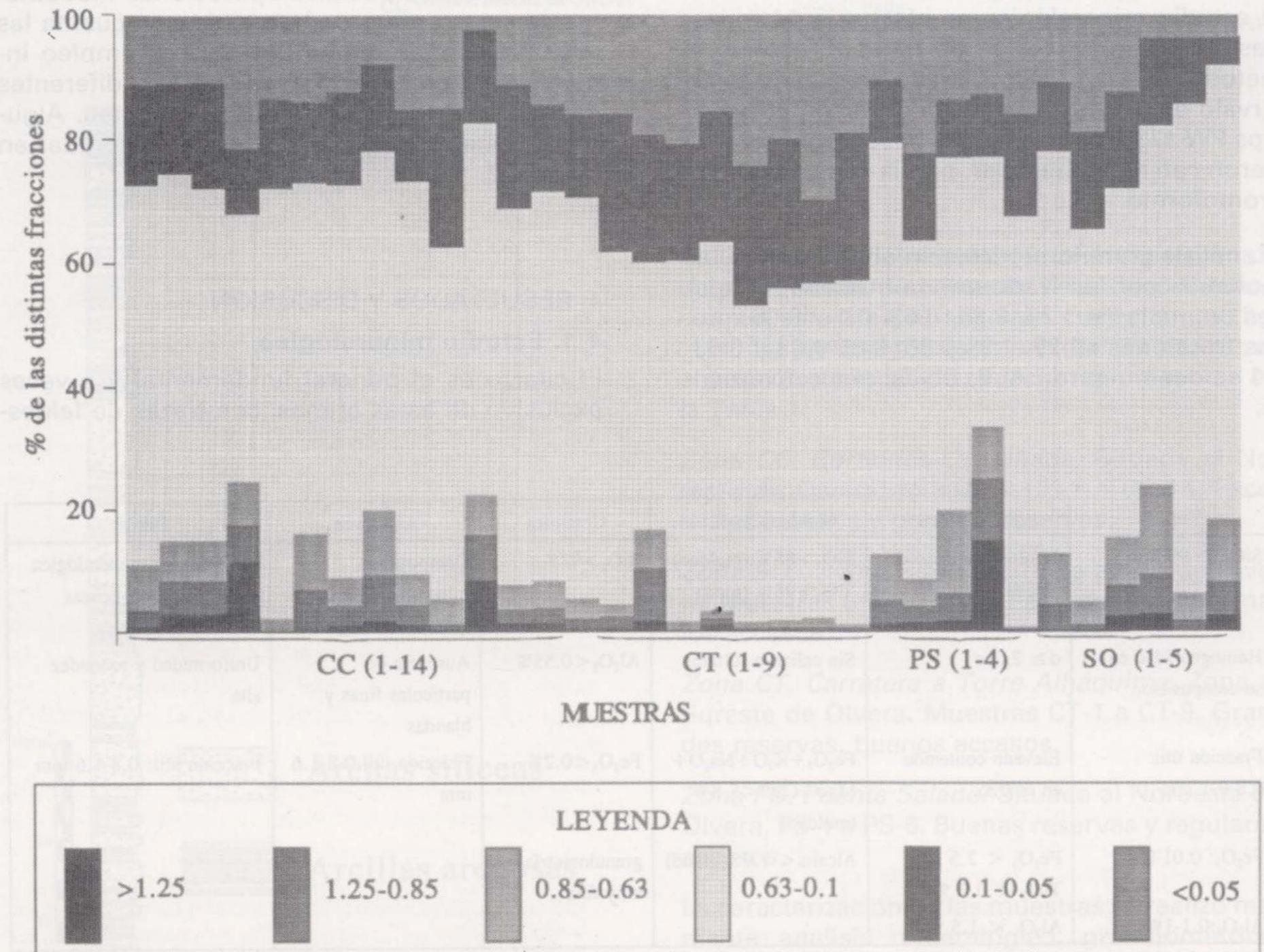


Figura 3.-Representación gráfica de los resultados del análisis granulométrico.

patos e illita. Se ha detectado también la presencia generalizada de minerales pesados como ilmenita y rutilo, y ocasionalmente zircón, magnetita y goethita.

4.2. Análisis granulométrico

Las arenas estudiadas presentan gran homogeneidad dentro de unos ciertos intervalos (tabla 3, fig. 3). Así, los tamaños inferiores a 0.1 mm constituyen el 20-40%, los comprendidos entre 0.63 y 0.1 mm el 50-65% y los superiores a éste último diámetro el 10-20%. Las diferentes zonas presentan distribuciones de tamaños similares entre ellas, pudiéndose considerar como de granulometría más grosera las muestras de la zona PS, con una media del 18% de los granos superior a 0.63 mm y sólo un 28% inferior a 0.1 mm.

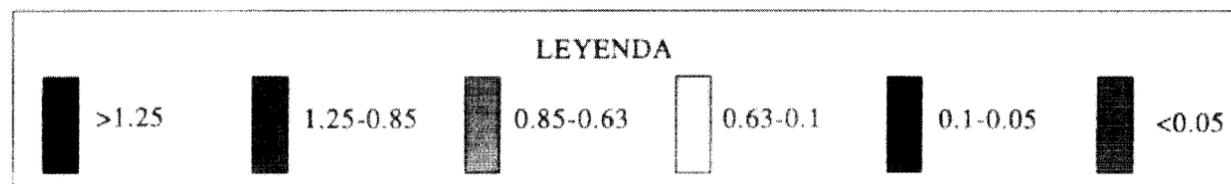
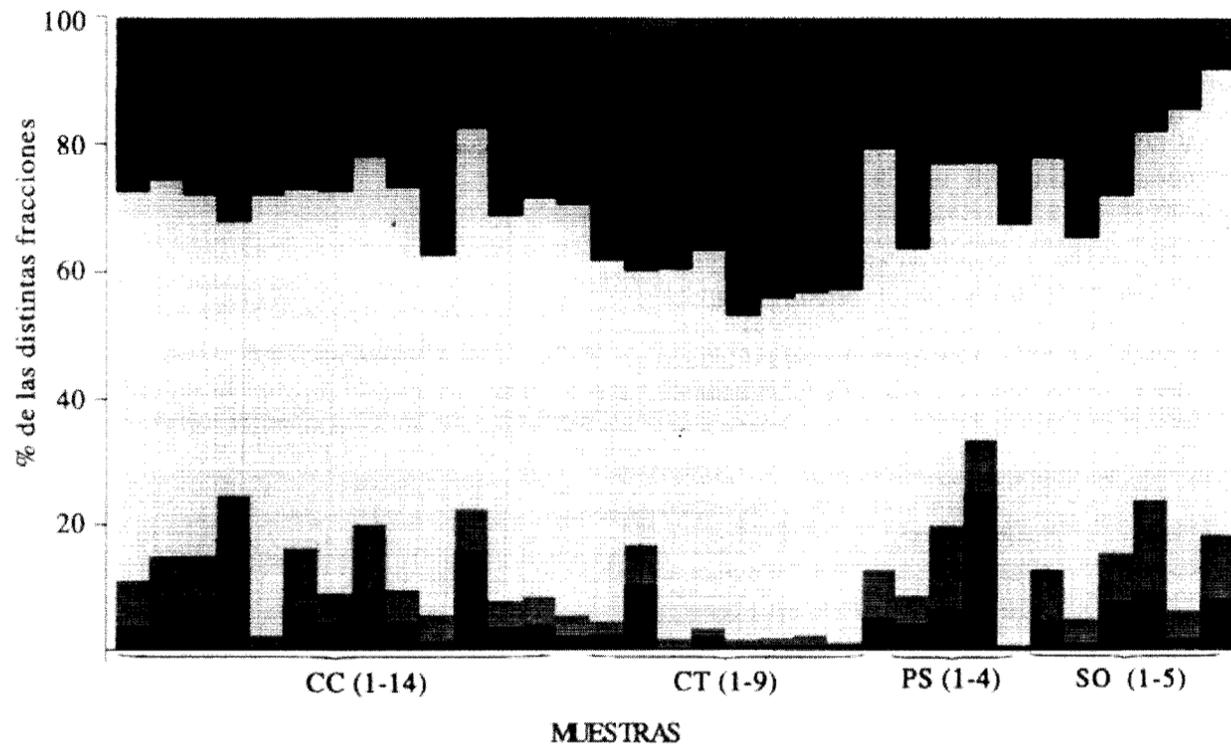


Figura 3.-Representación gráfica de los resultados del análisis granulométrico.

ZONAS	>0.63	0.63-0.1	<0.1
CC	2-24 (12)	43-70 (61)	17-37 (27)
SO	1-15 (12)	58-65 (62)	18-30 (26)
CT	1-17 (4)	51-65 (55)	29-47 (41)
PS	13-33 (18)	43-66 (54)	23-36 (28)

Tabla 3.-Análisis granulométrico de las muestras estudiadas, agrupadas por zonas (valores extremos, media entre paréntesis)

Contrariamente, las muestras más finas corresponde a la zona CT, con un 4%>0.63 mm y un 41%<0.1 mm.

4.3. Análisis morfoscópico

Los granos de las muestras estudiadas son cilíndricos y/o redondeados, con granos tabulares redondeados. Los índices de esfericidad y redondeamiento (tabla 4) son moderados a altos en las zonas CC y CT (índices de Powers y Krumbein entre 0.5 y 0.9), y algo menores en las zonas PS y SO (índices entre 0.3 y 0.7). Tanto la redondez como la esfericidad tienden a incrementarse en las fracciones más finas. Respecto a la textura superficial, los barnices son muy raros, con granos brillantes o mates en similares proporciones.

Muestras	Esfericidad	Redondeamiento
CC-5 (A)	0.5-0.9	0.5-0.7
CC-5 (B)	0.7-0.9	0.7-0.9
CC-13 (A)	0.5-0.9	0.5
CC-13 (B)	0.7-0.9	0.5-0.7
SO-5 (A)	0.3-0.7	0.3-0.7
SO-5 (B)	0.5-0.7	0.5-0.7
CT-6 (A)	0.3-0.5	0.5-0.9
CT-6 (B)	0.7-0.9	0.7-0.9
PS-3 (A)	0.5-0.7	0.5-0.7
PS-3 (B)	0.3-0.7	0.5-0.7

(A) fracción > 1.25 mm (B) fracción 1.25-0.85 mm

Tabla 4.-Resultados del análisis morfoscópico.

4.4. Análisis químico

Todas las muestras analizadas están constituidas fundamentalmente por SiO₂ (tabla 5), oscilando sus valores entre 96-98%. El contenido en álcalis es inferior generalmente al 0.5% y los alcalinotérreos no superan, en la mayoría de las muestras, el 0.3%. Los contenidos en Fe₂O₃, Al₂O₃ y TiO₂ varían entre 0.03-0.28, 0.1-2.8 y 0.3-1.5%, respectivamente. No se aprecian variaciones significativas entre muestras de diferentes zonas. Respecto a la variación de la composición química con la granulometría, se constata una tendencia de los alcalinos, alcalinotérreos y la alúmina a disminuir con el tamaño del grano. Los elementos colorantes (Fe, Ti) por el contra-

rio, son más abundantes en las fracciones más finas.

4.5. Densidad

La densidad es similar en todas las muestras. El valor oscila entre 2.62 y 2.63 g/cc.

4.6. Aplicaciones industriales

Antes de evaluar las posibles aplicaciones industriales de estos materiales, hay que señalar que los datos se refieren a muestras en bruto, que no han sufrido ningún tratamiento previo.

De acuerdo con las especificaciones requeridas para los principales usos industriales de este tipo de materiales (tabla 2), las arenas estudiadas son aptas para su utilización en la fabricación de vidrio. También pueden emplearse para abrasivos y filtros porque poseen porcentajes relativamente altos de rechazo de partículas groseras, buen redondeamiento y ausencia de partículas blandas. Para este uso sería más conveniente emplear las arenas de la zona de Puente Salado (zona PS).

Estas arenas pueden emplearse, asimismo para refractarios y moldes de fundición, dado que cumplen las especificaciones requeridas para estos usos.

CONCLUSIONES

Las arenas localizadas en las proximidades de Olvera pertenecen a la Unidad del Aljibe, incluida en el Flysch del Campo de Gibraltar, de edad Oligoceno Superior-Mioceno Inferior. Están constituidas por cuarzo, con trazas de feldespatos e illita.

La presencia de alcalinos, alcalinotérreos y alúmina disminuye con el tamaño de grano, sin embargo, los elementos colorantes son más abundantes en las fracciones más finas.

Las muestras de la zona de Puente Salado presentan una granulometría más grosera y menores índices de esfericidad y redondez que el resto de las muestras, por el contrario, las muestras más finas corresponden a la zona de la carretera de Torre Alháuquime; aunque en general no se aprecian grandes diferencias entre las muestras de las distintas zonas estudiadas.

Muestras	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P. C.
CC-5 (B)	98.1	0.10	0.16	0.18	0.02	0.21	0.15	0.61	0.21
CC-5 (C)	97.5	0.35	0.09	0.25	0.02	0.51	0.08	0.86	0.21
CC-5 (D)	97.7	0.34	0.18	0.07	0.01	0.06	0.31	1.09	0.21
CC-10 (B)	98.6	0.15	0.05	0.11	0.01	0.05	0.08	0.61	0.07
CC-10 (C)	97.5	0.88	0.03	0.47	0.05	0.13	0.13	0.61	0.11
CC-10 (D)	98.0	0.42	0.11	0.66	0.11	0.02	0.30	0.44	0.23
CC-13 (B)	97.8	0.11	0.14	0.16	0.02	0.56	0.12	0.61	0.22
CC-13 (C)	96.7	1.95	0.13	0.11	0.04	0.11	0.11	0.61	0.17
CC-13 (D)	96.9	0.41	0.28	0.12	0.03	0.14	0.37	1.48	0.24
SO-2 (B)	97.7	0.13	0.18	0.21	0.06	0.25	0.17	0.61	0.53
SO-2 (C)	97.1	0.99	0.28	0.12	0.02	0.11	0.16	0.61	0.54
SO-2 (D)	97.5	0.33	0.22	0.05	0.02	0.01	0.25	1.09	0.37
CT-1 (B)	98.9	0.14	0.09	0.14	0.02	0.11	0.11	0.31	0.07
CT-1 (C)	96.8	2.07	0.09	0.14	0.04	0.01	0.14	0.61	0.07
CT-1 (D)	97.2	0.29	0.18	0.33	0.03	0.08	0.25	1.09	0.40
CT-9 (B)	98.3	0.11	0.08	0.11	0.01	0.48	0.08	0.61	0.16
CT-9 (C)	96.0	2.79	0.16	0.11	0.02	0.13	0.12	0.44	0.13
CT-9 (D)	98.3	0.38	0.18	0.05	0.02	0.08	0.19	0.44	0.21
PS-1 (B)	98.5	0.10	0.08	0.11	0.01	0.48	0.08	0.61	0.16
PS-1 (C)	98.3	0.51	0.06	0.05	0.02	0.13	0.12	0.61	0.13
PS-1 (D)	98.5	0.22	0.18	0.05	0.01	0.08	0.19	0.44	0.21

(B) fracción 1.25-0.85 (C) fracción 0.85-0.63 (D) fracción 0.63-0.1 P.C. pérdida por calcinación

Tabla 5.-Resultados del análisis químico.

