



Instituto Tecnológico  
GeoMinero de España

**boletín**

**geológico**

**y minero**

VOLUMEN 107

Marzo - Abril 1996

NUMERO 2



Volumen 107

Número 2

Marzo-Abril 1996

# boletín geológico y minero



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

## Sumario

### Geología

J. BERNAD y G. MARTINEZ: Revisión de los Ammonoideos del Lías español depositados en el Museo Geominero (ITGE, Madrid) ... .. 3

J. AZCARRAGA Y B. ABALOS: Comportamiento reológico de la Formación Candelaria y la Zona de Movimiento Tectónico de Carreiro (Cabo Ortegá, NO de España) durante el metamorfismo sintectónico eo-Hercínico de grado medio y alto ... .. 25

E. GIL: Consideraciones bioestratigráficas sobre *Allocricetus bursae* (Cricetidae, Rodentia) en el pleistoceno inferior y medio de Atapuerca (Burgos, España) ... .. 45

### Minería

I. GONZALEZ CASAL y R. SANCHEZ MEDRANO: La accidentalidad en el sector minero de la Región de Murcia ... .. 53

### Aguas subterráneas

G. LOPEZ ARECHAVALA, J. A. LOPEZ GETA y J. M. MURILLO DIAZ: Reordenación hidrológica de cuencas o subcuencas hidrográficas con intervención de sistemas acuíferos subterráneos ... .. 62

### Información

O. PUCHE RIART: Historia de la hidrogeología española, desde sus orígenes hasta finales del Siglo XIX ... .. 80

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 un terraplén en la Alpujarra granadina.  
Carretera Comarcal C-332 Cadiar - Orgiva

Foto: F. J. Ayala Carcedo

Depósito Legal: M. 3.279 - 1958  
ISSN 0366-0176  
NIPO 241-96-005-5

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

## Revisión de los Ammonoideos del Lías español depositados en el Museo Geominero (ITGE, Madrid).

Por J. BERNAD (\*) y G. MARTINEZ (\*\*)

#### R E S U M E N

Se revisan desde el punto de vista taxonómico, los fósiles de ammonoideos correspondientes al Lías español que se encuentran depositados en el Museo Geominero. La colección está compuesta por ejemplares procedentes de 67 localidades españolas, pertenecientes a colecciones de diferentes autores. Se identifican los ordenes Phylloceratina, Lytoceratina y Ammonitina, las familias Phylloceratidae, Echioceratidae, eoderoceratidae, Liparoceratidae, Amaltheidae, Dactylioceratidae, Hildoceratidae y Hammatoceratidae y las subfamilias Xipheroceratinae, Arieticeratinae, Harpoceratinae, Hildoceratinae, Grammocerotinae, Phymatoceratinae y Hammatoceratinae correspondientes a los pisos Sinemuriense, Pliensbachien- se y Toarciense.

*Palabras clave:* Ammonoidea, Taxonomía, Lías, España, Museo Geominero.

#### A B S T R A C T

The Spanish Liassic ammonoidea fossil collections of the Geominero Museum is revised under a taxonomic point of view. The collection includes specimens from 67 Spanish localities, and belongs to different author's collections. The taxonomic orders Phylloceratina, Lytoceratina and Ammonitina; the families Phylloceratidae, Echioceratidae, Eoderoceratidae, Liparoceratidae, Amaltheidae, Dactylioceratidae, Hildoceratidae and Hammatoceratidae; and the subfamilies Xipheroceratinae, Arieticeratinae, Harpoceratinae, Hildoceratinae, Grammocerotinae, Phymatoceratinae and Hammatoceratinae are identified, corresponding to Sinemurian, Pliensbachian and Toarcian stages.

*Key words:* Ammonoidea, Taxonomy, Lias, Spain, Geominero Museum.

#### INTRODUCCION

Uno de los objetivos de la reestructuración del Museo Geominero pasa por la revisión de las colecciones históricas de fósiles allí depositadas y, como ya se viene haciendo desde hace algunos años, esta es una contribución más a la actualización y ordenación taxonómica de una pequeña parte de los fondos de dicho Museo.

Tanto para la identificación taxonómica como para el establecimiento de la posición estratigráfica de los diferentes ejemplares, se han tenido en cuenta los numerosos trabajos disponibles en la bibliografía, en concreto: GOY (1974), GABILLY (1975, 1976), GUEx (1973, 1975), SCHLEGELMILCH (1976), BRAGA (1983), COMAS RENGIFO (1983), MARTINEZ (1986), GOY & MARTINEZ (1990), MARTINEZ (1992), BERNAD (1993).

(\*) Museo Geominero, ITGE, Ríos Rosas 23, 28003 Madrid  
(\*\*) Dpto. Paleontología, Facultad de Ciencias Geológicas, Instituto de Geología Económica (CSIC-UCM), 28040 Madrid.

En la mayoría de los casos la posición estratigráfica indicada en las revisiones anteriores es incierta o dudosa, está en desuso o ha sido

posible determinarla con más detalle. Por otra parte, existen algunos ejemplares en los que no consta la procedencia geográfica lo que evidentemente, no ha podido recuperarse.

En la relación de taxones expuesta a continuación, se especifica, siempre que ha sido posible, los siguientes conceptos: posición estratigráfica del taxón, sigla, procedencia, tipo de conservación que presenta, fecha, forma y fuente de ingreso, así como las determinaciones taxonómicas de que han sido objeto. El listado se ha ordenado de acuerdo a criterios taxonómicos, intentando mantener a la vez un orden cronológico.

Para los ejemplares correspondientes a las Cordilleras Béticas se ha utilizado la división en pisos Domeriense y Carixiense en lugar de Pliensbachiense, pues para esta zona es la más usada en la bibliografía.

La fecha de entrada de los ejemplares es difícil de determinar en la mayoría de los casos, si bien se puede saber por las etiquetas que algunos conservan dicha fecha, siendo la más antigua conocida la del ejemplar 770J que fue recolectado por Adan de Yarza en 1870; las últimas entradas conocidas con exactitud son del año 1958, a cargo de J. de la Revilla, con motivo de la realización de la Hoja Geológica nº 462 (Maranchón).

Es importante indicar la presencia de 2 topotipos y de 16 ejemplares figurados en trabajos anteriores.

**Orden LYTOCERATINA HYATT, 1889**  
***Lytoceras* sp.**

Posición estratigráfica: Lías.

582J Jabaloyas (Teruel). Núcleo piritoso. Antigua clasificación: *Ectocentrites petersi* (HAUER). Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1940.

888J Ricla (Zaragoza). Núcleo piritoso. Antigua clasificación: *Lytoceras fuggeri* GEYER.

1153J Villadiago (Burgos). Núcleo piritoso. Antigua clasificación: *Racophyllites* sp.

**Orden PHYLLOCERATINA ARKELL, 1950**  
**Superfamilia PHYLLOCERATACEAE ZITTEL, 1884**  
**Familia PHYLLOCERATIDAE ZITTEL, 1884**  
***Phylloceras (Phylloceras) heterophyllum***  
**(SOWERBY, 1820)**

Posición estratigráfica: Toarciense inferior.

1670J Baena (Córdoba). Fragmento de fragmocono. Antigua clasificación: *Phylloceras heterophyllum* SOWERBY.

***Calliphylloceras calypso* (D'ORBIGNY, 1841)**

Posición estratigráfica: Toarciense inferior.

1154J El Manzanil, Loja (Granada). Fragmocono y posible cámara de habitación. Antigua clasificación: *Calliphylloceras calypso* (D'ORBIGNY).

**Orden AMMONITINA HYATT, 1889**  
**Superfamilia PSILOCERATACEAE HYATT, 1867**  
**Familia ECHIOCERATIDAE BUCKMAN, 1913**  
***Gagaticeras gagateum* (YOUNG & BIRD, 1828)**

Posición estratigráfica: Sinemuriense superior.