De acuerdo con las especificaciones requeridas para los principales usos industriales de este tipo de materiales, las arenas estudiadas son aptas para su utilización en la fabricación de vidrios, abrasivos, filtros, refractarios y moldes de fundición.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a los Sres. JOSE E. AZCARATE MARTIN y ALFREDO VERGARA (del grupo ARGENTARIA) el interés mostrado por este trabajo, al Dr. ADOLFO MIRAS RUIZ sus consejos y orientación, y a los Drs. ASCENSION MURCIEGO MURCIEGO y EMILIO GALAN HUERTOS la revisión crítica de este manuscrito.

REFERENCIAS

- BENNET, H. & REED, R. O. (1971): *Chemicals methods of silicate analysis*. Academic Press, Londres.
- BOURGOUIS, J., CHAUVE, P. et PEYRE, Y. (1972): *Essai de chronologie des événements tectono-sédimentaires dans L'Ouest des Cordillères Bétiqes*. C.R. somm. S.G.F., 8, 428-431.
- BUSTILLO, M. A. (1993): *Rocas y minerales silíceos de uso industrial en España*. En: García Guinea J. y Martínez Frías (eds.) Recursos Minerales de España. CSIC, Madrid, 1153-1167.
- CHAUVE, J. (1968): *Etude géologique du Nord de la Province de Cadix (Espagne méridionale)*. Men. IGME, 69, 261 pp.
- CRUZ SANJULIAN, J.J. (1974): *Estudio Geológico del Sector Teba-Osuna-Cañete la Real*. Tesis Doctoral, Universidad de Granada, 431 pp.

- GRIFFITHS, J. (1991): *Spain's minerals, mixed fortunes*. *Industrials Minerals*, 285, 23-47.
- HARBEN, P. (1991): *Glass raw materials; aspects of quality, quantity and prices*. *Industrials Minerals*, 286, 31-43.
- IGME (1975): *Monografías de Rocas Industriales, Arenas y Gravas*. 76 pp.
- ITGE (1983): *Geología de España*. Libro Jubilar J. J. Ríos, Tomo II.
- KRUMBEIN, W. C. & SLOSS, L. (1955): *Stratigraphy and Sedimentation*. Freeman and Co. San Francisco, 497 pp.
- LEFOND, S. J. (Ed.) (1983): *Industrials Minerals and Rocks*. Publ. Amer. Mining Engineers, New York. 2 Vol.
- PENDON, J. G. (1974): *Estudio Litoestratigráfico y Sedimentológico del Flysch de Punta Carnero y su Contexto*

- Geológico*. Tesis de Licenciatura. Universidad de Granada, 99 pp.
- PENDON, J. G. (1978): *Sedimentación Turbidítica en las Unidades del Campo de Gibraltar*. Tesis Doctoral. Universidad de Granada, 260 pp.
- POWERS, M. C. (1953): *A new roundness scale for sedimentary particles*. *J. Sed. Petrol.*, 23, 117-119.
- RUIZ ABRIO, M. T., SANCHEZ SOTO, P. J. y GARCIA RAMOS, G. (1989): *Estudio mineralógico de un yacimiento de areniscas de la Formación del Aljibe (Cádiz)*. *Bol. Geol. Min.*, 100, 454-461.
- VAZQUEZ GUZMAN, F. (1987): *The mining industry in Spain*. ITGE, 178 pp.
- ZINGG, T. (1935): *Beitrage zur Schotteranalyse*. *Schwiz. Min. Pet. Mii*, 115, 39-140.

Original recibido: Marzo de 1995.

Original aceptado: Abril de 1995.

INFORMACION

Notas sobre la minería y metalurgia españolas en la época del Imperio

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

INTRODUCCION

Las principales contribuciones de España a la Tecnología se han dado históricamente en tres campos principales: las técnicas navales y de navegación, las técnicas militares y las técnicas minero-metalúrgicas. Todas están en relación estrecha con el reto americano, con el Imperio, en sus vertientes de exploración y colonización. Esta gigantesca empresa, llevada en su vertiente exploratoria en poco más de cincuenta años, constituyó, en los tres campos antes mencionados, las más potentes organizaciones de su época, favoreciendo así el desarrollo de la innovación tecnológica.

También los descubrimientos científicos fueron favorecidos por este gran reto: de la Botánica y la Farmacología a la Química, con el hallazgo de tres nuevos metales por parte de mineros españoles, en el siglo XVIII.

La minería se estructuró en torno a los metales preciosos, principalmente la plata. Esta orientación que ya en buena parte se daba en Europa, principalmente en Alemania, era prácticamente inevitable por diversas razones. En primer lugar por la existencia abundante de los mismos en los virreinos de Nueva España y Perú. Por otra parte, la abundante población indígena y el nivel de organización social, Civilización, que facilitaría a través del sistema de la mita el trabajo sistemático y masivo de yacimientos. No hay que olvidar por otra parte el alto costo de los transportes marítimos con los medios de la época, que privilegiaba el tránsito de las mercancías valiosas, y el hecho de las ideas mercantilistas en boga que situaban como objetivo central de la política económica la posesión de metales preciosos, estrictamente necesarios por otra parte para el nacimiento del comercio (AYALA, F. J., 1994). Esto traería la Revolución Comercial de la Edad Moderna, y tras la Revolución

Agrícola inglesa del XVIII, desencadenaría la Era Industrial. La minería y metalurgia de los metales preciosos en América estaba, pues, en la naturaleza de las cosas. La crítica a este hecho, proveniente como señala CARLOS PRIETO (1977), "de quienes organizaban la piratería para apropiárselos en alta mar" y que fueron además sus principales beneficiarios, tras el fugaz paso por España, debe comprenderse más bien desde la perspectiva de desprestigio del enemigo. Andando el tiempo y ya caído el Imperio Español se asistiría en los países anglosajones a cuatro fiebres del oro consecutivas: California, Australia, Sudáfrica y Alaska. También en estos casos la minería cumpliría un importante papel como motor de exploración y colonización.

En Portugal se siguió con Brasil un proceso parecido, con dos diferencias: el énfasis en el oro y en su concentración, especialmente, en el siglo XVIII. El principal beneficiario, Inglaterra.

LOS ANTECEDENTES: LA MINERIA CON LOS REYES CATOLICOS

En los Fueros Viejos de Castilla y en las normas dictadas por los monarcas medievales, tal es el caso de lo aprobado por las Cortes de Briviesca en 1387, se señala que el titular de las minas es el Rey y que nadie puede labrarlas sin su mandato. El Jefe del Estado otorga las regalías y marca los niveles impositivos (dos tercios para el Rey y un tercio para el minero). Asimismo determinan la necesaria autorización del propietario del terreno. Este duro sistema no beneficiaba mucho el laboreo, que persistía pero sin gran empuje.

En 1479 contraen matrimonio FERNANDO e ISABEL y enseguida inician su pugna con la nobleza para fortalecer el poder de la Monarquía: son los primeros pasos para fundar un Estado moderno. En este marco político, hay que

considerar la incorporación a la Corona del Maestrazgo de Calatrava, en 1484 (confirmado por bula pontificia en 1487). Recordemos que esta Orden era la administradora de las famosas minas de Almadén.

Según cuentan JOSE LUIS SOBRINO et al. (1981) los Reyes Católicos efectúan una política eficaz de caminos y puertos, potencian la cabaña real de carreteros y logran gran activación del comercio. Un ejemplo de ello podría ser, por ejemplo, la venta de alumbre a Flandes, por parte de castellanos y vizcaínos.

El alumbre se empleaba en la industria del curtido, como mordiente en el teñido de las telas, para el tratamiento de la seda o para subir la graduación alcohólica de los vinos, entre otros usos. Con la caída de Bizancio se cerraron los mercados orientales, de donde se importaba esta sustancia, y hubo que volver la vista hacia los criaderos italianos de Tolfa, así como hacia los españoles de Mazarrón, Adamus y otros. Según señala BALLESTEROS, en el siglo XVI había un enorme consumo de este producto, constituyendo un importante monopolio.

Sin embargo, el metal que supondría una mayor actividad minera en el Reino, fue el hierro. Cuenta el profesor F. R. MORRAL (1993) que hacia el año 1500 operaban entre Guipúzcoa y Vizcaya unas 300 herrerías, con producciones medias de 50 Tm/año. Esta cifra es similar a las que nos da el padre GABRIEL HENAO (1689), en idéntica fecha, pero sólo para la segunda provincia. Otro foco metalúrgico lo tenemos en los Pirineos Orientales, concretamente en el condado de Foix, donde funcionaban unas 150 fargas.

Hay numerosos documentos sobre la producción, metalurgia y exportación del hierro. Uno de ellos es la carta de JUAN II de Castilla, fechada el 16 de febrero de 1439, a LOPE DE SALAZAR, concediéndole licencia para que pudiese sacar mineral de Somorrostro fuera del Reino. La apetenencia de hierro desde los cercanos mercados de Londres y Flandes, así como las facilidades dadas para la exportación provocaron el desabastecimiento de los ferrones vascongados y enseguida vinieron las medidas protectoras. El 24 de febrero de 1489, los Reyes Católicos ordenan que el mineral de hierro fuese vendido a los naturales del país y no a los extranjeros. En carta de 6 de abril de 1499 y en otra posterior, de 5 de septiembre de 1503, vuelven a mandar que no se saque vena de hierro fuera del Reino. Esta insistencia legislativa nos lleva a confirmar la existencia de un importante contrabando, fiscalizado por jueces especiales de Bilbao y San Sebastián.

El oro y la plata escaseaban, por ello los Reyes Católicos, trataron de evitar la salida de los metales nobles con una rígida legislación. Asimismo se tomaron medidas como prohibir las importaciones de sal, lo que vino a estimular el laboreo de este producto para mantener el consumo nacional. Explotaciones de halita había en Cardona, Minglanilla, Atienza, Poza de la Sal y otros lugares.

Las necesidades de oro y plata quedarían cubiertas rápidamente gracias a la conquista del Nuevo Mundo. El padre BARTOLOME DE LAS CASAS, en *Historia de las Indias* (1559) cuenta que CRISTOBAL COLON en su segundo viaje, llegó a La Española con herramientas y personal para sacar el oro de las minas. Al año siguiente, en 1494, en un

Memorial dirigido a los Reyes pedía lavadores de oro y mineros de Almadén. Parece ser que dentro de la escasa minería española las minas de mercurio tenían un cierto nombre.

Tras el oro de La Española, enseguida se descubrieron otras minas en Cuba, Puerto Rico y el Continente.

SIGLO XVI: SIGLO DE ORO DE LA MINERIA

El siglo XVI podemos considerarlo como el Siglo de Oro de la minería. En dicha centuria se produjeron los descubrimientos de las principales minas americanas, se lograron importantes producciones metálicas y hubo notables descubrimientos técnicos.

En 1519, año del desembarco de CARLOS V en la costa cantábrica, HERNAN CORTES inicia la conquista del actual Méjico; poco después comenzaron las labores mineras. Cuenta CARLOS PRIETO (1977) que las primeras minas de plata que explotaron los españoles en Nueva España fueron las de Morcillo, en Jalisco, hacia 1525, aunque serían abandonadas con prontitud. Las minas históricas famosas son algo posteriores: las vetas de Tasco, en Guerrero se descubrieron hacia 1534; Zacatecas, fue reconocida en 1546; Santa Bárbara, en Chihuahua, data de 1547; Guanajuato inicia su actividad hacia 1550; y por último, Pachuca y Real del Monte son de 1552.

Tras las expediciones de FRANCISCO PIZARRO, de 1524 y 1532, se conquista Perú; poco después, en 1545, se descubre el Cerro Rico de Potosí (Fig. 1), aunque con anterioridad ya se habían encontrado las minas de Porco. Potosí iba a ser la mina más importante del Mundo, de la que se sacó mayor riqueza. Cuenta GUILLERMO CESPEDES DEL CASTILLO (1983) que, a finales del siglo XVI, estas minas producían el 50% de la plata a nivel mundial y el 80% de las del Perú. HUMBOLDT da la cifra de 1.095,5 millones de pesos para el periodo 1543-1803, casi la cuarta parte del total enviado a España, 4.400 millones de pesos (FLORISEL, 1927).

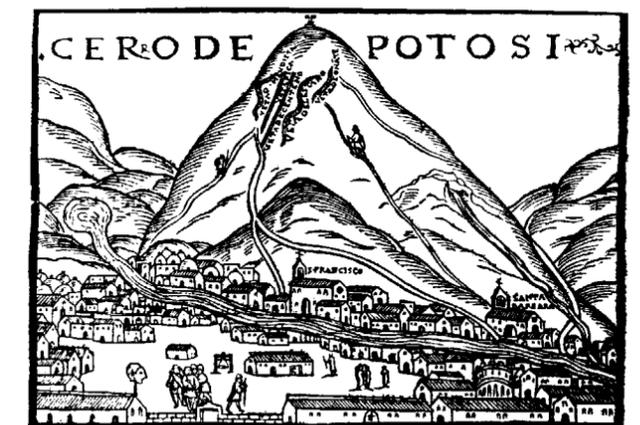


Figura 1. Dibujo de la ciudad y Montaña de Plata de Potosí, indicando las principales vetas. De la Crónica del Perú, de PEDRO CIEZA DE LEÓN, 1553 (Tomado de CARLOS PRIETO, 1977)

(*) E.T.S. Ing. Minas Madrid. INHIGEO
(**) ITGE. INHIGEO

PEDRO CIEZA DE LEON, en la *Crónica del Perú* (1553), explica como los españoles intentaron producir por fusión el metal argentífero sin conseguirlo. Los indios quechuas obtenían la plata, desde hacía años, mediante unos hornos llamados "guayras" de los que salió la producción de los primeros tiempos. En la obra de ALONSO BARBA, *El Arte de los Metales* (1640), es uno de los pocos lugares donde aparecen dibujados estos ingenios.

La minería de la plata en Potosí y otros lugares, empezó a sufrir un cierto declive al disminuir las leyes al avanzar la profundidad de las explotaciones y al dar paso la plata nativa a los sulfuros y sulfosales. Como ha señalado MESA-GUER Pardo, J. (1949), las leyes del siglo XVI fueron altas debido a la explotación de las monteras, pero fueron decreciendo y haciéndose incluso inferiores a las europeas. Ello obligó a una minería y metalurgia muy depuradas, y probablemente esta es la base de las innovaciones realizadas. Pronto llegaría la solución al problema: en 1553, BARTOLOME DE MEDINA descubre un procedimiento industrial de amalgamación en frío, bautizado con el nombre de método de patio, que se implantaría con rapidez por toda América. Este beneficio consistía en la adición de sal y mercurio que se incorporaban al mineral molido, dispuesto en montones en un patio, activándose los contactos entre reactivos mediante la trilla. Hacia 1572, PEDRO FERNANDEZ DE VELASCO introduce la amalgamación en Perú, buscando un procedimiento que se adaptara a las duras condiciones climáticas de la región andina. Al principio se realiza el proceso en frío, operándose la mezcla en unas zanjas, pero enseguida se pasa a la amalgamación en caliente, aplicando fuego a cajones; es lo que se denomina beneficio de buitrones, inspirado en el método mejicano de las estufas.

No tan importante como la plata fue el oro, pero sí tuvo un gran peso específico en la economía colonial. Los yacimientos más importantes se descubrieron en la primera mitad del siglo XVI. Así tenemos los del Chocó, en Colombia, los de Loja y Zamora, en Ecuador, o los de Carabaya y Oruro, en Bolivia. La mayor parte del preciado elemento provenía de su extracción en placeres, mediante bateas. También hay que reseñar su beneficio por amalgamación y su purificación con agua fuerte.

De lo expresado con anterioridad cabe deducir la necesidad de mercurio. En Almadén constatamos un incremento en la producción de azogue a principios de siglo, antecedido al descubrimiento del método de patio. Esto se comprueba en documento anónimo, fechado en 1543, que se encuentra en la Real Academia de Historia. En él, hemos podido leer: "... y aunque ahora XXX años no se sacaban della cien quintales de azogue, agora se sacan mill y quinientos...". Esto suponemos se puede interpretar como un cambio sustancial en el método metalúrgico que consistiría en la aplicación de los nuevos hornos de xabecas (PUCHE, O., en CASTILLO, M. (Ed.), 1993).

En 1563 se descubren en Perú las ricas minas mercuriales de Guancavelica (Fig. 2), que con altibajos proporcionarían el azogue a las minas de plata de dicho Virreinato, sobre todo en sus primeros tiempos. Los mejicanos en cambio dependieron casi en exclusiva del mercurio de Almadén.

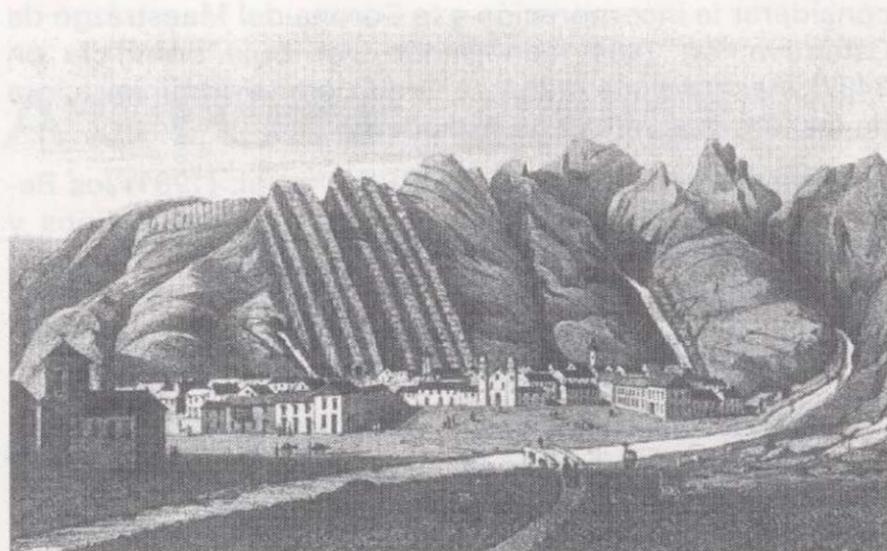


Figura 2. Dibujo de la villa y socavón de entrada a las minas de Guancavelica, principal productora de mercurio durante la época del Imperio. De *Colección de Memorias científicas, agrícolas e industriales*, de MARIANO EDUARDO DE RIVERO y USTARRIZ, 1857 (Tomado de PUCHE, O. y BROWN, K., 1992).

En Guancavelica enseguida se aplicó el método de las ollas (Fig. 3), recién descrito por GEORGIUS AGRICOLA, en el Libro IX del *De Re Metallica* (1556). Este beneficio, de corta productividad y derroche energético es señalado por AGRICOLA como el más empleado; sin embargo, las mayores necesidades de mercurio pedían otros procesos. Por fin los hornos de xabecas de Almadén llegan a las minas de Perú, en 1596 (Fig. 4). Esta lenta velocidad en los intercambios tecnológicos Europa-América sólo la podemos interpretar como debida a la dificultad para el transporte y por la falta de personas técnicamente preparadas.

En el *Memorial y relación de minas de azogue del Perú*, de 1607, se señala que: "...el beneficio de azogue se hacía con leña, la cual se acabó tan presto que ya no se podía beneficiar... y RODRIGO TORRES DE NAVARRA dio orden cómo se beneficiasen con hicho...". El empleo de este combustible sustitutorio, el arbusto "stipa ichu", da una idea del ingenio desarrollado por los mineros para ir resolviendo los problemas locales.

La demanda del otro producto necesario para la amalgamación, la sal, favoreció el nacimiento de salinas. En Perú, reseñamos las de Potosí y en Méjico, las salinas viejas de Santa María.

La riqueza generada sirvió para el mantenimiento del Imperio en Europa y para frenar por Oriente a los turcos, pero a costa de ceder caudales a los banqueros europeos. La conquista de América enriqueció a Europa y extenuó a España. Como el Estado se fue endeudando tuvo que recurrir a los créditos bancarios. Por ello, en 1521, se vio obligado a realizar el asiento de Almadén con los FUGGER o FUCARES. Asimismo se cedió a extranjeros el monopolio del alumbre.

Hacia falta una nueva legislación minera, sobre todo para mantener de forma fija los ingresos del Estado. FELIPE II

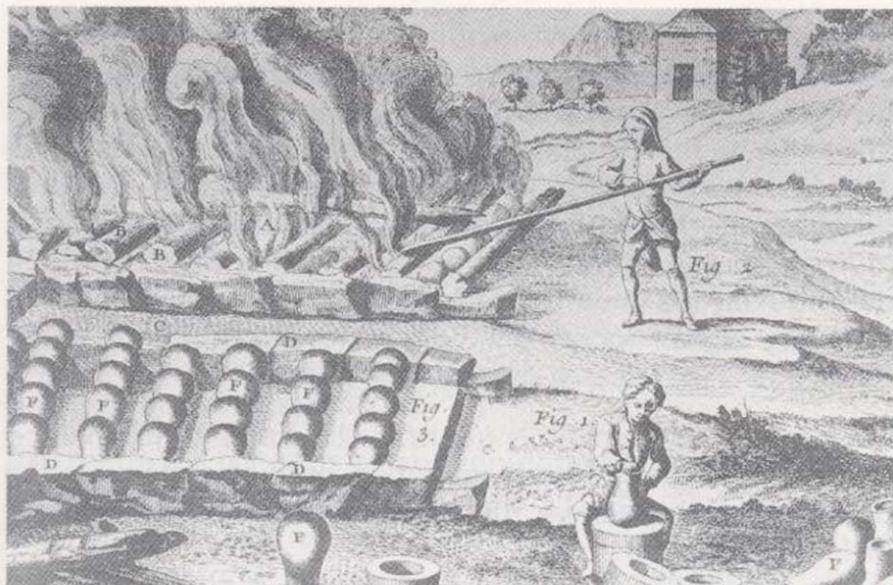


Figura 3. -Método de las ollas para la destilación de mercurio, descrito por AGRICOLA, en el libro de IX De Re Metallica (1556). El dibujo es de M. GOUSIERS (1768). Este procedimiento se empleó en Guancavelica en sus primeros tiempos.

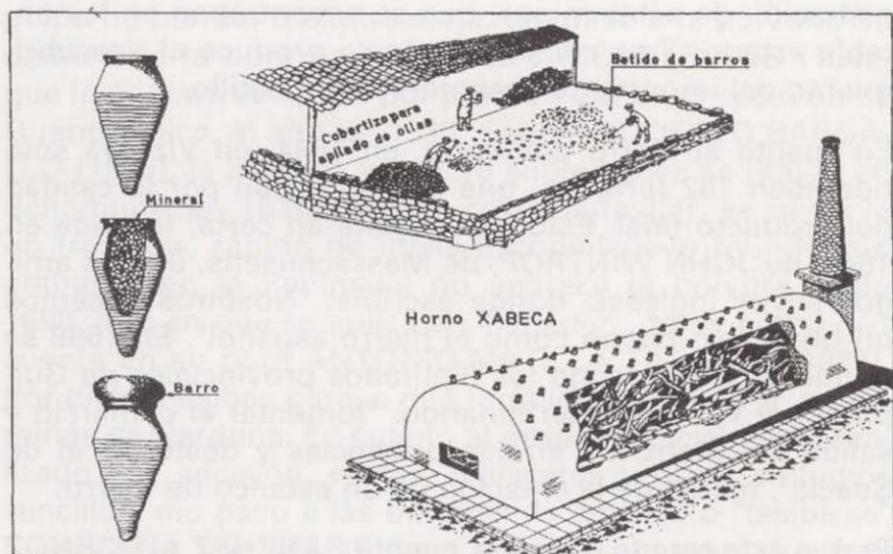


Figura 4. -Dibujo donde se reproduce la imagen de los hornos de xabecas de Almadén, empleados para destilar mercurio a partir de cinabrio. Fueron inventados a principios del XVI e introducidos en Perú a final de siglo. Del folleto Almadén. Ed. MAYASA (1970).

se ocuparía de ello, dictando en Valladolid, la Pragmática y Ordenanzas de 10 de enero de 1559. Esta normativa sustituiría a las leyes dadas por las Cortes de Briviesca en 1387. En ella se señala que las minas de oro, plata y azogue se incorporan al patrimonio real. El Virrey TOLEDO trataría de imponer estas normas en Perú, logrando que en 1572 todas las labores de Guancavelica hubiesen pasado a la Corona, comenzando, en 1573, su explotación por asientos, al estilo de lo que ya se hacía en Almadén años antes. El transporte de mercurio también se rigió por el régimen de asientos. Asimismo se organizaron los estancos dónde el Estado vendía el mercurio y compraba obligatoriamente la plata a precio fijo.

El otro importantísimo problema de la conquista americana fue el despoblamiento de la Península. No sólo partió la gente más decidida y creativa, sino que se instauró un grave déficit de mano de obra. La escasez de operarios hizo que subieran los salarios y la actividad minera entró en crisis. Pese a todo, en 1525, el acero toledano adquiría fama mundial. La minería del Norte se mantuvo como pudo; así en 1528 el Fuero de Vizcaya prohíbe la exportación de sus minerales, pero en las Cortes de 1537 los procuradores vizcaínos se quejan como sale vena de hierro a Francia, señalando que de proseguir esto en diez años se acabarían los mineros, con lo que subiría el coste del hierro y del acero. Para ser competitivos hubo que mejorar las técnicas, según recoge el padre GABRIEL HENAO (1689); así en 1540 se montaron las herrerías de Vizcaya con rueda mayor y martinete a la genovesa. Y, pese a la crisis minera, en 1568 se instala en Ripoll la primera farga.

En cuanto a otros productos, señalar que en 1555 se descubren las minas de plata de Guadalcanal, donde mosen ANTONIO BOTELLER trata de introducir la amalgamación mediante un proceso similar al descrito por VANNUCCIO BIRINGUCCIO, autor que más influencia tuvo sobre AGRICOLA. Asimismo, por aquellas fechas, en el valle de Alcuía y zonas colindantes, había más de 75 explotaciones, mayoritariamente de plomo, aunque con bajas producciones. Las salinas seguían dando amplias rentas a la Monarquía. De igual forma, también se explotaban minas de cobre, para la artillería, en Guadix, Baza, zona de Linares, Teruel y Galicia.

A CABALLO ENTRE LOS SIGLOS XVI Y XVII: LAS MEJORAS EN LOS METODOS DE AMALGAMACION

En las estadísticas de extracción de plata en Potosí, que nos da CROZIER, D. (1993) se observa una máxima producción entre 1585 y 1605, que luego fue cayendo de forma paulatina e inexorable.

En estos incrementos de producción hay que tener en cuenta las mejoras en los procesos de amalgamación, disminuyendo el consumo de mercurio, acortando los tiempos de trabajo y mejorando los rendimientos.

En Nueva España destacamos a BERNARDINO SANTA CRUZ, inventor del método llamado de buitrones; JUAN DE PALENCIA, creador de una desazogadora; JUAN DE SAN PEDRO, por el uso de "magistrales"; o JUAN DE CAPPELLIN, inventor de la "capellina", en 1576.

En Perú, GABRIEL DE CASTRO y el clérigo GARCI SANCHEZ proponen la incorporación de escorias de hierro en la amalgamación, lo que ayudaba a reducir los cloruros argentíferos a plata nativa. En 1587 CARLOS CORZO añade hierro molido a un proceso de amalgamación en frío. Parece ser que se ahorraba tanto azogue que el Virrey tuvo que prohibir dicho beneficio, pues peligraban las rentas reales de Guancavelica. En 1588, JUAN FERNANDEZ DE MONTANO propone la adición de salmuera, estiércol de caballo y copaquiri (sulfato de cobre); es la primera noticia que disponemos del empleo de "magistral" en Perú. Por

último, señalar que en 1590 ALONSO BARBA inventa el método de cazo y cocimiento, amalgamación en caliente realizada en calderos de cobre con agitación mecánica, que supuso realizar en horas lo que en el método de patio suponía unas tres semanas. También señalar que se perdía menos azogue que con el método de buitrones (a pesar de tapar los cajones al darles fuego) por que no se elevaba la temperatura tanto en los calderos de cobre.

En el cerro de Potosí había unos minerales llamados "pacos", se trataba de los minerales de la zona de oxidación, donde la plata era visible. Tras los "pacos" aparecieron los "negrillos", que eran una mezcla de sulfuros y sulfosales variados: minerales de cobre, de antimonio y otros. Ejemplos de "negrillos" son los "soroques" (con plomo), el "cochizo" o "rosicler" (que son las platas rojas) y suponemos que la calcopirita, ya que para BARBA en el "negrillo" lo que prevalece es el cobre.

Al llegar a los "negrillos", cambió la composición de la mena y hubo problemas en la amalgamación. En 1601, el Consejo de Indias solicita a JERONIMO DE AYANZ un informe para el beneficio de los "negrillos". En la propuesta de AYANZ se propone la adición de un "magistral" cobrizo y cal. Parece ser que con esta formulación a los dos años estaba resuelto el problema. Cuenta BARBA que en dicho tipo de minerales se inicia el proceso quemándolos para favorecer la molienda, eliminar impurezas y facilitar la acción mercurial.

Había otros minerales llamados "machacados", donde a diferencia de los "pacos" la plata nativa no era visible. Para su recuperación, un franciscano inventó el procedimiento de tintin, consistente en mejorar la molienda para facilitar la incorporación del azogue.