535J Vélez Rubio (Almería). Molde interno. Antigua clasificación: *Promicroceras planicosta* (SOWERBY). Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1940. (L. 1, fig. 5).

***Paltechioceras tardecrescens* VON HAUER, 1856**

Posición estratigráfica: Sinemuriense. Zona Raricostatum.

533J Alceda (Cantabria). Molde interno. Antigua clasificación: *Metophioceras aff. conybeari* (SOWERBY). Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1940. (L. 1, fig. 4).

***Paltechioceras aplanatum* HYATT, 1889**

Posición estratigráfica: Sinemuriense. Zona Raricostatum.

***Lyparoceras* sp.**

Posición estratigráfica: Domeriense.

976J Portadoig de Lapsanes (Tarragona). Molde interno. Antigua clasificación: *Ammonites raquinianus* D'ORBIGNY. Fecha, forma y fuente de ingreso: 1900.

**Familia AMALTHEIDAE HYATT, 1867**  
***Amaltheus margaritatus* DE MONFORT, 1808**

Posición estratigráfica: Pliensbachiense. Zona Margaritatus.

536J Barcenilla (Cantabria). Fragmento de fragmocono y fragmento de cámara de habitación. Antigua clasificación: *Amaltheus margaritatus* (MONTFORT). Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1940.

1166J Maranchón (Guadalajara). Fragmento de cámara de habitación. Antigua clasificación: *Amaltheus margaritatus* (MONTFORT). Fecha, forma y fuente de ingreso: 1958 J. de la Revilla. Figurado por Castell y De la Concha 1956; L. XV, fig. 6. (L. 1, fig. 2).

***Pleuroceras spinatum* (BRUGUIERE, 1789)**

Posición estratigráfica: Pliensbachiense. Zona Spinatum.

538J Aguilar de Campoó (Palencia). Molde interno. Antigua clasificación: *Pleuroceras spinatus* (BRUGUIERE). Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1940.

539J Barahona (Soria). Molde interno. Antigua clasificación: *Pleuroceras spinatus* (BRUGUIERE). Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1940.

1752J Rebolledo de la Torre (Burgos). Molde interno. Antigua clasificación: *Pleuroceras spinatum*.

***Pleuroceras solare* (PHILLIPS, 1829)**

Posición estratigráfica: Pliensbachiense. Zona Spinatum.

2132J Gijón (Asturias). Molde interno. Antigua clasificación: *Vermiceras* sp.

***Paltechioceras cf. aplanatum* HYATT, 1889**

Posición estratigráfica: Sinemuriense. Zona Raricostatum.

770J Montoria? (Alava). Molde interno. Antigua clasificación: Ametitidae gen. indet. Fecha, forma y fuente de ingreso: 1870. Recolección. Adan de Yarza.

***Paltechioceras* sp.**

Posición estratigráfica: Sinemuriense. Zona Raricostatum

537J Gijón (Asturias). Molde interno vuelta externa. Antigua clasificación: *Arietoceras cf. arietiformis* (D'ORBIGNY). Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1940. (L. 1, fig. 9).

2128J Barcenilla (Cantabria). Molde interno. Antigua clasificación: Arietitidae gen. indet.

**Superfamilia EODEROCERATACEAE SPATH, 1929**  
**Familia EODEROCERATIDAE BUCKMAN, 1913**  
**Subfamilia XIPHENOCERATINAE SPATH, 1925**  
***Metaderoceras evolutum* (FUCINI, 1921)**

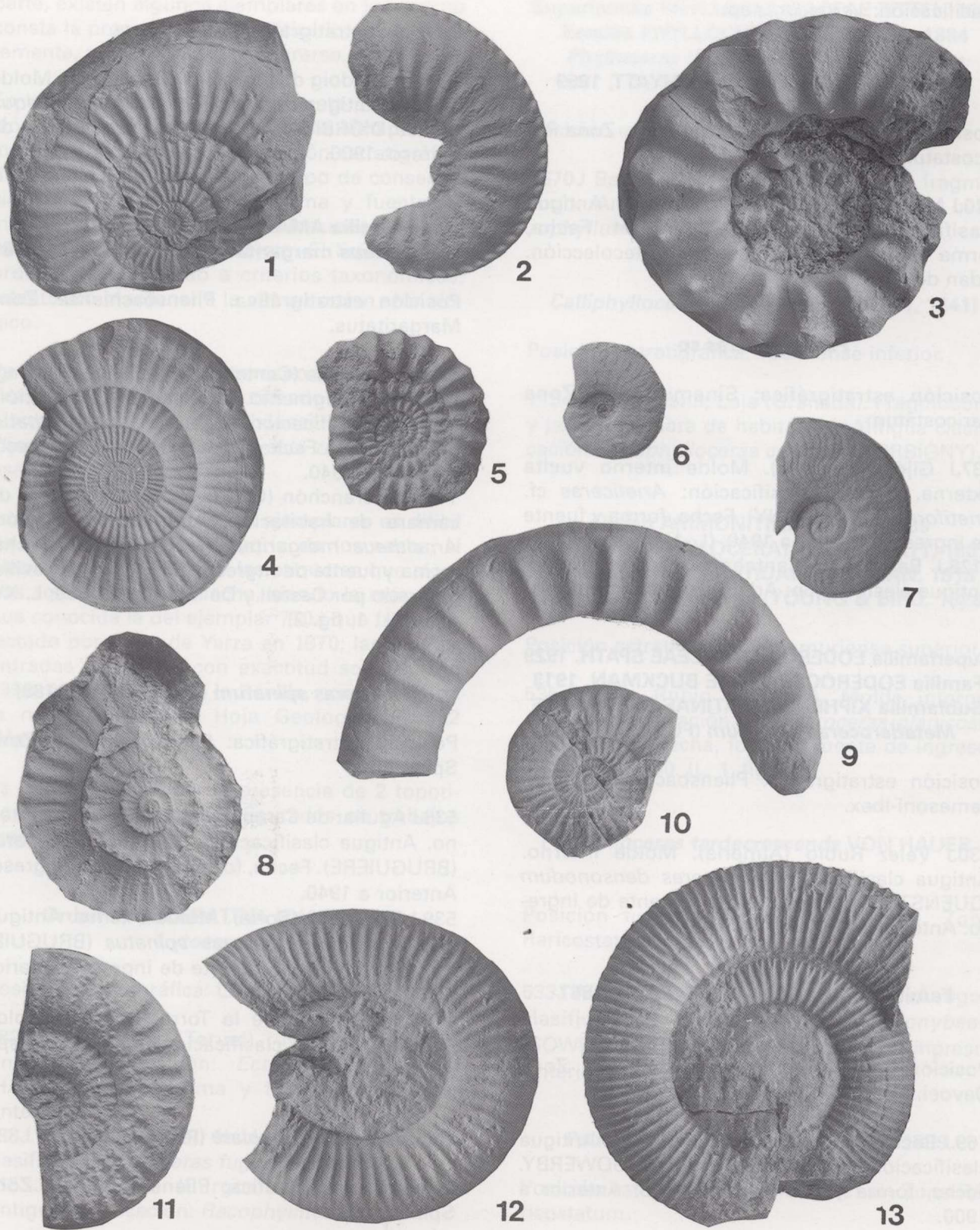
Posición estratigráfica: Pliensbachiense. Zona Jamesoni-lbex.

530J Vélez Rubio (Almería). Molde interno. Antigua clasificación: *Aegoceras densonodum* (QUENSTEDT). Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1940. (L. 1, fig. 8).