En definitiva, con todas estas actuaciones, y en particular con el método de CORZO, disminuyó notablemente el consumo de azogue, pese a los incrementos en la producción de la plata. En los últimos años del siglo XVI se extraían de Guacavelica entre 9.000 y 10.000 quintales de mercurio anuales, mientras que el consumo de azogue por parte de la minería peruana estaba entre 6.000 y 6.500 quintales. Esto generó que en 1598 se tuviera que cancelar las labores de interior por el "stock" acumulado. Según JORGE FONSECA (1622): "Ilegaban a 35.000 los quintales que había desde Guacavelica a Potosí". De todas formas no sólo hubo criterios económicos en esta suspensión de los trabajos, sino que existía una preocupación, en la persona del Virrey, hacia la salud de los indios mitayos que operaban en las minas. No insistiremos en este capítulo pero si es conveniente señalar que ha sido uno de los temas tratados de continuo en la historia de la minería peruana.

SIGLO XVII: DECADENCIA MINERA Y ESPLENDOR DE LAS IDEAS

En 1590 se produjo la quiebra del Estado (recordemos que hubo dos con FELIPE II) y se tuvieron que subir los impuestos. La inflación que generaba la abundancia de me-

tales preciosos (la Revolución de los Precios), la presión impositiva, la falta de mano de obra y los gastos imperiales desequilibraron la balanza de pagos. Se producía la afluencia de mercancías foráneas, mientras se hundían los sectores económicos productivos tradicionales con proyección exterior: la lana castellana, la seda andaluza y el hierro vizcaíno. Como contrapunto, la Monarquía trataba de impulsar los sectores económicos, entre ellos la minería. Así, el 22 de agosto de 1584, el Rey promulga unas Ordenanzas Mineras que durarían 241 años.

Cuando en 1607 volvió a quebrar el Estado se intensificó la acuñación de monedas de cobre, para ahorrar plata. La única cuestión positiva fue el aumento de la minería cuprífera peninsular.

En los otros sectores mineros las cosas no iban bien. Los FUGGER, encargados de los asientos de Almadén y Guadalcánal, quebraron hacia mitad de siglo, pese a sus innovaciones metalúrgicas. Entre 1609 y 1637 habían ido sustituyendo los hornos de xabecas por hornos de reverbero, también llamados de buitrones. Desde entonces la zona donde se ubica la metalurgia en Almadén se llama Cerco de Buitrones. En 1646, la Real Hacienda recuperó la administración de estas minas, que se encontraban en lamentable estado. Tres años después se produce el descubrimiento del importante yacimiento del Castillo.

En cuanto al hierro del Norte, en 1644, en Vizcaya sólo operaban 152 ferrerías, que se mantenían por la calidad del producto final. Esto se constata en carta, fechada en 1648, de JOHN WINTROP, de Massachusetts, a unos amigos suyos ingleses, donde escribía: "Nosotros hacemos un hierro tan bueno como el hierro español". En 1699 se reunieron en Durango los diputados provinciales de Guipúzcoa y Vizcaya determinando: "fomentar el comercio y salida del hierro de ambas provincias y desterrar al de Suecia", mediante la creación de un estanco de hierro.

Pese a este estado de crisis, cuenta SANCHEZ ALBORNOZ que: "La minería y metalurgia deben a los españoles avances decisivos. Según CARRACIDO señala, llegaron a crear una doctrina sistemática que condensó en principios fundamentales las reglas prácticas".

En España hay movimientos como los novatores que tratan de trasladar a nuestra tierra la Revolución Científica europea.

En 1569, a los pocos años de la publicación de la obra de AGRICOLA, *"De Re Metallica"*, tenemos una obra con idéntico nombre escrita por BERNARDO PEREZ DE VARGAS. En 1572, el médico sevillano JUAN MONARDES edita *"Diálogos del hierro y sus grandezas"*. Sin embargo, la mayor producción literaria minera procede del siglo XVII. JUAN DE OÑATE, visitador de las minas españolas hacia 1624, escribe el *"Tratado muy útil y provechoso de re metallica, con todas las reglas y normas de labrar minas y beneficio de metales, así de fuego como de azogue"*. Pero la obra principal es el *"Arte de los metales"*, del párroco de Potosí ALVARO ALONSO BARBA, tratado metalúrgico por antonomasia durante más de dos siglos y de difusión mundial, al ser traducido a los principales idiomas de Occidente (dos ediciones inglesas, una alemana y otra italiana en el

siglo XVII, así como otras catorce extranjeras en el XVIII). Asimismo queremos reseñar que, a finales de siglo aparece la primera obra en castellano sobre la producción de acero; se trata del *"Memorial sobre el medio de convertir el hierro en acero"*, de ANDRES DAVILA y HEREDIA. Recordemos que en la época de AGRICOLA se empleaba un procedimiento indirecto para la obtención del acero, mediante fusión y afino, según se recoge en *"De Re Metallica"*. Por último señalar que hubo innumerables tratados específicos sobre la amalgamación y sus mejoras que no recogemos en este artículo.

Aparte de los tratados es conveniente reseñar las mejoras e innovaciones mineras. La mayor parte de ellas proceden de América, donde habían emigrado algunos de nuestros mejores hombres. En 1617, el veedor de Guacavelica, JUAN DE BUENDIA, natural de Almadén, diseña unos pozos para la ventilación, desagüe y extracción del mineral, importante obra de ingeniería de su época. Asimismo, en dichas minas se practicaría la ventilación forzada mediante ventiladores. Recordemos que, en 1580, PEDRO CORNEJO, había inventado ya un sistema de ventilación forzada recomendado por el Consejo de Indias para Potosí. En cuanto al arranque, inicialmente realizado a golpe de barreta o almadeneta, dio paso a la pólvora. Se deduce de la obra de FERNANDO MONTESINOS (1642) que la pólvora se aplica por primera vez en el socavón de Guacavelica, el año de 1635. Según MODESTO BARGALLO (1955), la primera voladura subterránea se realiza en Schemnitz, en 1626. En este caso particular, se observa un trasiego rápido de ideas Europa-Nuevo mundo; sin embargo en la Península no aparece la pólvora hasta 1698, año en que se aplica en Almadén, tal y como nos cuenta en su obra ANTONIO MATILLA TASCON (1987). Por dichas fechas parece que también se utilizaría en las minas de Cardona. En cuanto al desagüe inicialmente realizado por socavón, norias, malacates y otros artilugios sencillos, dio paso a las bombas de émbolo o "tesibicas" (inventadas por CTESIBIO en la época romana) que fueron introducidas por MIGUEL DE VIDAÑA Y LUCAS PERES en 1630, en las minas de Pachuca. AYANZ había inventado, en 1606, la primera máquina de vapor (Fig. 5) para el desagüe de las minas (GARCIA TAPIA N. (1989), aunque no tenemos noticias de su aplicación. Esta máquina se anticipó en casi cien años a la de SAVERY en Inglaterra.

En cuanto a la metalurgia, destacamos la creación en 1633 de los hornos busconiles o dragones, ideados por LOPE DE SAAVEDRA Y BARBA para la metalurgia de Guacavelica. Estos hornos (Fig. 6) fueron introducidos en Almadén, en 1646, por JUAN ANTONIO DE BUSTAMANTE, y allí han permanecido, con modificaciones sucesivas, hasta principios del siglo XX. Las notables mejoras en los rendimientos metalúrgicos que daban estos hornos, vendrían reforzadas por el hallazgo del importante criadero del Pozo.

En este siglo es cuando se crean las primeras industrias siderúrgicas dignas de este nombre. Se trata de los hornos de Liérganes y La Cavada (Santander), en 1628 y 1637, así como los de Corduente, cerca de Molina de Aragón, en 1642 (LE FLEN, J. P. et al., 1983).

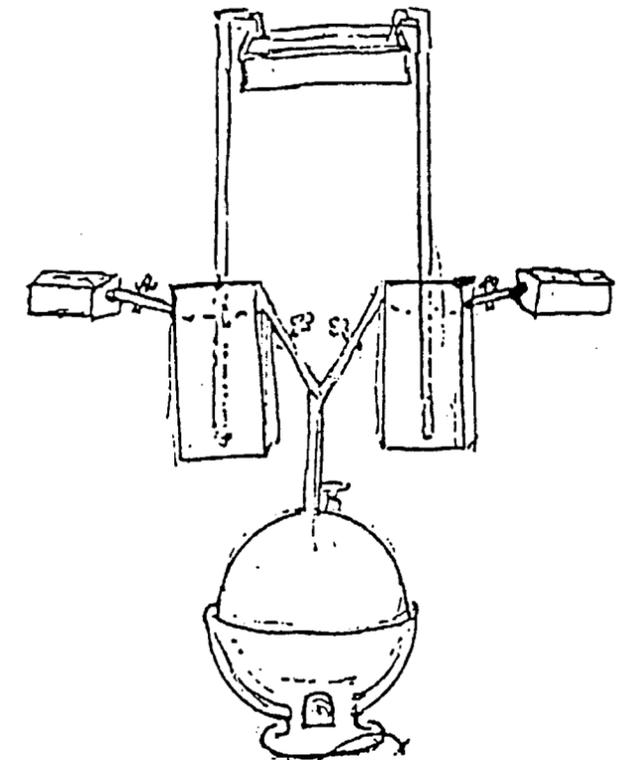


Figura 5. -Máquina de vapor de JERONIMO DE AYANZ, según la patente de 1606, para el desagüe de las minas. El vapor generado en la caldera (abajo) presiona alternativamente sobre el agua de los depósitos, elevándola al depósito superior (in NICOLAS GARCIA TAPIA, 1989).

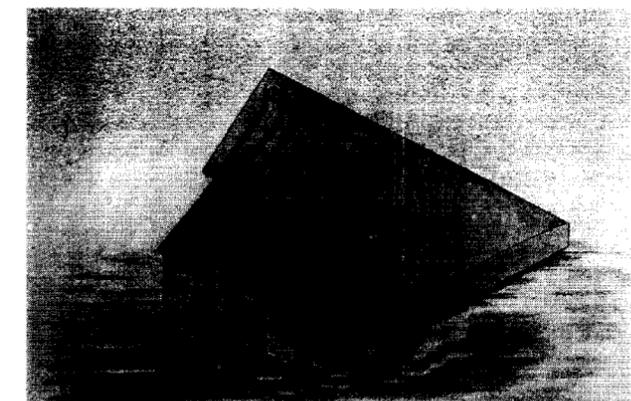


Figura 6. -Dibujo de los hornos antiguos de aludeles, para la destilación de mercurio en Almadén. Tomado del Folleto Mercurio Español de Almadén. Exposición Universal de París. 1937.

siglo XVII, así como otras catorce extranjeras en el XVIII). Asimismo queremos reseñar que, a finales de siglo aparece la primera obra en castellano sobre la producción de acero; se trata del "Memorial sobre el medio de convertir el hierro en acero", de ANDRES DAVILA y HEREDIA. Recordemos que en la época de AGRICOLA se empleaba un procedimiento indirecto para la obtención del acero, mediante fusión y afino, según se recoge en "De Re Metallica". Por último señalar que hubo innumerables tratados específicos sobre la amalgamación y sus mejoras que no recogemos en este artículo.

Aparte de los tratados es conveniente reseñar las mejoras e innovaciones mineras. La mayor parte de ellas proceden de América, donde habían emigrado algunos de nuestros mejores hombres. En 1617, el veedor de Guancavelica, JUAN DE BUENDIA, natural de Almadén, diseña unos pozos para la ventilación, desagüe y extracción del mineral, importante obra de ingeniería de su época. Asimismo, en dichas minas se practicaría la ventilación forzada mediante ventiladores. Recordemos que, en 1580, PEDRO CORNEJO, había inventado ya un sistema de ventilación forzada recomendado por el Consejo de Indias para Potosí. En cuanto al arranque, inicialmente realizado a golpe de barreta o almadeneta, dio paso a la pólvora. Se deduce de la obra de FERNANDO MONTESINOS (1642) que la pólvora se aplica por primera vez en el socavón de Guancavelica, el año de 1635. Según MODESTO BARGALLO (1955), la primera voladura subterránea se realiza en Schemnitz, en 1626. En este caso particular, se observa un trasiego rápido de ideas Europa-Nuevo mundo; sin embargo en la Península no aparece la pólvora hasta 1698, año en que se aplica en Almadén, tal y como nos cuenta en su obra ANTONIO MATILLA TASCÓN (1987). Por dichas fechas parece que también se utilizaría en las minas de Cardona. En cuanto al desagüe inicialmente realizado por socavón, norias, malacates y otros artilugios sencillos, dio paso a las bombas de émbolo o "tesibicas" (inventadas por CTESIBIO en la época romana) que fueron introducidas por MIGUEL DE VIDAÑA Y LUCAS PERES en 1630, en las minas de Pachuca. AYANZ había inventado, en 1606, la primera máquina de vapor (Fig. 5) para el desagüe de las minas (GARCIA TAPIA N. (1989), aunque no tenemos noticias de su aplicación. Esta máquina se anticipó en casi cien años a la de SAVERY en Inglaterra.

En cuanto a la metalurgia, destacamos la creación en 1633 de los hornos busconiles o dragones, ideados por LOPE DE SAAVEDRA Y BARBA para la metalurgia de Guancavelica. Estos hornos (Fig. 6) fueron introducidos en Almadén, en 1646, por JUAN ANTONIO DE BUSTAMANTE, y allí han permanecido, con modificaciones sucesivas, hasta principios del siglo XX. Las notables mejoras en los rendimientos metalúrgicos que daban estos hornos, vendrían reforzadas por el hallazgo del importante criadero del Pozo.

En este siglo es cuando se crean las primeras industrias siderúrgicas dignas de este nombre. Se trata de los hornos de Liérganes y La Cavada (Santander), en 1628 y 1637, así como los de Corduente, cerca de Molina de Aragón, en 1642 (LE FLEN, J. P. et al., 1983).

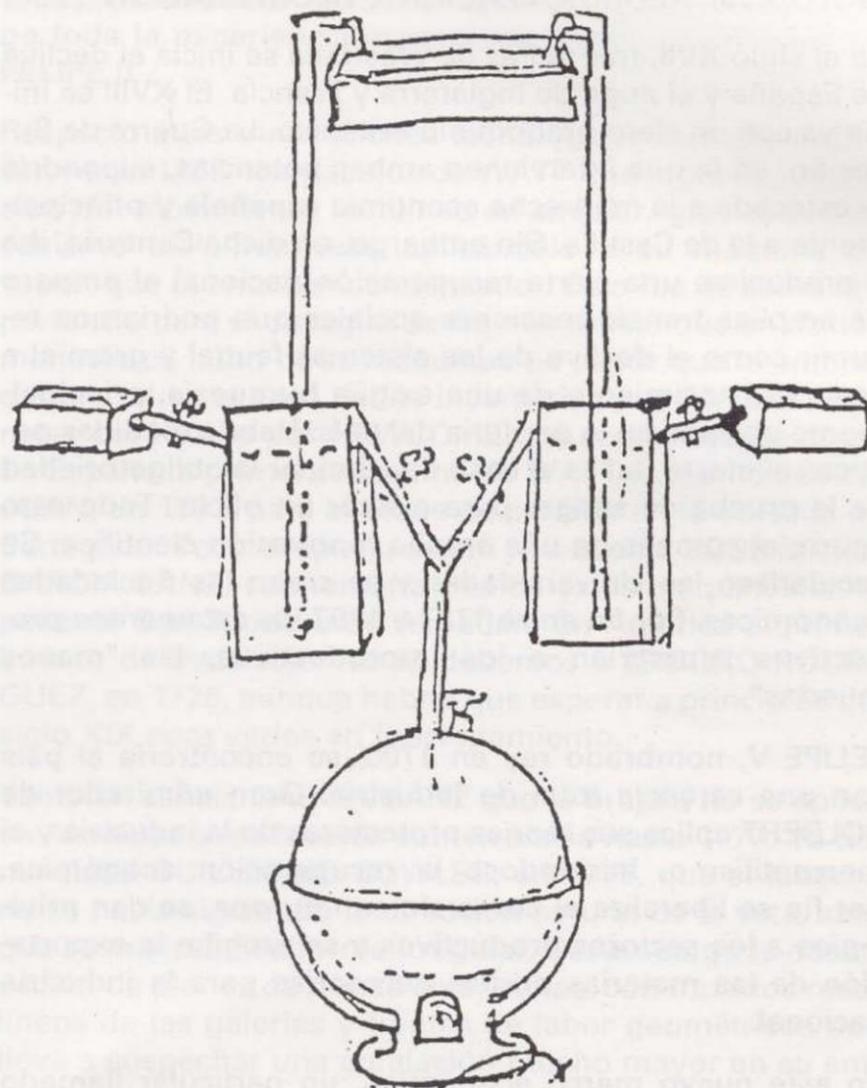


Figura 5. -Máquina de vapor de JERONIMO DE AYANZ, según la patente de 1606, para el desagüe de las minas. El vapor generado en la caldera (abajo) presiona alternativamente sobre el agua de los depósitos, elevándola al depósito superior (in NICOLAS GARCIA TAPIA, 1989).

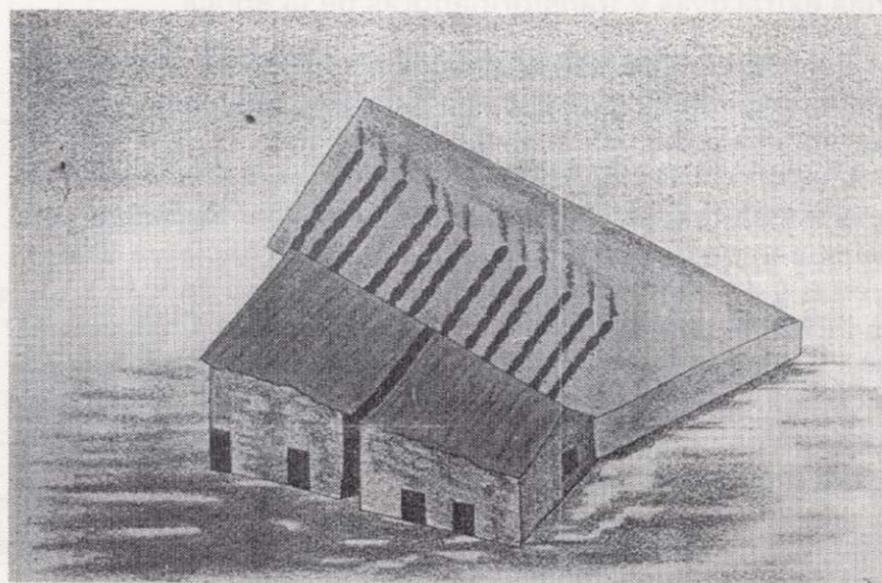


Figura 6. -Dibujo de los hornos antiguos de aludeles, para la destilación de mercurio en Almadén. Tomado del Folleto Mercurio Español de Almadén. Exposición Universal de París. 1937.

SIGLO XVIII: REORGANIZACION Y RECUPERACION

En el siglo XVII, tras la Paz de Westfalia se inicia el declive de España y el auge de Inglaterra y Francia. El XVIII se inicia ya con un claro predominio británico. La Guerra de Sucesión, en la que intervienen ambas potencias, supondría la estocada a la maltrecha economía española y principalmente a la de Castilla. Sin embargo, en dicha Centuria, iba a producirse una cierta recuperación nacional al amparo de amplias transformaciones sociales que podríamos resumir como el declive de los sistemas feudales y gremiales a costa del nacimiento de una exigua burguesía, principalmente ubicada en la periferia del país. Habría medidas políticas al efecto, tal es el caso de eliminar la obligatoriedad de la prueba de sangre para ejercer un oficio. Todo esto ocurre al compás de una amplia renovación científica. Se secularizan las Universidades y se crean las Sociedades Económicas. Por fin entre 1787 y 1797 los estamentos productivos superarían a los improductivos, las "manos muertas".

FELIPE V, nombrado rey en 1700, se encontraría al país con una carencia total de industria. Gran admirador de COLBERT aplica sus teorías protectoras de la industria y el mercantilismo, iniciándose la recuperación económica. Por fin se liberaliza el comercio con Europa, se dan privilegios a los sectores productivos y se prohíbe la exportación de las materias primas necesarias para la industria nacional.

En este nuevo marco económico, un particular llamado BENITO BERRUGUETE, encarga al ingeniero JUAN VERGEL el diseño de la fábrica de hojalata de Ronda, que fue dirigida desde sus inicios por el suizo MEURON. Asimismo, a mediados de siglo, JUAN GARCIA CABALLERO descubre las minas de cinc de Riopar. Poco después, en 1761, el austriaco JUAN JORGE GRAUPNER funda la fábrica de hojalata de San Juan de Alcaraz.

Según cuenta EUGENIO LARRUGA, en las *Memorias Políticas y Económicas* (1793), en Traspinedo se fabricaba alambre de latón. En la obra de este autor, escrita entre 1787 y 1800 se puede obtener una relación de las industrias extractivas y transformadoras de la época.

El siglo XVIII es para el profesor F. R. MORRAL (1984) el de mayor esplendor para la farga catalana, destacando como centro productor de hierro, durante toda la Centuria, la población de Ripoll. En 1727 se funda en el Nuevo Mundo una metalurgia privada, se trata de la Real Sociedad Guipuzcoana de Caracas y Azeritis. En 1752 había ya 270 ferrerías y 44 martinets en el País Vasco, habiéndose superado las cifras productivas del siglo XVI. En 1753 se crea una calderería en Avilés. Y, en 1763, JAVIER MARIA DE MUNIBE, CONDE DE PEÑAFLORIDA, organiza la Real Sociedad Vascongada de Amigos del País, tratando de mejorar la metalurgia de esta región.

Según señala ANTONIO DEL VALLE (1989), en el XVIII, ocurren tres importantes acontecimientos mineros, a saber: El primer asiento de Riotinto, en 1720; el incendio de las minas de Almadén, en 1755; y el empleo generalizado de la pólvora en las minas peninsulares, que ayudaría a superar las carencias de mano de obra. De todas formas

los datos del catastro del Marqués de la Ensenada, nos muestran una casi paralización de las minas.

Respecto a Riotinto, señalar que el asiento dado al sueco LIBERTO VOLTERS, supuso una nueva innovación en la metalurgia del cobre, al introducir el sistema de cementación.

En Almadén, tras un incendio de duración anual, se produjo un desabastecimiento de mercurio que repercutió principalmente en las minas de Nueva España. Se forzó la producción en Guancavelica, lo que supuso un completo fracaso, que además influiría en el hundimiento de las minas de 1786. Por los motivos expuestos hubo que importar azogue. Mientras tanto, en Almadén, gracias a los sabios consejos de GUILLERMO BOWLES se trajeron a varios ingenieros y técnicos de minas alemanes, por cuyo trabajo, poco a poco, se fueron recuperando las explotaciones. Asimismo esta situación propiciaría un incremento de la prospección, descubriéndose numerosos yacimientos, tal es el caso de: Las Cuevas, El Entredicho y Valdeazogues (1774), la Nueva Concepción (1779) o Guadalperal (1783). En 1782 la producción ya había alcanzado un buen nivel.

Tras el Tratado de París, firmado en febrero de 1763, vino un período de paz, tan conveniente para nuestros intercambios económicos con América. Las medidas liberalizadoras de 1765 ayudarían notablemente al desarrollo del comercio. Pero no es hasta 1778 cuando se declara libre el comercio con América. Señala GLORIA OTERO (1993), que "la creación de un clima favorable al desarrollo económico posibilitó la primera industrialización a escala del país, un proceso en el que intervino directamente el Estado mediante la construcción de las Reales Fabricas". El impulsor de estas factorías fue CARLOS III. Dicho monarca implanta el Despotismo Ilustrado, donde la ciencia, la técnica y la industria crecen al unísono bajo la protección del Estado que trata de suplir la debilidad industrial de la Sociedad Civil, fruto, entre otros factores, del cómodo monopolio comercial con América.

En 1766, CARLOS III decide la instalación de una metalurgia en Eugui, para la producción de armamento y munición de hierro colado. Se eligió este lugar por sus bosques, proximidad del río y minas, así como por la tradición en el oficio, existente desde el siglo XV, aunque decadente por aquellos años. Unos años después se decide crear una instalación similar en otro municipio de Navarra, Orbaiceta. En los hornos instalados se consume carbón vegetal. Asimismo, en 1780 se inaugura la Real Fábrica de espadas y armas de corte, de Toledo. El procedimiento de trabajo queda regulado a través de instrucciones concisas a los operarios para la obtención del acero, que son recogidas en un manual, se trata del *Método de Trabajo para la fabricación de espadas de Toledo*.

La iniciativa privada se va abriendo paso, lenta e insuficientemente. En 1773, Albacete contaba con 18 fábricas de cuchillos.

En 1788, ANTONIO RAIMUNDO IBAÑEZ, considerado primer industrial del hierro español, instala las ferrerías del río Cervos, en Sargadelos (Galicia), empleando a 300 obreros y produciendo 100.000 Tm. en ochenta años. Aquí, en

1797, se instala un horno alto, alimentado con carbón vegetal y con producciones de 600 kg. de metal cada ocho horas.

A finales del XVIII se instalaron fábricas siderúrgicas en Trubia y Oviedo, Asturias, para la fabricación de cañones (ADARO, L. 1986). En 1796 se usó en esta factoría por primera vez en España el carbón de cok, para las pruebas, realizadas por ingenieros militares, no tuvieron éxito. Recordemos que hacia 1705, ABRAHAM DARBY, puso en marcha, en Inglaterra, un proceso de coquización. Al crecer en altura los hornos el combustible clásico, el carbón vegetal, era aplastado por el peso de la carga, impidiendo el tiro. El cok vino a resolver este problema, ya que era poroso y resistente. En 1791, había en Gran Bretaña 81 hornos de cok, cifra que comparada a los existentes en nuestro país nos puede ayudar a cuantificar nuestro atraso. Los ingleses habían iniciado ya su Revolución Industrial en 1765 (AYALA, F. J., 1986).

También a finales del siglo JOSE VICENTE PEREDA instala una planta de producción de chapa de acero en Fontaneda, Asturias. El territorio del Principado empezaba a destacar industrialmente; así, un informe de la Marina, de 1770-71, cita ya explotaciones de carbón en la cuenca asturiana. El combustible salía del puerto de Gijón hacia la fábrica de cañones de La Cavada, en Santander, y hacia las bases navales del Ferrol y Cartagena. En Cataluña también hubo una cierta actividad siderúrgica (Fig. 7).

La legislación minera también fue acoplándose a los nuevos tiempos. En 1783 se publican las últimas Ordenanzas de minería para el Virreinato de Nueva España. Y, en 1794, aparecen las *Ordenanzas de las minas del Perú y de*

más provincias del Río de la Plata. En Estas leyes se recoge toda la experiencia acumulada desde los tiempos de FELIPE II.

Respecto a las innovaciones tecnológicas hay que destacar, hacia 1765, los trabajos de WATT que logra la conversión del movimiento rectilíneo en circular, gracias al mecanismo biela-manivela, aplicándolo a su máquina de vapor, que cuenta con condensador. Esto fue de suma importancia para el desagüe de las minas. Aunque en dichos menesteres hubo otras máquinas de vapor que la antecedieron, tal es el caso de las inventadas por SAVERY, a finales del XVII, o por NEWCOMEN, a comienzos de siglo. En España la primera máquina de WATT la montó JORGE JUAN, en 1797, para el dique de carenar en la dársena de Cartagena. Poco después, según nos cuenta JOSE MARIA GARCIA SANZ, se montaría una de estas máquinas en el pozo de San Teodoro de Almadén. En América el primer intento de instalación se lo debemos a ISIDORO RODRIGUEZ, en 1726, aunque habría que esperar a principios del siglo XIX para verlas en funcionamiento.

También señala GARCIA SANZ que la brújula no se aplicó en Almadén a las labores subterráneas hasta 1777. Ya denunciaba GUILLERMO BOWLES, en 1775, que el laboreo no se hacía siguiendo la dirección natural de la veta, sino que se realizaba de forma irregular. Sin embargo la observación de planos de minas americanas, con trazados rectilíneos de las galerías y frentes de labor geométricos nos lleva a sospechar una antelación mucho mayor en su empleo.

En la metalurgia hay que destacar los frustrados intentos de aplicación en México, Potosí y Nueva Granada del mé-

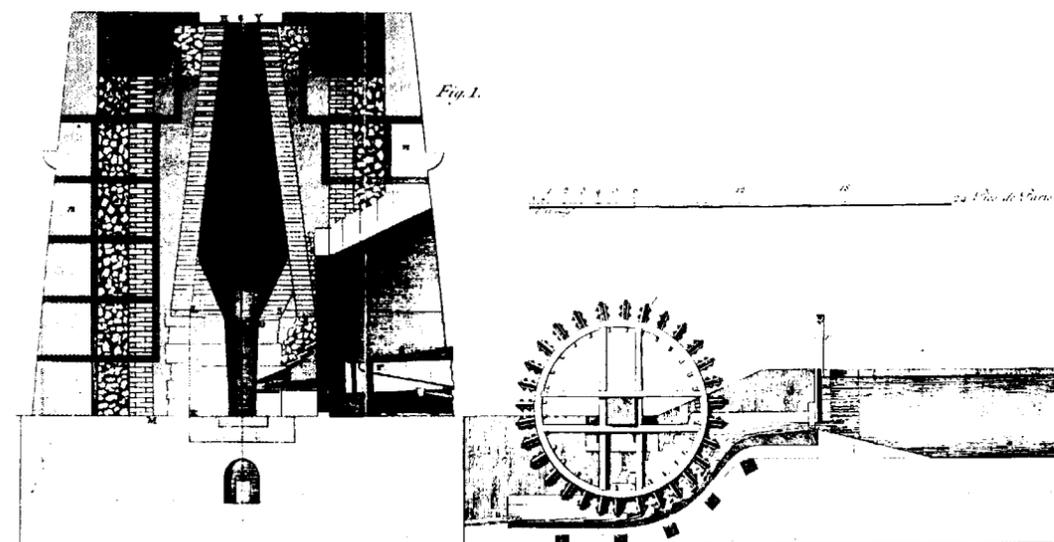


Figura 7. -Horno alto de San Sebastián de Muga, con fuelles unidos hidráulicamente. Del Tratado de Artillería del Real Colegio Militar de Segovia, 1803 (Tomado de ADARO RUIZ-FALCO, L. 1986)

1797, se instala un horno alto, alimentado con carbón vegetal y con producciones de 600 kg. de metal cada ocho horas.