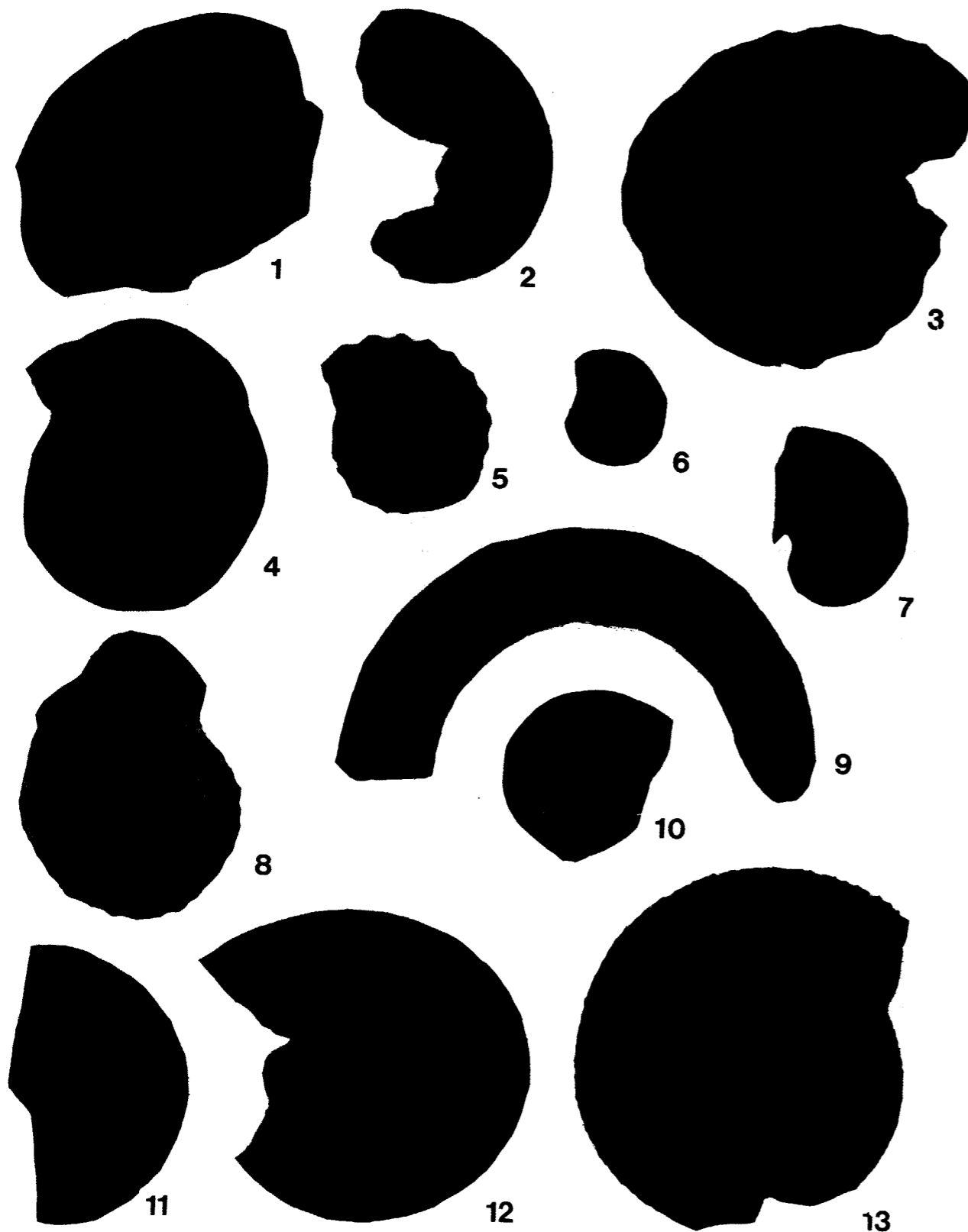
**Familia LIPAROCERATIDAE HYATT, 1867**  
***Aegoceras* sp.**

Posición estratigráfica: Pliensbachiense. Zona Davoei.

769J Becerril (Palencia). Molde interno. Antigua clasificación: *Aegoceras planicosta* SOWERBY. Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1900.



## LAMINA 1



586J Puentetoma (Palencia). Molde interno. Antigua clasificación: *Pleuroceras spinatus* (BRUGUIERE). Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1940.

1161J Puentetoma (Palencia). Molde interno. Antigua clasificación: *Arietites bisulcatus* (BRUGUIERE).

1162J Puentetoma (Palencia). Molde interno. Antigua clasificación: *Arietites bisulcatus* (BRUGUIERE).

***Pleuroceras yeoviliense* (HOWARTH, 1958)**

Posición estratigráfica: Pliensbachense. Zona Hawskerense.

1164J Puentetoma (Palencia). Molde interno. Antigua clasificación: *Eugassiceras sauzeanus* (D'ORBIGNY). (L. 1, fig. 3).

**Familia DACTYLIOCERATIDAE HYATT, 1867**  
***Dactyloceras (Orthodactylites) semicelatum***  
**(SIMPSON, 1843)**

Posición estratigráfica: Toarciense. Zona Tenuicostatum.

578J Procedencia desconocida. Cámara de habitación. Antigua clasificación: *Dactyloceras hollandrei* (D'ORBIGNY). Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1940. (L. 1, fig. 12).

## LAMINA 1

- 1.-2083J. *Canavaria (Tauromeniceras) elisa* (FUCINI). Pegalajar (Jaén).
- 2.-1166J. *Amaltheus margaritatus* DE MONFORT. Maranchón (Guadalajara).
- 3.-1164J. *Pleuroceras yeoviliense* (HOWARTH). Puentetoma (Palencia).
- 4.-533J. *Paltechioceras tardecrescens* VON HAUER. Alceda (Cantabria).
- 5.-535J. *Gagaticeras gagateum* (YOUNG & BIRD). Vélez Rubio (Almería).
- 6.-2093J. *Lioceratoides micitoi* (FUCINI). Pegalajar (Jaén).
- 7.-2084J. *Lioceratoides lorioli* (BETTONI). Pegalajar (Jaén).
- 8.-530J. *Metaderoceras evolutum* (FUCINI). Vélez Rubio (Almería).
- 9.-537J. *Paltechioceras* sp. Gijón (Asturias).
- 10.-2094J. *Arietoceras algovianum* (OPPEL). Pegalajar (Jaén).
- 11.-681J. *Arietoceras bertrandi* (KILIAN). Sierra Elvira (Granada).
- 12.-578J. *Dactyloceras (Orthodactylites) semicelatum* (SIMPSON). Procedencia desconocida.
- 13.-575J. *Nodicoeloceras crassoides* (SIMPSON). Procedencia desconocida.

***Dactyloceras (Orthodactylites) cf. semicelatum***  
**(SIMPSON, 1843)**

Posición estratigráfica: Toarciense. Zona Tenuicostatum.

1374J Monte San Jorge (Lérida). Molde interno. Antigua clasificación: *Ammonites communis* SOWERBY.

1375J Monte San Jorge (Lérida). Molde interno. Antigua clasificación: *Ammonites communis* SOWERBY.

***Dactyloceras (Orthodactylites) sp.***

Posición estratigráfica: Toarciense. Zona Tenuicostatum.

1376J Monte San Jorge (Lérida). Molde interno. Antigua clasificación: *Ammonites communis* SOWERBY.

***Dactyloceras ernsti* LEHMAN, 1968**

Posición estratigráfica: Toarciense. Zona Tenuicostatum.

1373J Monte San Jorge (Lérida). Molde interno. Antigua clasificación: *Ammonites communis* SOWERBY.

***Dactyloceras* sp.**

Posición estratigráfica: Toarciense. Zona Tenuicostatum.

1377J Monte San Jorge (Lérida). Molde interno. Antigua clasificación: *Ammonites communis* SOWERBY.

1378J Monte San Jorge (Lérida). Molde interno. Antigua clasificación: *Ammonites communis* SOWERBY.

1379J Monte San Jorge (Lérida). Molde interno. Antigua clasificación: *Ammonites communis* SOWERBY.