A finales del XVIII se instalaron fábricas siderúrgicas en Trubia y Oviedo, Asturias, para la fabricación de cañones (ADARO, L. 1986). En 1796 se usó en esta factoría por primera vez en España el carbón de cok, para las pruebas, realizadas por ingenieros militares, no tuvieron éxito. Recordemos que hacia 1705, ABRAHAM DARBY, puso en marcha, en Inglaterra, un proceso de coquización. Al crecer en altura los hornos el combustible clásico, el carbón vegetal, era aplastado por el peso de la carga, impidiendo el tiro. El cok vino a resolver este problema, ya que era poroso y resistente. En 1791, había en Gran Bretaña 81 hornos de cok, cifra que comparada a los existentes en nuestro país nos puede ayudar a cuantificar nuestro atraso. Los ingleses habían iniciado ya su Revolución Industrial en 1765 (AYALA, F. J., 1986).

También a finales del siglo JOSE VICENTE PEREDA instala una planta de producción de chapa de acero en Fontanera, Asturias. El territorio del Principado empezaba a destacar industrialmente; así, un informe de la Marina, de 1770-71, cita ya explotaciones de carbón en la cuenca asturiana. El combustible salía del puerto de Gijón hacia la fábrica de cañones de La Cavada, en Santander, y hacia las bases navales del Ferrol y Cartagena. En Cataluña también hubo una cierta actividad siderúrgica (Fig. 7).

La legislación minera también fue acoplándose a los nuevos tiempos. En 1783 se publican las últimas Ordenanzas de minería para el Virreinato de Nueva España. Y, en 1794, aparecen las *Ordenanzas de las minas del Perú y de*

más provincias del Río de la Plata. En Estas leyes se recoge toda la experiencia acumulada desde los tiempos de FELIPE II.

Respecto a las innovaciones tecnológicas hay que destacar, hacia 1765, los trabajos de WATT que logra la conversión del movimiento rectilíneo en circular, gracias al mecanismo biela-manivela, aplicándolo a su máquina de vapor, que cuenta con condensador. Esto fue de suma importancia para el desagüe de las minas. Aunque en dichos menesteres hubo otras máquinas de vapor que la antecedieron, tal es el caso de las inventadas por SAVERY, a finales del XVII, o por NEWCOMEN, a comienzos de siglo. En España la primera máquina de WATT la montó JORGE JUAN, en 1797, para el dique de carenar en la dársena de Cartagena. Poco después, según nos cuenta JOSE MARIA GARCIA SANZ, se montaría una de estas máquinas en el pozo de San Teodoro de Almadén. En América el primer intento de instalación se lo debemos a ISIDORO RODRIGUEZ, en 1726, aunque habría que esperar a principios del siglo XIX para verlas en funcionamiento.

También señala GARCIA SANZ que la brújula no se aplicó en Almadén a las labores subterráneas hasta 1777. Ya denunciaba GUILLERMO BOWLES, en 1775, que el laboreo no se hacía siguiendo la dirección natural de la veta, sino que se realizaba de forma irregular. Sin embargo la observación de planos de minas americanas, con trazados rectilíneos de las galerías y frentes de labor geométricos nos lleva a sospechar una antelación mucho mayor en su empleo.

En la metalurgia hay que destacar los frustrados intentos de aplicación en México, Potosí y Nueva Granada del mé-

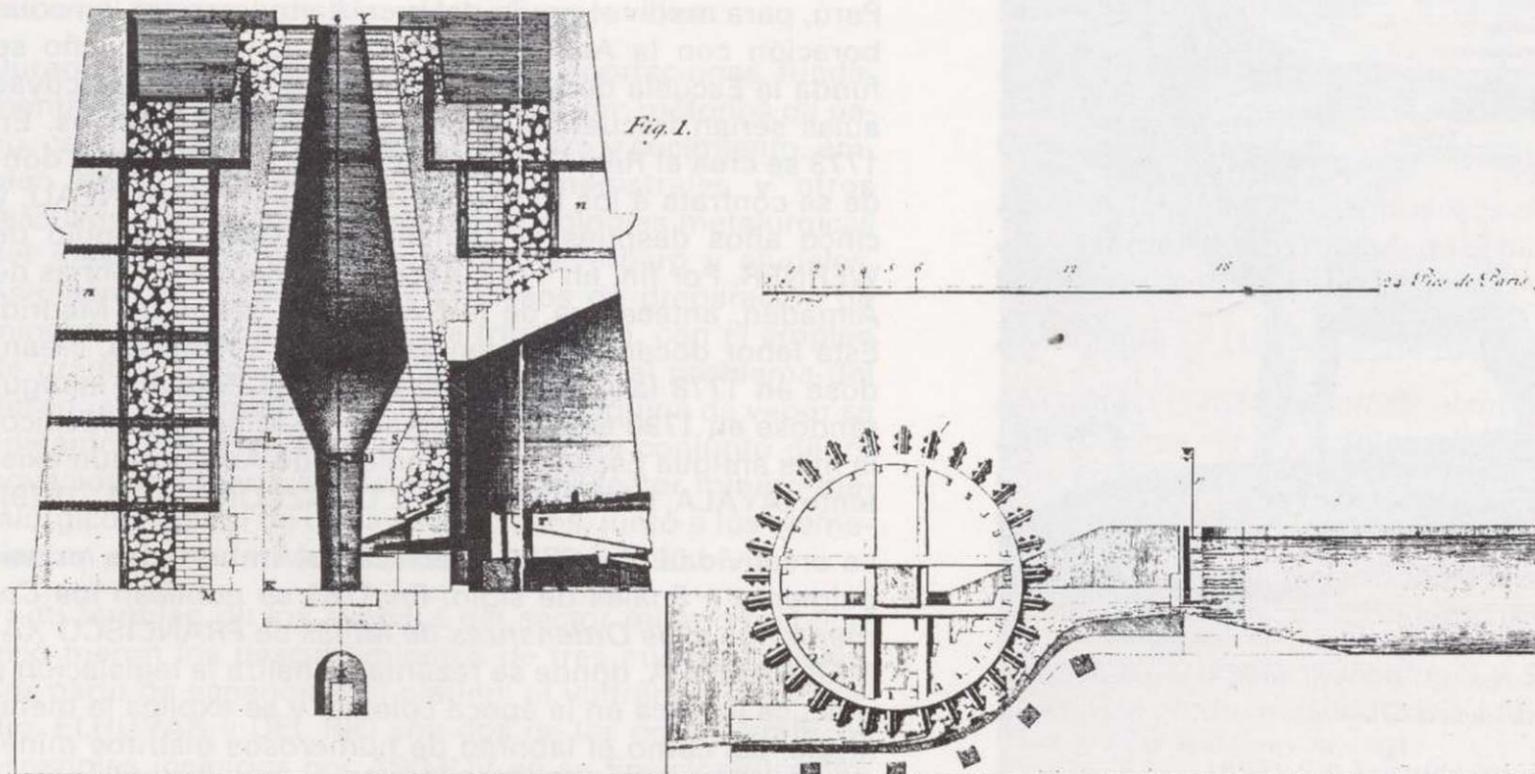


Figura 7. -Horno alto de San Sebastián de Muga, con fuelles unidos hidráulicamente. Del Tratado de Artillería del Real Colegio Militar de Segovia, 1803 (Tomado de ADARO RUIZ-FALCO, L. 1986)

todo de los toneles de amalgamación, inventado a finales del XVIII, en Schemnitz, por IGNAZ VON BORN. En estos ensayos tuvieron una cierta importancia los mineros sajones llevados a América por iniciativa de FAUSTO ELHUYAR. En Guancavelica seguían funcionando los hornos de aludeles según se aprecia en los dibujos de AMADEO FREZIER (Fig. 8), en su viaje a la América Meridional, realizado entre 1712 y 1714, o los del checo TADEUS HAENKE (Fig. 9), miembro de la expedición de Malaspina, 1788-1794. Dibujos similares nos muestra otro miembro de la misma expedición, JOSE DOMBEY, en las minas de mercurio descubiertas en Coquimbo, Chile.

Asimismo hubo innovaciones financieras. El gremio de azogeros de Potosí crea, en 1752, el Banco de Rescates que luego pasó al Estado con el nombre de Banco de Rescates de San Carlos. En 1766, se crean instituciones similares en Méjico; es el nacimiento de nuestro sistema bancario.

Este siglo también fue el del descubrimiento de los tres metales hispánicos: el platino, hallado en Nueva Granada por los mineros y dado a conocer al Mundo por ANTONIO DE ULLOA; el volframio, descubierto por los hermanos



Figura 8. -Hornos de aludeles, en Guancavelica (Perú), de un solo caño, con refrigeración por agua. Según AMADEO FREZIER, en la *Relation du voyage de la mer du Sud*. (1717)

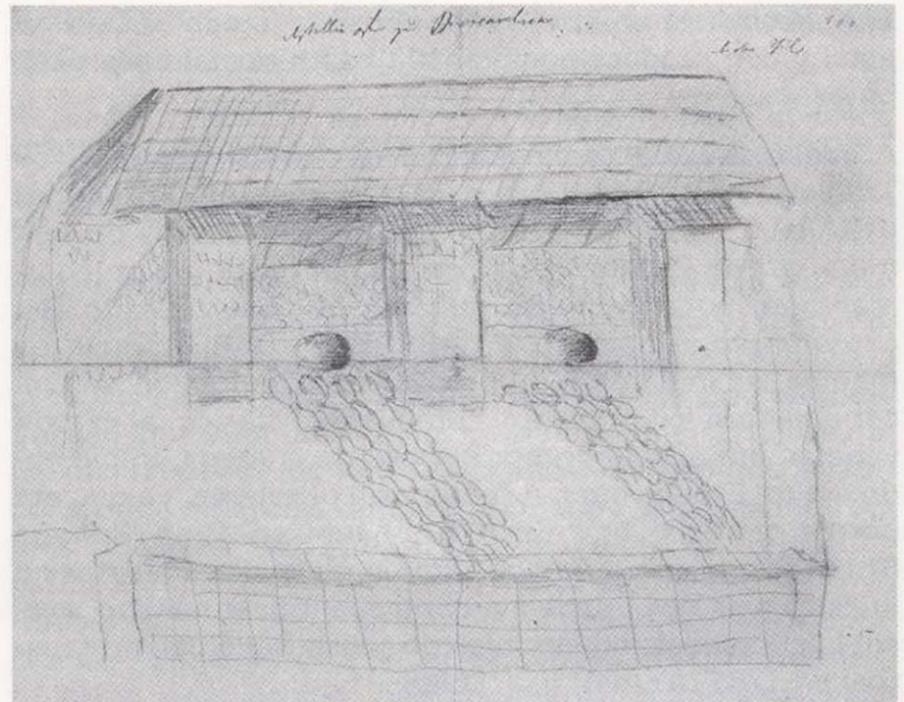


Figura 9. -Hornos de aludeles de Guancavelica, dibujados por el checo TADEUS HAENKE a finales del XVIII (Archivo del Real Jardín Botánico de Madrid). Se observan ocho encañados para dos hornos y la refrigeración por aire.

JUAN JOSE y FAUSTO ELHUYAR, en 1783; y el vanadio aislado por ANDRES MANUEL DEL RIO, en 1801.

La Ciencia entra con fuerza de la mano del Estado. En 1752, ANTONIO ULLOA, solicita a FERNANDO VI la creación del Real Gabinete de Historia Natural. Se contrata a expertos extranjeros, tal es el caso del irlandés BOWLES, los hermanos KETERLIN, de nacionalidad alemana, o el químico francés LA PLANCHE. En 1765, JORGE JUAN dirige la participación española en la expedición geodésica al Perú, para medir el grado del meridiano terrestre, en colaboración con la Academia francesa. Ese mismo año se funda la Escuela de Minas de Freiberg, en Sajonia, cuyas aulas serían frecuentadas por estudiantes españoles. En 1773 se crea el Real Seminario Patriótico de Vergara, donde se contrata a los franceses PROUST y CHABANEAU, y cinco años después al alemán HERRGEN, discípulo de WERNER. Por fin, en 1777, nace la Academia de Minas de Almadén, antecesora de la Escuela de Minas de Madrid. Esta labor docente también es llevada a América, creándose en 1778 la Academia de Minas de Potosí e inaugurándose en 1790 el Real Seminario de Minería de México, la más antigua Escuela de Ingeniería de América aun existente (AYALA, F. J., 1992, LOPEZ DE AZCONA, J. M., 1979).

La creatividad científica y técnica fue importante, principalmente a finales de siglo. En 1761 se publican los *Comentarios a las Ordenanzas de Minas* de FRANCISCO XABIER GAMBOA, donde se resume y analiza la legislación y práctica jurídica en la época colonial y se explica la metalurgia, así como el laboreo de numerosos distritos mineros. En 1775 GUILLERMO BOWLES escribe *Introducción a la Historia Natural y la Geografía Física de España*, donde se enumeran muchas minas peninsulares. Asimismo, en 1785, JUAN RAMON ITURRIZA Y ZABALA edita la *Historia*

todo de los toneles de amalgamación, inventado a finales del XVIII, en Schemnitz, por IGNAZ VON BORN. En estos ensayos tuvieron una cierta importancia los mineros sajones llevados a América por iniciativa de FAUSTO ELHUYAR. En Guancavelica seguían funcionando los hornos de aludeles según se aprecia en los dibujos de AMADEO FREZIER (Fig. 8), en su viaje a la América Meridional, realizado entre 1712 y 1714, o los del checo TADEUS HAENKE (Fig. 9), miembro de la expedición de Malaspina, 1788-1794. Dibujos similares nos muestra otro miembro de la misma expedición, JOSE DOMBEY, en las minas de mercurio descubiertas en Coquimbo, Chile.

Asimismo hubo innovaciones financieras. El gremio de azogeros de Potosí crea, en 1752, el Banco de Rescates que luego pasó al Estado con el nombre de Banco de Rescates de San Carlos. En 1766, se crean instituciones similares en Méjico; es el nacimiento de nuestro sistema bancario.

Este siglo también fue el del descubrimiento de los tres metales hispánicos: el platino, hallado en Nueva Granada por los mineros y dado a conocer al Mundo por ANTONIO DE ULLOA; el volframio, descubierto por los hermanos



Figura 8. -Hornos de aludeles, en Guancavelica (Perú), de un solo caño, con refrigeración por agua. Según AMADEO FREZIER, en la *Relation du voyage de la mer du Sud*. (1717)

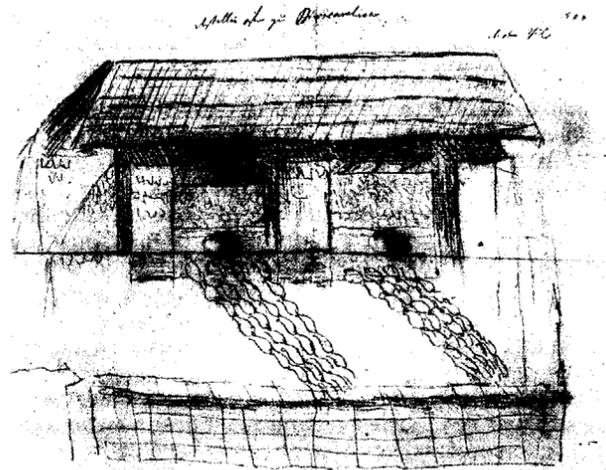


Figura 9. -Hornos de aludeles de Guancavelica, dibujados por el checo TADEUS HAENKE a finales del XVIII (Archivo del Real Jardín Botánico de Madrid). Se observan ocho encañados para dos hornos y la refrigeración por aire.

JUAN JOSE y FAUSTO ELHUYAR, en 1783; y el vanadio aislado por ANDRES MANUEL DEL RIO, en 1801.

La Ciencia entra con fuerza de la mano del Estado. En 1752, ANTONIO ULLOA, solicita a FERNANDO VI la creación del Real Gabinete de Historia Natural. Se contrata a expertos extranjeros, tal es el caso del irlandés BOWLES, los hermanos KETERLIN, de nacionalidad alemana, o el químico francés LA PLANCHE. En 1765, JORGE JUAN dirige la participación española en la expedición geodésica al Perú, para medir el grado del meridiano terrestre, en colaboración con la Academia francesa. Ese mismo año se funda la Escuela de Minas de Freiberg, en Sajonia, cuyas aulas serían frecuentadas por estudiantes españoles. En 1773 se crea el Real Seminario Patriótico de Vergara, donde se contrata a los franceses PROUST y CHABANEAU, y cinco años después al alemán HERRGEN, discípulo de WERNER. Por fin, en 1777, nace la Academia de Minas de Almadén, antecesora de la Escuela de Minas de Madrid. Esta labor docente también es llevada a América, creándose en 1778 la Academia de Minas de Potosí e inaugurándose en 1790 el Real Seminario de Minería de México, la más antigua Escuela de Ingeniería de América aun existente (AYALA, F. J., 1992, LOPEZ DE AZCONA, J. M., 1979).

La creatividad científica y técnica fue importante, principalmente a finales de siglo. En 1761 se publican los *Comentarios a las Ordenanzas de Minas* de FRANCISCO XABIER GAMBOA, donde se resume y analiza la legislación y práctica jurídica en la época colonial y se explica la metalurgia, así como el laboreo de numerosos distritos mineros. En 1775 GUILLERMO BOWLES escribe *Introducción a la Historia Natural y la Geografía Física de España*, donde se enumeran muchas minas peninsulares. Asimismo, en 1785, JUAN RAMON ITURRIZA Y ZABALA edita la *Historia*

General de Vizcaya, donde se comentan las vicisitudes históricas de la industria del hierro en dicho Señorío. Sin embargo son los ingenieros de minas españoles, de Almadén y de Freiberg, los que escribieron las páginas más interesantes de la historia minera de finales del XVIII. CRISTOBAL STORR, primer Director de la Academia de Almadén, escribió en alemán un *Curso de Mineralogía y Geometría Subterránea*, cuya traducción nunca se terminaría. ANTONIO ULLOA, nos pone al día sobre la minería del Nuevo Mundo en *Noticias Americanas*, publicado en 1792. Destacamos asimismo, en la última década del siglo los primeros tratados de Mineralogía escritos por españoles, en América, la *Orythología* de JUAN JOSE ELHUYAR y la *Oritognosia* de ANDRES MANUEL DEL RIO. En 1803, ANGEL DIAZ, cuñado de JUAN JOSE publica en Nueva Granada una importante obra de laboreo y metalurgia, se trata del *Tratado de Mineralogía*.

Con la Guerra de la Independencia (1808-1814) se acaba nuestra Edad Moderna, iniciándose en 1809 el proceso de emancipación de los Virreinos americanos, fruto de su temprana maduración por el impulso civilizador español. La contienda supuso la destrucción de nuestra naciente industria. Los franceses acabaron con Orbaiceta, Eugui, Fontamena y otras factorías. Los ingleses volaron fábricas como la de porcelanas del Retiro o la textil de Béjar. Tras la guerra, con FERNANDO VII, en un país arruinado y con un ambiente de intolerancia, llegamos a las cotas más bajas tras la digna recuperación ilustrada del XVIII.

CONCLUSIONES

La minería en la época del Imperio se concentró en los metales preciosos, principalmente plata, en América, así como en el mercurio de Almadén y Guancavelica.

Durante este período se realizaron aportaciones fundamentales a las técnicas de amalgamación: métodos de patio, canoas, estufas, buitrones o de cazo y cocimiento, empleo de la capellina, aporte de magistrales y otros reactivos, etc. Igualmente en las tecnologías metalúrgicas del mercurio: hornos de xabecas, reverbero y aludeles. Asimismo se innovaron los procesos de preparación de minerales, especialmente en la trituración, con el empleo de grandes ruedas hidráulicas. En torno al problema del desagüe de las minas, AYANZ con su máquina de vapor se adelantó unos cien años a SAVERY. Este conjunto de innovaciones situaría a la tecnología del sector minero-metalúrgico español de metales preciosos, junto a los alemanes, en cabeza del Mundo, desde 1550 a 1750.

Fruto también de los avances del sector minero-metalúrgico fueron los descubrimientos de tres nuevos metales, por parte de españoles: el platino, el volframio y el vanadio. ELHUYAR y DEL RIO son dos de los ocho científicos españoles incluidos por ASIMOV en su *Enciclopedia Biográfica de la Ciencia y Tecnología*.

A nivel científico, cabe señalar también la elaboración de los primeros tratados mineralógicos escritos por españo-

les. Estos fueron realizados en América, por los ingenieros españoles JUAN JOSE ELHUYAR y ANDRES MANUEL DEL RIO, a finales del XVIII (PUCHE, O. y AYALA, F. J., 1993). Es conveniente recordar que al inicio de la enseñanza de la minería en Almadén (1777) los pilares básicos para el estudio de esta carrera eran la Mineralogía y la Geometría Subterránea.

La casi totalidad de estas innovaciones y descubrimientos tuvieron lugar en América, en estrecha relación con focos mineros. En la Península es destacable la recuperación industrial del XVIII.

La España peninsular recibió durante este período una media anual de doce millones de pesos procedentes del sector minero americano, que en buena medida pasaron a la economía de los países europeos acreedores de la corona, impidiendo la creación de una Hacienda moderna.

América recibió una Civilización, de la economía a las Instituciones, y un idioma común, que desatado el inevitable proceso de emancipación, no serviría para mantener unido políticamente, contra el ideal bolivariano, a la población hispanoamericana.

Comenzaría entonces para España la búsqueda de unas nuevas señas de identidad en el proceso de paso que PRA-DOS DE LA ESCOSURA ha denominado: "de Imperio a Nación".

BIBLIOGRAFIA

ACOSTA, J. (1590): *Historia Natural y Moral de Indias, en que se tratan las cosas notables del cielo y elementos, metales, plantas y animales dellas: y los ritos y ceremonias, leyes y gobierno, y guerras de los indios*. Imp. Juan León. Sevilla

ADARO, L. (1987-1994): *Datos y documentos para una Historia Minera e Industrial de Asturias*. Tomos I, II y IV. Ed. Cám. Of. Com., Industr. y Navegación de Gijón et al. Gijón.

ADARO, L. (1986): *Los comienzos de las fábricas de municiones gruesas de Trubia y de armas de Oviedo*. Bol. Inst. Est. Asturianos. Oviedo.

AGRICOLA, G. (1556): *De Re Metallica*. Froben. Basilea.

ANONIMO (1768): *Recueil de planches sur les sciences, les arts liberaux, et les arts mechaniques avec leur explication*. Ed. Chez Briasson et al. París. Trad. al castellano por encargo de Fos Bucraa, en 1975. Ed. Velázquez. Madrid.

ASIMOV, I. (1973): *Enciclopedia Biográfica de la Ciencia y la Tecnología*. Rev. de Occidente. Madrid.

AYALA, F. J. (1986): *Tecnología y Sociedad en la Primera Revolución Industrial*. Industria Minera. Madrid.

AYALA, F. J. (1992): *La Técnica en el descubrimiento y colonización de América*. Bol. Inst. Ing. de España. Madrid.

AYALA, F. J. (1994): *La aportación científica y tecnológica de Jorge Agrícola*. Bol. Geol. Minero. ITGE. Madrid.

ARAGON DE LA CRUZ, F. (1992): *España y América en el descubrimiento y metalurgia del platino*. IX Congr. Int. H^o de América. Org. AHILA, 407-420. Sevilla.

BAQUIJANO Y CARRILLO, J. (1793): *Historia del descubrimiento del cerro de Potosí*. Mercurio Peruano, 211-217.

BARBA, A. A. (1640): *Arte de los metales, en que se enseñaba el verdadero beneficio de los de oro, y plata por azogue. El modo de fundirlos todos, y como se han de refinar y apartar unos de otros*. Ed. de 1770. Imp. de la Viuda de Manuel Fdez. Madrid.

BARGALLO, M. (1955): *La Minería y la Metalurgia en la América española durante la época colonial*. Ed. Fondo de Cultura Económica. México-Buenos Aires.

BAS, M. y al (1992): *La empresa de indias: análisis actualizado de la gestión de una multinacional de los siglos XV y XVI*. An. de Mec. y Electr., 69, 33-44.

BERNALDEZ, F. y RUA DE FIGUEROA, R. (1861): *Memoria sobre las minas de Almadén y Almadenejos*. Imp. Nal. Madrid.

BIRINGUCCIO, V. (1543): *Pirotechnia*. Ed. de 1966. M.I.T. Press. Cambridge.

BORN, I. (1786): *Ueber das Anquicken der gold und silberhaltigen Erze, Schwarzkupfer und Hüttenspeise*. Vienna.

BOTELLER, A. (1562-1566): *Memorial y cartas de Mossen Antonio Boteller, sobre beneficiar con azogue los desechos de los terrenos de las minas de Guadalcanal*. En Noticias históricas de las minas de Guadalcanal, II.

BOWLES, G. (1775): *Introducción a la Historia Natural y a la Geografía Física de España*. Imp. Real. Madrid.

BROWN, K. (1992): *La distribución del mercurio a finales del período colonial y los trastornos provocados por la independencia hispanoamericana*. En Minería Colonial Latinoamericana, Eds. AVILA, D. y al. Ed. Inst. Nal. de Antropología e Historia. México.

CALVO, B. y GONZALEZ, J. (1992): *Minas y minerales de Iberoamérica*. Ed. ITGE Madrid.

CAÑETE, P. V. (1787): *Guía histórica, geográfica, física, política, civil y legal del Gobierno e Intendencia de la Provincia de Potosí*. Ed. Potosí. 1952. Potosí.

CARRILLO LASO, A. (1844): *Tratado de las minas antiguas de España*. Imp. Alegría y Charlain. Madrid.

CASAS, B. (1559): *Historia de las Indias*.

CASTILLO, M. (Ed.) (1993): *Intercambio Tecnológico y Cultural entre América y Europa durante el período colonial español*. Minería y Metalurgia. Ed. Muñoz Moya y Monraveta. Sevilla-Bogotá.

CESPEDES DEL CASTILLO, G. (1983): *América Hispánica. 1492-1898*. En Historia de España, VI. Ed. TUÑÓN DE LARA, M. Ed. Labor. Barcelona.

CIEZA DE LEON, P. (1553): *Primera parte de la Crónica del Perú, que trata de la demarcación de sus provincias, la*

descripción de ellas, las fundaciones de las nuevas ciudades, los ritos y costumbres de los Indios, con otras cosas extrañas dignas de saberse

. Imp. Casa Martín Montedoca. Sevilla.

CROZIER, R. D. (1992): *Los procesos de patio y buitron: El beneficio de plata por amalgamación*. Latinoamer. Marz. 92, 26-31.

CROZIER, R. D. (1993): *Silver processing in Spanish America*. The patio and buytron processes. C.I.M. Bull., V. 86, 972, 86-91.

DEL RIO, A. M. (1795): *Elementos de Oritognosia o del conocimiento de los fósiles, dispuestos según los principios de A. G. Werner, para el uso del Real Seminario de la Minería de México*. Imp. Zúñiga y Ontiveros. México.

DIAZ, J. J. (1802): *Tratado de Mineralogía*.

ELHUYAR, F. y ELHUYAR, J. J. (1785): *Mémoire sur la nature du Wolfram, a celle d'une nouveau métal qui entre dans sa composition*. R. Ac. Sci., Insc. et Bell. Arts de Toulouse.

ELHUYAR, J. J. (finales del XVIII) *Orythología*. Nueva Granada. Manuscrito de los Pap. de Mutis, C. Archiv. R. Jardín Botánico de Madrid. Div. III.6.1.2.3.

FERNANDEZ PEREZ, J. y MATILLA TASCÓN, I. (1990): *Las minas de Almadén y las técnicas de amalgamación en las metalurgias hispano-americanas*. En Memoria de las Reales Minas de Almadén, de Agustín de Betancourt (1773), 28-85. Ed. Minist. Industr. y Energ. Madrid.

FISHER, J. (1977): *Minas y mineros del Perú colonial 1776-1824*. Ed. Inst. Est. Peruanos. Lima.

FLORISEL (1927): *El cuento y las cuentas del oro en América*. México

FREZIER, M. (1717): *Relation du voyage de la Mer du Sud, aux cotes du Chili, du Perou et du Brasil*. 2 Vol Imp. Pierre Humbert. Amsterdam. Trad al castellano por GUERIN, M. A. en 1984. Biblioteca de Ayacucho.

GAMBOA, F. J. (1761): *Comentarios a las Ordenanzas de Minas dedicadas al catholico Rey, Nuestro Señor D. Carlos III (que Dios guarde), siempre magnánimo, siempre feliz, siempre Augusto*. Ed. Of. Joaquín Ibarra. Madrid.

GARCIA CABALLERO, J. J. (1759): *Tratado del descubrimiento de la mina de Riopar*.

GARCIA SANZ, J. M. (1971): *Almadén, riqueza de una mina y pobreza de un pueblo (1)*: Geográfica.

GARCIA TAPIA, N. (1989): *Inventores españoles del Siglo de Oro*. Invest. y Ciencia. Barcelona.

GARCIA TAPIA, N. (1992): *Del Dios del fuego a la máquina de vapor. La introducción de la técnica industrial en Hispanoamérica*. Ed. Ambito. Madrid.

GONZALEZ, T. (1832): *Registro y relación general de las minas de la corona de Castilla*. Ed. Miguel de Burgos. Madrid.

HABASHI, F. (1982): *Chemistry and metallurgic in New Spain and the Spanish South American colonies*. C.I.M. Bull. V. 75, 842, 133-138.

HENAO, G. (1689): *Averiguaciones de las antigüedades de Cantabria; enderezadas principalmente a descubrir las de Guipúzcoa, Vizcaya y Alaba, provincias contenidas en ella, y a honor y gloria de San Ignacio de Loyola, nacido en la primera y originario de las otras dos, patriarca y fundador de la Compañía de Jesús*. Imp. Eugenio Antonio García. 2 Vol. Salamanca.