***Nodicoeloceras crassoides* (SIMPSON, 1855)**

Posición estratigráfica: Toarciense.

575J Procedencia desconocida. Fragmacono y fragmento de cámara de habitación. Antigua clasificación: *Dactylioceras annulatus* (SOWERBY). Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1940. (L. 1, fig. 13).

580J Anchuela (Guadalajara). Molde interno. Antigua clasificación: *Catacoeloceras raquinianus* (D'ORBIGNY). Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1940.

***Peronoceras* sp.**

Posición estratigráfica: Toarciense.

783J Procedencia desconocida. Fragmacono y fragmento de cámara de habitación. Antigua clasificación: Eoderoceratidae gen. indet.

***Collina* sp.**

Posición estratigráfica: Toarciense.

1766J Puerto de Palomeras (Cantabria). Molde interno. Antigua clasificación: *Dactylioceras* sp.

***Porpoceras* sp.**

Posición estratigráfica: Toarciense.

2064J punto C414-402. Molde interno. Antigua clasificación: *Peronoceras fibulatum* SOWERBY.

**Superfamilia HILDOCERATACEAE HYATT, 1867**  
**Familia HILDOCERATIDAE HYATT, 1867**  
**Subfamilia ARIETICERATINAE HOWARTH, 1955**  
***Leptaleoceras accuratum* (FUCINI, 1931)**

Posición estratigráfica: Domeriense. Zona Algovianum.

2086J Pegalajar (Jaén). Molde interno. Antigua clasificación: *Arietoceras* sp. Fecha, forma y fuente de ingreso: 1894.

2099J Pegalajar (Jaén). Molde interno. Antigua clasificación: *Arietoceras* sp. Fecha, forma y fuente de ingreso: 1894.

***Leptaleoceras ugdulenai* (GEMMELLARO, 1885)**

Posición estratigráfica: Domeriense. Zona Algovianum.

2090J Pegalajar (Jaén). Fragmacono y fragmento de cámara de habitación. Antigua clasificación: *Arietoceras* sp. Fecha, forma y fuente de ingreso: 1894.

***Leptaleoceras* sp.**

Posición estratigráfica: Domeriense.

1163J Bullas (Alicante). Molde interno. Antigua clasificación: *Arietites nodulosus* (YOUNG & BIRD).

***Canavaria (Tauromeniceras) elisa* (FUCINI, 1931)**

Posición estratigráfica: Domeriense. Zona Emaciatum.

2083J Pegalajar (Jaén). Fragmacono y fragmento de cámara de habitación. Antigua clasificación: *Emaciatoceras* sp. Fecha, forma y fuente de ingreso: 1894. (L. 1, fig. 1).

***Arietoceras bertrandi* (KILIAN, 1889)**

Posición estratigráfica: Domeriense. Zona Algovianum.

***Emaciatoceras* sp.**

Posición estratigráfica: Domeriense.

985J Calomarde (Teruel). Molde interno. Antigua clasificación: *Ammonites bisulcatus* (BRUGUIERE). Fecha, forma y fuente de ingreso: anterior a 1900.

2097J Pegalajar (Jaén). Molde interno. Antigua clasificación: *Emaciatoceras* sp. Fecha, forma y fuente de ingreso: 1894.

2098J Pegalajar (Jaén). Molde interno. Antigua clasificación: *Emaciatoceras* sp. Fecha, forma y fuente de ingreso: 1894.

***Fontanelliceras fontanellense* (GEMMELLARO, 1885)**

Posición estratigráfica: Domeriense.

2095J Pegalajar (Jaén). Molde interno. Antigua clasificación: *Emaciatoceras* sp. Fecha, forma y fuente de ingreso: 1894.

***Fontanelliceras* sp.**

Posición estratigráfica: Domeriense.

2096J Pegalajar (Jaén). Molde interno. Antigua clasificación: *Arietoceras* sp. Fecha, forma y fuente de ingreso: 1894.

**Subfamilia HARPOCERATINAE NEUMAYR, 1875**  
***Protogrammoceras cf. celebratum* (FUCINI, 1900)**

Posición estratigráfica: Domeriense. Zona Margaritatus.

2737J Maranchón (Guadalajara). Fragmento de fragmacono. Antigua clasificación: *Harpoceras serpentinum* SCHLOTHEIM. Fecha, forma y fuente de ingreso: 1959 Recolección. J. de la Revilla.

***Harpoceras serpentinum* (SCHLOTHEIM), 1813**

Posición estratigráfica: Toarciense. Zona Serpentinus.

681J Sierra Elvira (Granada). Molde interno. Antigua clasificación: *Hildoceras bertrandi* (KILIAN). Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1940. Topotipo. (L. 1, fig. 11).

741J Sierra Elvira (Granada). Molde interno. Antigua clasificación: *Hildoceras bertrandi* (KILIAN). Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1940. Topotipo.

***Arietoceras algovianum* (OPPEL, 1862)**

Posición estratigráfica: Domeriense. Zona Algovianum.

583J Obón (Teruel). Molde interno. Antigua clasificación: *Amaltheus doris* (REYNES). Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1940.

2087J Pegalajar (Jaén). Fragmacono y fragmento de cámara de habitación. Antigua clasificación: *Emaciatoceras* sp. Fecha, forma y fuente de ingreso: 1894.

2088J Pegalajar (Jaén). Fragmacono y fragmento de cámara de habitación. Antigua clasificación: *Emaciatoceras* sp. Fecha, forma y fuente de ingreso: 1894.

2092J Pegalajar (Jaén). Fragmacono y fragmento de cámara de habitación. Antigua clasificación: *Arietoceras* sp. Fecha, forma y fuente de ingreso: 1894.

2094J Pegalajar (Jaén). Molde interno. Antigua clasificación: *Arietoceras* sp. Fecha, forma y fuente de ingreso: 1894. (L. 1, fig. 10).

***Arietoceras* sp.**

Posición estratigráfica: Domeriense.

2131J Gijón (Asturias). Molde interno. Antigua clasificación: Arietitidae gen. indet.

***Emaciatoceras imitator* FUCINI, 1931**

Posición estratigráfica: Domeriense. Zona Emaciatum.

2100J Pegalajar (Jaén). Molde externo. Antigua clasificación: *Protogrammoceras* sp. Fecha, forma y fuente de ingreso: 1894.

45J Las Lomillas (Entre Josa y Obón, Teruel). Fragmacono y fragmento de cámara de habitación. Antigua clasificación: *Harpoceras serpentinum* (SCHLOTHEIM). Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1940. (L. 2, fig. 3).

***Harpoceras falcifer* (SOWERBY, 1820)**

Posición estratigráfica: Toarciense. Zona Serpentinus.

572J San Jorge, Camarasa (Lérida). Molde interno. Antigua clasificación: *Arietoceras algovianum* (D'ORBIGNY). Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1940.

1167J Villadiego (Burgos). Fragmento de fragmacono. Antigua clasificación: *Haugiella* sp.

1767J Morata de Jalva (Zaragoza). Fragmento de fragmacono. Antigua clasificación: "*Ammonites*" *complanatus* D'ORBIGNY.

***Harpoceras pseudoserpentinus* GABILLY, 1976**

Posición estratigráfica: Toarciense. Zona Serpentinus.

794J Morata de Jalva (Zaragoza). Antigua clasificación: "*Ammonites*" *complanatus* D'ORBIGNY.

***Harpoceras* sp.**

Posición estratigráfica: Toarciense.

1624J Las Majadas (Cuenca). Fragmacono y cámara de habitación casi completa. Antigua clasificación: *Harpoceratidae* gen. indet. Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1900.

2736J Maranchón (Guadalajara). Antigua clasificación: *Harpoceras pectinatus* (MENEHINI). Fecha, forma y fuente de ingreso: Septiembre 1958. Recolección. J. de la Revilla. Figurado por Castell y De la Concha 1956; L. XVI, fig. 3.