HUMBOLDT, A. VON (1805-1832): *Viaje a las regiones equinociales del Nuevo Continente, realizado de 1799 a 1804*. 5 Vol. Ed. de 1826. Imp. Casa de la Rosa. París.

HUMBOLDT, A. VON (1841): *Ensayo político del Reino de Nueva España*. 2 Vol. Trad. al castellano por OLIVE, P. M. Imps. Nuñez e Ibarra.

ITURRIZA Y ZABALA, J. R. (1785): *Historia General de Vizcaya, comprobada con autoridades y copias de escrituras, y privilegios fehacientes. En la cual se relaciona su población y posesión perpetua por sus naturales, conservando su primitiva lengua, fueros, franquezas y libertades. Origen de las Merindades, y su gobierno antiguo; catálogo de los señores que hubo. Barones ilustres, batallas, incendios, número de Anteiglesias, Aldeas y Parroquias, Patronos, Beneficios, Almas de Comunión, Hermitas, Casas, ferrerías, molinos, hogueras, villas y combentos con sus fundaciones*. Mss. Ac. Hist.

IZQUIERDO, J. J. (1958): *La primera casa de las ciencias en México. El Real Seminario de Minería (1792-1811)*. Ed. Ciencia. México.

JARS, J. (1780): *Voyages metalurgiques*. 2 Vol. Imp. L. Cellot et al. Paris.

LANG, M. (1986): *El derrumbe de Huancavelica en 1786. Fracaso de una reforma borbónica*. Histórica, 10, 213-226.

LARRUGA, E. (1787-1800): *Memorias políticas y económicas sobre los frutos del comercio, fábricas y minas de España, con inclusión de los Reales Decretos, ordenes y cédulas, aranceles y ordenanzas expedidas para su gobierno y fomento*. Imps. de Benito Cano y Antonio Espinosa. Madrid.

LE FLEN, J. P. et al. (1983): *La frustración de un Imperio (1476-1714)*. En Historia de España, V. Ed. TUÑÓN DE LARA, M. Ed. Labor. Barcelona.

LOHMANN VILLENA, G. (1949): *Las minas de Huancavelica en los siglos XVI y XVII*. Pub. Esc. Hispano-Americanos. Sevilla.

LOPEZ AZCONA, J. M. (1979): *La enseñanza de la minería en el mundo hispánico. Notas históricas*. Madrid.

LOPEZ AZCONA, J. M. y al. (1990): *Minería iberoamericana. Repertorio bibliográfico y biográfico*. 4 Vol. Ed. ITGE Madrid.

LOPEZ AZCONA, J. M. (1992): *La Minería en Nueva Granada. Notas históricas 1500-1820*. Bol. R. Soc. Geográfica, CXXVIII, enero-diciembre 92, 391-394.

MAFFEI, E. (1877): *Centenario de la Escuela de Minas de España 1777-1877*. Ed. Esc. Esp. de Minas. Madrid.

MAFFEI, E. y RUA DE FIGUEROA, R. (1861): *Apuntes para una biblioteca española*. Ed. de 1970. Congreso. Int. de Minería. Cát. de San Isidro. León.

MATILLA TASCÓN, A. (1958-1987): *Historia de las minas de Almadén*. 2 Vol. Ed. MAYASA. Imp. Gráf. Osca. Madrid.

MENDEZ, L. M. (1992): *Los bancos de rescate en Hispanoamérica (1747-1832): El proceso histórico y sus fundamentos ideológicos. Estudio comparado para México, Chile y Perú*. En Minería Colonial Iberoamericana. Eds. AVILA, D. y al. Ed. Inst. Nal. Antropología e Historia. México.

MESEGUER PARDO, J. (1949): *El esfuerzo minero y metalúrgico de España en el Nuevo Mundo*. Bol. R. Soc. Geográfica, T. LXXXV. Madrid.

MONARDES, J. (1572): *Diálogos del hierro y sus grandezas*.

MONTESINOS, F. (1642): *Anales del Perú*. Ed. en 1906 por Víctor Maurtus.

MORRAL, F. R. (1993): *Iron in Iberia, a mini-history*. C.I.M. Bull., V. 86, 967, 106-111.

OÑATE, J. (1624): *Tratado muy útil y provechoso de Re Metallica, con todas las reglas y normas de labrar minas y beneficio de metales, así de fuego como de azogue*.

OTERO, G. (1988): *Las Reales Fábricas una utopía razonable*. Rev. M.O.P.U., 356, julio-agosto, 134-145.

PALACIOS REMONDO, J. (1993): *Los Delhuyar. La Rioja en América. Biografía de los hermanos Juan José y Fausto a través de fuentes y bibliografía*. Ed. Consej. Cult., Dep. y Juv. Gobierno de la Rioja. Logroño.

PELAYO, F. (1990): *La adquisición de las técnicas mineras en la España de la Ilustración (1770-1800)*. En Ciencia, Técnica y Estado en la España Ilustrada, 73-87. Ed. FERNANDEZ PEREZ, J. y GONZALEZ TASCÓN, I. Ed. M.E.C. Madrid.

PELAYO, F. (1990): *La aplicación de las técnicas mineras europeas en Nueva Granada*. Coll. Science et Empire. UNESCO. París.

PELAYO, F. (1992): *Ensayo sobre los métodos de beneficio de amalgamación y de fundición realizados por Juan José de Elhuyar y José Celestine Mutis, en Nueva Granada*. Bol. Geol y Minero, 103-3, 570-620.

PEREZ DE VARGAS, B. (1568): *De re metallica, en el qual se tratan muchos y diversos secretos del conocimiento de toda suerte de minerales, de como se deuen buscar, ensayar y beneficiar, con otros secretos e industrias notables, assi para los que tratan los oficios de oro, plata, cobre, estaño, plomo, azero, hierro y otros metales, como para muchas personas curiosas*. Imp. Pierres Cosin. Madrid.

PRIETO, C. (1977): *La Minería en el Nuevo Mundo*. Ed. Rev. de Occidente. Madrid.

PUCHE, O. y AYALA, F. J. (1993): *La "Orygthologia" de Juan José Elhuyar (1754-1796) y la "Oritognosia de Andrés Manuel del Río (1764-1849), primeros tratados geológicos escritos por españoles, en América*. Bol. Geol. Minero, 103-1, 72-107.

PUCHE, O. y BROWN, K. W. (1992): *Pedro Subiela un alumno de Almadén en América*. Industr. Minera, 319, mayo 92, 29-38.

PUCHE, O. y MATA, J. M. (1992): *Enseñanza de mineralogía y Petrología con especial atención a las Escuelas de Minas*. Industr. Minera, 315, enero 92, 21-37.

ROMEU DE ARMAS (1989): *La Real Escuela de Mineralogía de Madrid 1789-1808*. Industr. Minera, 287, marzo. 89, 7-18.

SAMAME BOGGIO, M. (1980): *Historia de la minería peruana*. Industr. Minera, 203, nov. 90, 9-32.

SERRANO, C. (1993): *Transferencia de tecnología y relaciones de intercambio. Caso de estudio: La amalgamación y las Escuelas de Minería en la colonia*. Rev. Metallúrgica, 13, 53-56. FNI-UTO. Oct. 93.

SIMONIN, L. (1867): *La vie souterraine ou les mines et les mineurs*. Ed. Lib. de L. Hachette et Cie. Paris.

SOBRINO, J. L. y al. (1981): *Libro del centenario de Peñarroya*. Madrid.

SOLORZANO Y PEREIRA, J. (1647): *Política Indiana*. Imp. Real de la Gaceta. 2 Vol. Madrid.

TARGHETTA, L. (1984): *La Castilla industrial en la época de Carlos I*. Lecc. Entrega de Títulos Escuela Minas. Madrid.

TECNIBERIA (1989): *Ayer y hoy de la minería en España*. Madrid.

THOMPSON, J. V. (1991): *Silver recovery by older methods. From "forest fire" smelting to the patio process. The fascinating metallurgy of the cinderella metal*. E & MJ. junio 91, 39-41.

ULLOA, A. (1792): *Noticias americanas. Entretenimientos filosófico-históricos sobre la América Meridional y la Septentrional Oriental. Comparación general de los territorios, climas y producciones en las especies vegetal, animal y mineral; con relación particular de los indios de aquellos países, sus costumbres y usos, de las petrificaciones de cuerpos marinos y de las antigüedades: Con un discurso sobre el modo con que pasaron los primeros pobladores*. Imp. Real. Madrid.

VALLE, A. (1989): *La política minera y metalúrgica de Carlos III*. Industr. Minera, 288, abril 89, 11-19.

ZARRALUQUI, J. (1934): *Los almadenes del azogue*. 2 Vol. Lib. Int. Roma. Madrid.

Original recibido: Enero de 1995.

Original aceptado: Febrero de 1995.

NORMAS DE PUBLICACION PARA LOS AUTORES

Los trabajos inéditos que se reciban para su publicación en el BOLETIN GEOLOGICO Y MINERO serán revisados por un Comité editorial que decidirá si procede su publicación.

Los autores deberán atenerse a las siguientes normas:

Texto.

Se entregará paginado y mecanografiado a doble espacio por una sola cara y con amplios márgenes. Este texto se considerará definitivo, deberá venir leído por el autor y perfectamente puntuado y con las correcciones de las erratas de mecanografía que fuesen precisas. En él serán marcadas las fechas de recepción y aceptación.

Cuando en el trabajo se acompañen figuras, tablas y fotografías, el autor deberá dejar un pequeño espacio con indicación del lugar donde han de intercalarse, si es posible. En los originales de las mismas se reseñará el título del trabajo, así como el nombre de los autores.

Todos los trabajos en lengua española irán precedidos de un breve resumen en español e inglés o francés. Los de idiomas extranjeros lo llevarán en su idioma y también en español. Al final de los mismos, y en párrafo aparte, se incluirán las palabras clave, reservándose el último lugar para la localización geográfica, si la hubiere.

En todo momento los autores conservarán una copia del texto original y figuras.

Idiomas.

Excepcionalmente podrán publicarse trabajos en otros idiomas (preferiblemente inglés o francés), siempre que abarquen temas sobre España y sean de autores extranjeros.

Referencias.

Se incluirá al final de cada trabajo la relación de las obras consultadas por orden alfabético de autores, empleándose las normas y abreviaturas usuales.

Parte gráfica.

La parte gráfica vendrá preparada para ser reproducida a las anchuras máximas de 80 mm. (una columna) y 170 mm. (doble columna). Se evitará en lo posible la inclusión de encartes, así como se reducirá a lo indispensable el número de figuras, tablas y fotografías. En las ilustraciones a escala, ésta se expresará solamente en forma gráfica, con objeto de evitar errores en caso de reducir el original. Todas las figuras irán numeradas correlativamente según su orden de inserción.

Las figuras serán originales y nunca copiativos, delineadas con tinta china sobre papel vegetal. Las tablas, bien presentadas para su reproducción fotográfica. Las fotografías serán positivos en blanco y negro sobre papel brillo y excepcionalmente en color (positivo en brillo o transparencia)

Pruebas.

Serán enviadas a los autores para que realicen las correcciones de erratas de imprenta producidas en la composición, no admitiéndose modificación alguna, adición o supresión al texto original.

Las pruebas serán devueltas por el autor en el plazo máximo de diez días, pasados los cuales la Redacción decidirá entre retrasar el trabajo o realizar ella misma la corrección, declinando la responsabilidad por los errores que pudieran persistir.

Los originales de texto y figuras quedarán en poder de la Redacción.

Tiradas aparte.

Se asignan 30 tiradas aparte con carácter gratuito por trabajo publicado. Cuando el autor desee un número mayor del indicado deberá hacerlo constar por escrito en las pruebas y abonar el precio de este excedente.

La Redacción del BOLETIN GEOLOGICO Y MINERO introducirá cuantas modificaciones sean necesarias para mantener los criterios de uniformidad y calidad del mismo. De estas modificaciones se informará al autor.

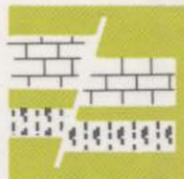
Toda la correspondencia referente a las publicaciones deberá dirigirse a:

Leopoldo Aparicio Ladrón de Guevara
Jefe del Servicio de Publicaciones
Instituto Tecnológico Geominero de España
Ríos Rosas, 23. 28003-Madrid

INSTITUTO TECNOLÓGICO GEOMINERO DE ESPAÑA

Finalidad:

*Investigación, Desarrollo Tecnológico y Asistencia técnica en Geología, Minería
Agua subterráneas, y Disciplinas conexas*



GEOLOGIA

MAPA GEOLOGICO NACIONAL (MAGNA)
ESTUDIOS GEOLOGICOS Y CARTOGRAFIA TEMATICA
GEOLOGIA MARINA



RECURSOS MINERALES

EXPLORACION MINERA E INVESTIGACION DE YACIMIENTOS
METALOGENIA Y CARTOGRAFIA METALOGENETICA
EVALUACION DE RESERVAS E INVENTARIO DE RECURSOS
PROCESOS, TECNOLOGIA Y ECONOMIA MINERAS
NORMATIVA Y SEGURIDAD MINERA



AGUAS SUBTERRANEAS

CARTOGRAFIA HIDROGEOLOGICA
PROTECCION DE RECURSOS HIDROGEOLOGICOS
EVALUACION Y CONTROL DE ACUIFEROS SUBTERRANEOS
RECURSOS GEOTERMICOS



INGENIERIA GEOAMBIENTAL

RIESGOS GEOLOGICOS
RESTAURACION DEL MEDIO AMBIENTE MINERO
GEOTECNIA Y GEOLOGIA APLICADA A LA INGENIERIA
ESTUDIOS MEDIOAMBIENTALES



LABORATORIOS Y ENSAYOS

ANALISIS QUIMICOS Y MINERALOGICOS
GEOQUIMICA BASICA Y APLICADA
GEOFISICA Y TELEDETECCION APLICADA
ENSAYOS MINERALURGICOS Y GEOTECNICOS
CARACTERIZACION DE ROCAS Y MINERALES INDUSTRIALES
SONDEOS MECANICOS Y ENSAYOS DE BOMBEO



INFORMACION, DOCUMENTACION Y BANCO DE DATOS

FONDOS DOCUMENTALES Y BASES DE DATOS
LITOTECA
SISTEMAS DE INFORMACION Y COMUNICACIONES



SERVICIO DE PUBLICACIONES

CARTOGRAFIA TEMATICA A DIVERSAS ESCALAS
PUBLICACIONES SOBRE GEOLOGIA, MINERIA Y CIENCIAS CONEXAS
«BOLETIN GEOLOGICO Y MINERO»
«REVISTA ESPAÑOLA DE MICROPALAEONTOLOGIA»



MUSEO GEOMINERO

PALEONTOLOGIA Y MINERALOGIA
CATALOGACION Y GESTION DE COLECCIONES GEOLOGICAS
EXPOSICIONES: TEMPORALES Y PERMANENTES
DIVULGACION CIENTIFICA