***Polyplectus discoides* (ZIETEN, 1830)**

Posición estratigráfica: Toarciense.

566J Ricla (Zaragoza). Fragmacono y fragmento de cámara de habitación. Antigua clasificación: *Polyplectus discoides* (ZIETEN). Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1940.

587J Ciruelos (Guadalajara). Fragmento de fragmacono. Antigua clasificación: *Polyplectus discoides* (ZIETEN). Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1940. (L. 2, fig. 2)

761J Procedencia desconocida. Fragmento de fragmacono. Antigua clasificación: *Polyplectus discoides* (ZIETEN).

***Protogrammoceras paltum* BUCKMAN, 1922**

Posición estratigráfica: Toarciense.

570J Las Majadas (Cuenca). Fragmento de fragmacono. Antigua clasificación: *Arietoceras algovianum* (D'ORBIGNY). Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1940.

***Protogrammoceras* cf. *veliferum* (GEMMELLARO, 1885)**

Posición estratigráfica: Domeriense superior. Zona Emaciatum.

2089J Pegalajar (Jaén). Molde externo. Antigua clasificación: *Lioceratoides* sp. Fecha, forma y fuente de ingreso: 1894

***Protogrammoceras* sp.**

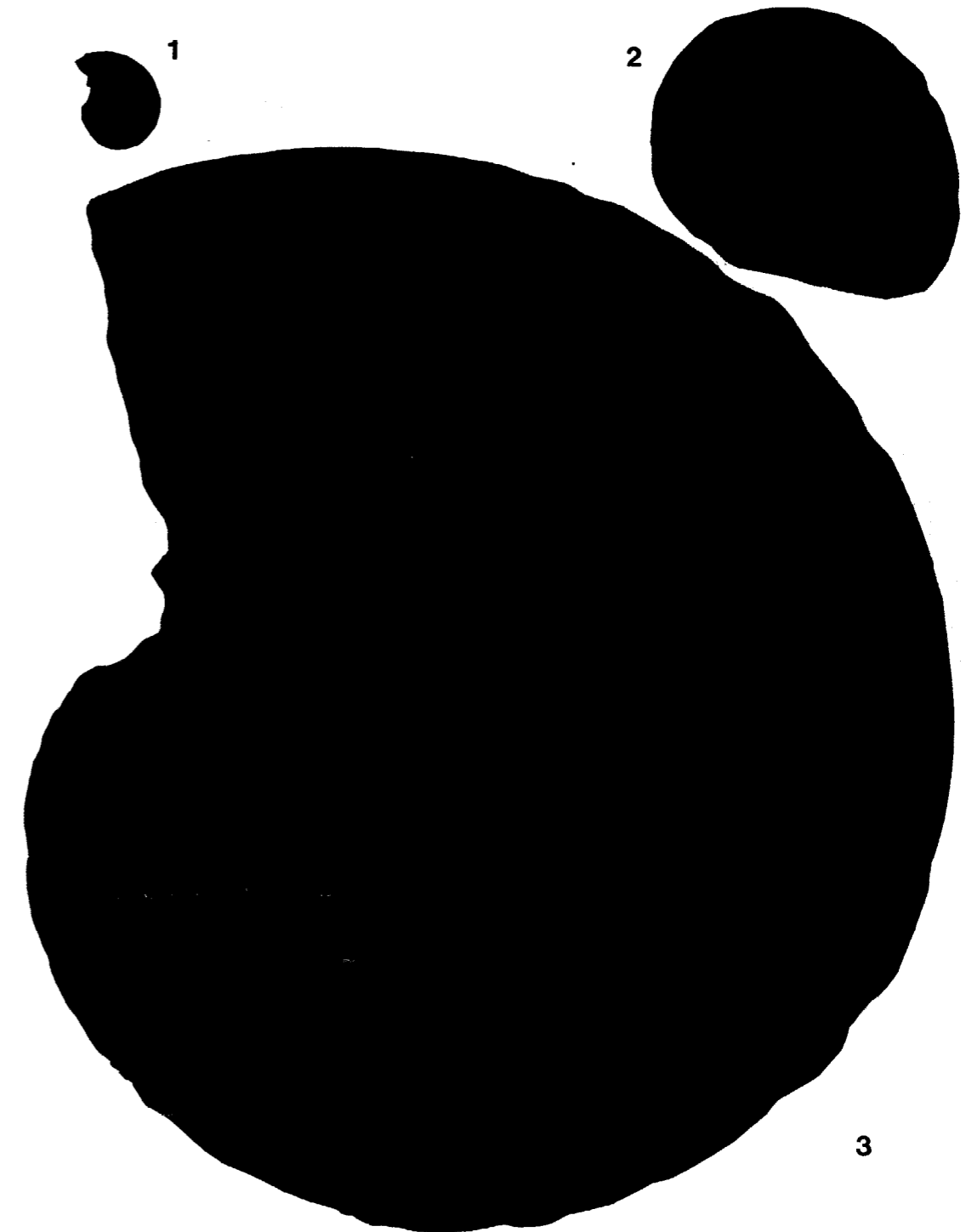
Posición estratigráfica: Toarciense. Zona Tenuicostatum.

793J Maranchón (Guadalajara). Fragmento de fragmacono. Antigua clasificación: *Harpoceras serpentinum* SCHLOTHEIM. Fecha, forma y fuente de ingreso: 1959 Recolección. J. de la Revilla.

***Maconiceras* cf. *soloniaciense* (LISSAJOUS, 1906)**

Posición estratigráfica: Domeriense?.

2745J Maranchón (Guadalajara). Fragmacono y



1 992J. *Osperlioceras* sp. Maranchón (Guadalajara).

2 587J. *Polyplectus discoides* (ZIETEN). Ciruelos (Guadalajara)

3 45J. *Harpoceras serpentinum* (SCHLOTHEIM). Las Lomillas, entre Josa y Obón (Teruel).



LAMINA 2



1.-992J. *Osperlioceras* sp. Maranchón (Guadalajara).

2.-587J. *Polyplectus discoides* (ZIETEN). Ciruelos (Guadalajara)

3.-45J. *Harpoceras serpentinum* (SCHLOTHEIM). Las Lomillas, entre Josa y Obón (Teruel).

fragmento de cámara de habitación. Antigua clasificación: *Praeleioceras* aff. *diodoroi* (FUCINI). Fecha, forma y fuente de ingreso: Septiembre de 1958. Recolección. J. de la Revilla.

***Osperlioceras bicarenatum* (ZIETEN, 1830)**

Posición estratigráfica: Toarciense.

1771J Río Pedroso, Valdepez (Burgos). Fragmento de fragmocono. Antigua clasificación: "*Ammonites*" *planicosta* SOWERBY.

***Osperlioceras* sp.**

Posición estratigráfica: Toarciense.

568J Calanda (Teruel). Fragmento de fragmocono. Antigua clasificación: *Polyplectus discoides* (ZIETEN). Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1940.

992J Maranchón (Guadalajara). Núcleo piritoso. Antigua clasificación: *Pleydellia* sp. Fecha, forma y fuente de ingreso: Septiembre de 1958. Recolección. J. de la Revilla. (L. 2, fig. 1)

993J Maranchón (Guadalajara). Núcleo piritoso. Antigua clasificación: *Pleydellia* sp. Fecha, forma y fuente de ingreso: Septiembre de 1958. Recolección. J. de la Revilla.

***Lioceratoides serotinus* (BETTONI, 1900)**

Posición estratigráfica: Domeriense superior. Zona Emaciatum.

2085J Pegalajar (Jaén). Fragmento de cámara de habitación. Antigua clasificación: *Protogrammoceras* sp. Fecha, forma y fuente de ingreso: 1894

***Lioceratoides lorioli* (BETTONI, 1900)**

Posición estratigráfica: Domeriense superior. Zona Emaciatum.

2084J Pegalajar (Jaén). Fragmento de fragmocono. Antigua clasificación: *Lioceratoides* sp. Fecha, forma y fuente de ingreso: 1894 (L. 1, fig. 7).

***Lioceratoides micitoi* (FUCINI, 1931)**

Posición estratigráfica: Domeriense superior. Zona Emaciatum.

2091J Pegalajar (Jaén). Molde externo. Antigua clasificación: *Lioceratoides* sp. Fecha, forma y fuente de ingreso: 1894

2093J Pegalajar (Jaén). Fragmento de cámara de habitación. Antigua clasificación: *Lioceratoides* sp. Fecha, forma y fuente de ingreso: 1894. (L. 1, fig. 6).

**Subfamilia HILDOCERATINAE HYATT, 1867**

***Hildaite* sp.**

Posición estratigráfica: Toarciense. Zona Serpentinus.

865J Calomarde (Teruel). Molde interno de vuelta externa. Antigua clasificación: *Ammonites bisulcatus* (BRUGUIÈRE). Fecha, forma y fuente de ingreso: anterior a 1900.

***Hildoceras sublevisoni* FUCINI, 1919**

Posición estratigráfica: Toarciense. Zona Bifrons.

95J Albarracín (Teruel). Fragmento de cámara de habitación. Antigua clasificación: *Arietites bisulcatus* (BRUGUIÈRE). Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1900.

531J Obón (Teruel). Fragmento de cámara de habitación. Antigua clasificación: *Arietites bisulcatus* (BRUGUIÈRE). Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1940.

553J Noviercas (Soria). Fragmento de fragmocono. Antigua clasificación: *Hildoceras bifrons* (BRUGUIÈRE). Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1940.

795J El Villar (Teruel). Fragmento de fragmocono. Antigua clasificación: *Hildoceras bifrons* (BRUGUIÈRE). Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1900.

1440J Becerrilejos (Palencia). Fragmento de fragmocono. Antigua clasificación: *Renziceras nausikae* (RENTZ).

1616J Albarracín (Teruel). Molde interno. *Ammonites bifrons* BRONGNIART. Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1900.

1629J Guadalaviar (Teruel). Fragmento de cámara de habitación. *Hildoceras bifrons* BRUGUIÈRE. Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1900.

1632J El Villar (Teruel). Fragmento de fragmocono. Antigua clasificación: *Hildoceras bifrons* (BRUGUIÈRE). Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1900.

1720J Sierra del Madero (Soria). Fragmento de cámara de habitación. Antigua clasificación: "*Ammonites*" *bifrons* (BRUGUIÈRE). Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1900.

***Hildoceras bifrons* (BRUGUIÈRE, 1792)**

Posición estratigráfica: Toarciense. Zona Bifrons.

552J Arlanzón (Burgos). Fragmento de cámara de habitación. Antigua clasificación: *Hildoceras bifrons* (BRUGUIÈRE). Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1940.

555J Obón (Teruel). Fragmento de fragmocono. Antigua clasificación: *Hildoceras bifrons* (BRUGUIÈRE). Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1940.

556J Ricla (Zaragoza). Fragmento de fragmocono. Antigua clasificación: *Hildoceras bifrons* (BRUGUIÈRE). Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1940.

559J Barahona (Soria). Fragmento de fragmocono. Antigua clasificación: *Hildoceras bifrons* (BRUGUIÈRE). Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1940.

798J Hortiguera (Burgos). Núcleo. Antigua clasificación: *Harpoceras bifrons* BRUGUIÈRE. Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1900.

1436J Becerrilejos (Palencia). Núcleos. Antigua clasificación: *Renziceras nausikae* (RENTZ).

1700J Guadalaviar (Teruel). Fragmento de fragmocono. Antigua clasificación: "*Ammonites*" *bifrons* BRUGUIÈRE.

1712J Hortiguera (Burgos). Núcleo. Antigua clasificación: *Harpoceras bifrons* BRUGUIÈRE. Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1900.

***Hildoceras bifrons angustisiphonatum* PRINZ, 1904**

Posición estratigráfica: Toarciense. Zona Bifrons.

554J Anchuela (Guadalajara). Fragmento de cámara de habitación. Antigua clasificación: *Hildoceras bifrons* (BRUGUIÈRE). Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1940. (L. 3, fig. 1).

***Hildoceras lusitanicum* MEISTER, 1913**

Posición estratigráfica: Toarciense. Zona Bifrons.

557J Becerrilejos (Palencia). Fragmento de cámara de habitación. Antigua clasificación: *Hildoceras bifrons* (BRUGUIÈRE). Anterior a 1940.

561J Frías (Teruel). Núcleo. Antigua clasificación: *Hildoceras bifrons* (BRUGUIÈRE). Anterior a 1940.

796J Baena (Córdoba). Fragmento de fragmocono. Antigua clasificación: *Hildoceras bifrons* (BRUGUIÈRE).

797J Baena (Córdoba). Fragmento de fragmocono. Antigua clasificación: *Hildoceras bifrons* (BRUGUIÈRE).

866J Albarracín (Teruel). Fragmento de cámara de habitación. Antigua clasificación: *Ammonites bifrons* BRUGUIÈRE. Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1900.

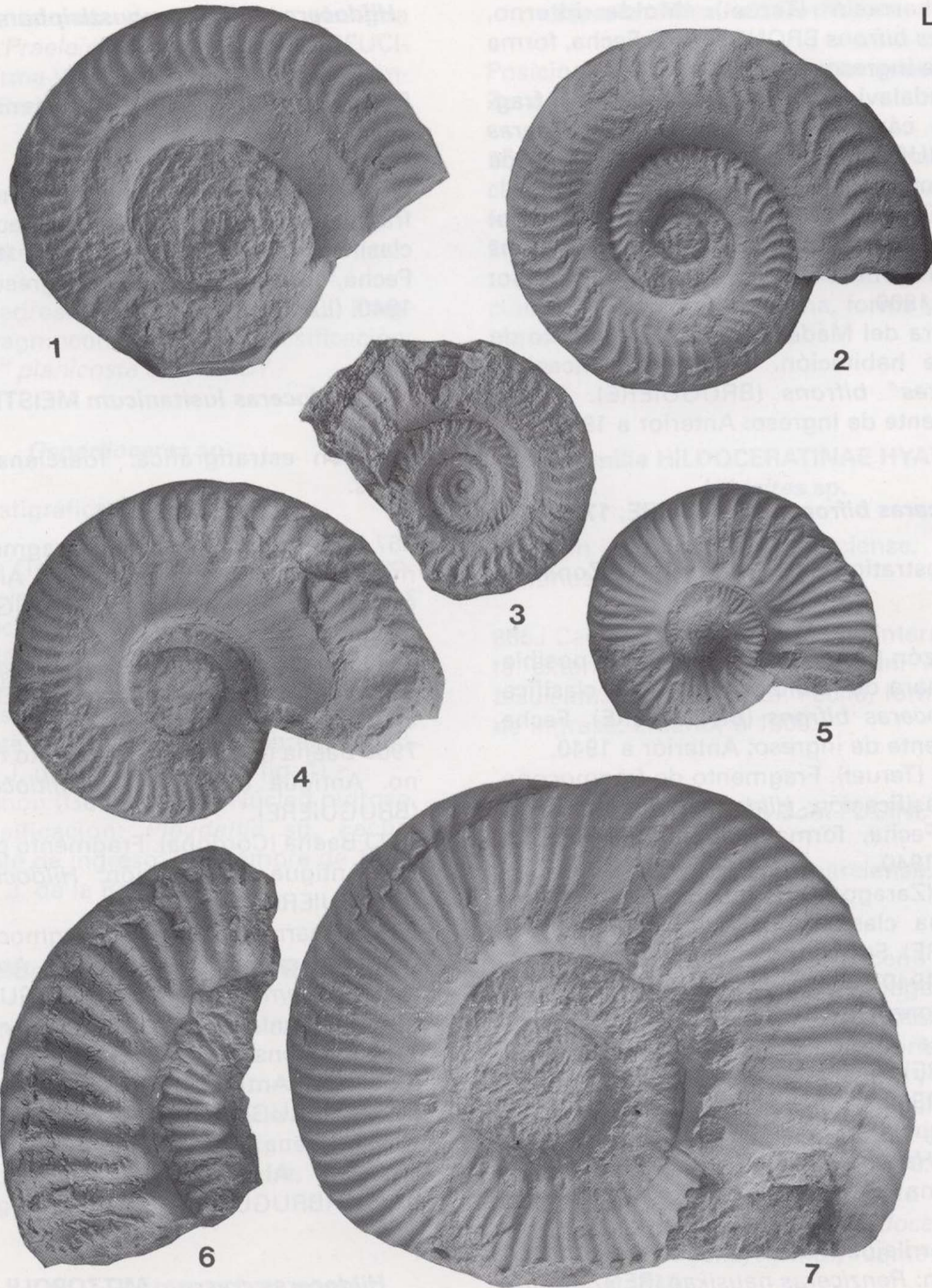
1168J Pollensa (Mallorca). Fragmento de fragmocono. Antigua clasificación: *Hildoceras bifrons* (BRUGUIÈRE). (L. 3, fig. 3).

1656J Baena (Córdoba). Fragmento de fragmocono. Antigua clasificación: *Hildoceras bifrons* (BRUGUIÈRE).

***Hildoceras crassum* MITZOPOULOS, 1930**

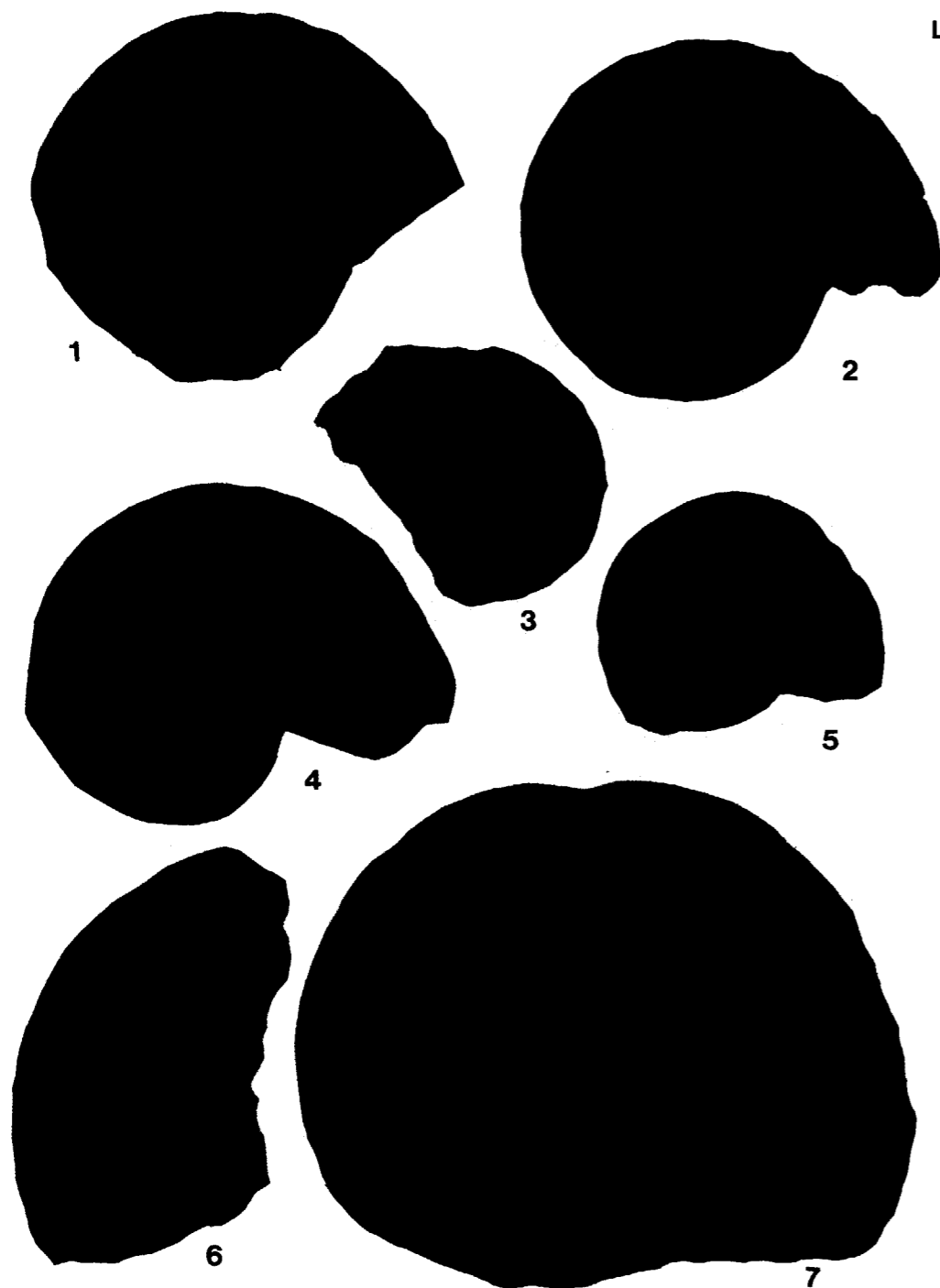
Posición estratigráfica: Toarciense. Zona Bifrons.

558J Albarracín (Teruel). Fragmento de fragmocono. Antigua clasificación: *Hildoceras bifrons* (BRUGUIÈRE). (L. 3, fig. 2).



- 1.-554J. *Hildoceras bifrons angustisiphonathum* PRINZ. Anchuela (Guadalajara).  
 2.-558J. *Hildoceras crassum* MITZOPOULOS. Albarracín (Teruel).  
 3.-1168J. *Hildoceras lusitanicum* MEISTER. Pollensa (Mallorca).  
 4.-1176J. *Haugiella?* sp.. Villar del Cobo (Guadalajara).  
 5.-565J. *Haugia (Haugia) variabilis* (D'ORBIGNY). Becerrilejos (Palencia).  
 6.-581J. *Phymatoceras narbonense* (BUCKMAN). Albarracín (Teruel).  
 7.-574J. *Haugia (Haugia) variabilis* (D'ORBIGNY). Anchuela del Campo (Guadalajara).

## LAMINA 3



- 1.-554J. *Hildoceras bifrons angustisiphonathum* PRINZ. Anchuela (Guadalajara).
- 2.-558J. *Hildoceras crassum* MITZOPOULOS. Albarracín (Teruel).
- 3.-1168J. *Hildoceras lusitanicum* MEISTER. Pollensa (Mallorca).
- 4.-1176J. *Haugiella?* sp.. Villar del Cobo (Guadalajara).
- 5.-565J. *Haugia (Haugia) variabilis* (D'ORBIGNY). Becerrilejos (Palencia).
- 6.-581J. *Phymatoceras narbonense* (BUCKMAN). Albarracín (Teruel).
- 7.-574J. *Haugia (Haugia) variabilis* (D'ORBIGNY). Anchuela del Campo (Guadalajara).

***Hildoceras tethysi* GECZY 1967**

Posición estratigráfica: Toarciense. Zona Bifrons.

749J Anchuela (Guadalajara). Fragmento de fragmocono y fragmento de cámara de habitación. Antigua clasificación: *Hildoceras bifrons* (BRUGUIERE). Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1940.

***Hildoceras* sp.**

Posición estratigráfica: Toarciense. Zona Bifrons.

551J Torremocha (Guadalajara). Fragmocono y fragmento de cámara de habitación. Antigua clasificación: *Hildoceras bifrons* (BRUGUIERE). Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1940.

560J Camarasa (Lérida). Fragmocono y fragmento de cámara de habitación. Antigua clasificación: *Hildoceras bifrons* (BRUGUIERE). Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1940.

924J Frías (Teruel). Fragmocono y fragmento de cámara de habitación. Antigua clasificación: *Hildoceras bifrons?* (BRUGUIERE). Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1940.

975J Huesca. Fragmocono y fragmento de cámara de habitación. Antigua clasificación: *Ammonites bifrons* D'ORBIGNY.

1439J Becerrilejos (Palencia). Núcleos piritosos. (18). Antigua clasificación: *Renziceras nausikae* (RENZ).

1717J Baena (Córdoba). Molde interno. Antigua clasificación: *Hildoceras bifrons* (BRUGUIERE).

***Pseudomercaticeras latum* MERLA, 1933**

Posición estratigráfica: Toarciense.

585J Montalbán (Teruel). Fragmocono y fragmento de Cámara de habitación. Antigua clasificación: *Phymatoceras* cf. *binodata*. Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1940.

***Pseudomercaticeras frantzi* (REYNES, 1868)**

Posición estratigráfica: Toarciense

576J Torremocha (Guadalajara). Fragmocono y fragmento de Cámara de habitación. Antigua

clasificación: *Grammoceras striatulus* (SOWERBY). Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1940. (L. 4, fig. 2).

***Pseudomercaticeras* cf. *frantzi* (REYNES, 1868)**

Posición estratigráfica: Toarciense

2726J Maranchón (Guadalajara). Molde interno. Antigua clasificación: *Bassaniceras bassani* (FUCINI). Fecha, forma y fuente de ingreso: Septiembre de 1958. Recolección. J. de la Revilla. Figurado por Castell y De la Concha 1956; L. XVII, fig. 7.

***Pseudomercaticeras* sp.**

Posición estratigráfica: Toarciense

918J Maranchón (Guadalajara). Molde interno vuelta externa. Antigua clasificación: *Arietites* sp. Fecha, forma y fuente de ingreso: Septiembre de 1958, Recolección, J. de la Revilla. Figurado por Castell y De la Concha 1956; L. XV, fig. 3.

986J Maranchón (Guadalajara). Núcleo. Antigua clasificación: *Dumortieria haugi* (GEYER). Fecha, forma y fuente de ingreso: Septiembre de 1958. Recolección. J. de la Revilla. Figurado Castell y De la Concha; L. XVII, fig. 5.

2724J Maranchón (Guadalajara). Molde interno vuelta externa. Fecha, forma y fuente de ingreso: Septiembre de 1958. Recolección. J. de la Revilla. Figurado por Castell y De la Concha; L. XVI, fig. 2.

2725J Maranchón (Guadalajara). Fragmento de fragmocono. Antigua clasificación: *Arietoceras perspiratum* (FUCINI). Fecha, forma y fuente de ingreso: Septiembre de 1958. Recolección. J. de la Revilla. Figurado por Castell y De la Concha; L. XVI, fig. 2.

**Subfamilia PHYMATOCERATINAE HYATT, 1867**  
***Brodieia* ? sp.**

Posición estratigráfica: Toarciense.

2740J Maranchón (Guadalajara). Molde interno. Antigua clasificación: *Hildoceratoide* cf. *bicicola* (BONARELLI). Fecha, forma y fuente de ingreso: Septiembre de 1958. Recolección. J. de la Revilla. Figurado por Castell y De la Concha 1956; L. XVI, fig. 1.

***Pseudobrodieia primaria* (SCHIRARDIN, 1914)**

Posición estratigráfica: Toarciense. Zona Variabilis.

534J Torremocha (Guadalajara). Molde interno. Antigua clasificación: *Ammonites insignes* SCHLOTHEIM. Fecha, forma y fuente de ingreso: 1900.

***Pseudobrodieia* sp.**

Posición estratigráfica: Toarciense.

791J Barcenilla (Cantabria). Núcleo piritoso. Antigua clasificación: *Haugia variabilis* (D'ORBIGNY).

792J Barcenilla (Cantabria). Núcleo piritoso. Antigua clasificación: *Haugia variabilis* (D'ORBIGNY).

***Haugia (Haugia) variabilis* (D'ORBIGNY, 1844)**

Posición estratigráfica: Toarciense. Zona Variabilis.

565J Becerrilejos (Palencia). Fragmacono y fragmento de cámara de habitación de un ejemplar juvenil. Antigua clasificación: *Haugia ogerieni* (DUMORTIER). Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1940. (L. 3, fig. 5).

574J Anchueta del Campo (Guadalajara). Fragmacono y fragmento de cámara de habitación. Antigua clasificación: *Hammatoceras insigne* (ZIETEN). (L. 3, fig. 7).

***Phymatoceras narbonense* (BUCKMAN, 1898)**

Posición estratigráfica: Toarciense. Zona Bifrons.

581J Albarracín (Teruel). Fragmento de fragmacono. Antigua clasificación: *Lillia malagma* (DUMORTIER). Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1940. (L. 3, fig. 6).

923J Maranchón (Guadalajara). Fragmento de fragmacono. Antigua clasificación: *Haugia variabilis* D'ORBIGNY. 1959. Recolección. J. de la Revilla.

***Phymatoceras* sp.**

Posición estratigráfica: Toarciense.

740J Torremocha (Guadalajara). Fragmento de fragmacono y fragmento de cámara de habitación. Antigua clasificación: *Grammoceras striatulus* SOWERBY. Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1940.

919J Ricla (Zaragoza). Fragmento de fragmacono y fragmento de cámara de habitación. Antigua clasificación: *Dumortieria radians* SCHLOTHEIM. Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1940.

1171J Becerrilejos (Palencia). Núcleo piritoso. Antigua clasificación: *Renziceras nausikae* (RENZ).

***Haugiella* sp.**

Posición estratigráfica: Toarciense.

983J Cardó (Tarragona). Fragmento de fragmacono. Antigua clasificación: *Ammonites variabilis* D'ORBIGNY. Fecha, forma y fuente de ingreso: 1900.

***Haugiella?* sp.**

Posición estratigráfica: Toarciense.

1176J Villar del Cobo (Teruel). Fragmacono y fragmento de cámara de habitación. Antigua clasificación: *Haugia variabilis* (D'ORBIGNY). (L. 3, fig. 4).

***Denckmannia* sp.**

Posición estratigráfica: Toarciense.

1438J Becerrilejos (Palencia). Molde interno. Antigua clasificación: *Renziceras nausikae* (RENZ).

**Subfamilia GRAMMOCERATINAE, 1905  
*Pseudogrammoceras differens* ERNST, 1923**

Posición estratigráfica: Toarciense. Zona Thoursense.

548J Ricla (Zaragoza). Fragmento de fragmacono. Antigua clasificación: *Dumortieria radians* (SCHLOTHEIM). Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1940.

878J Calomarde (Teruel). Fragmacono y fragmento de cámara de habitación?. Antigua clasificación: *Ammonites primordialis* SCHLOTHEIM. Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1900.  
1174J Hondón de los Frailes (Alicante). Molde interno. Antigua clasificación: *Dumortieria radians* (SCHLOTHEIM).

***Pseudogrammoceras bingmanni* (DENCKMANN, 1887)**

Posición estratigráfica: Toarciense. Zona Thoursense.

747J Josa (Teruel). Fragmacono y fragmento de cámara de habitación. Antigua clasificación: *Grammoceras striatulus* SOWERBY. Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1940.

***Pseudogrammoceras fallaciosum* (BAYLE, 1878)**

Posición estratigráfica: Toarciense. Zona Insigne.

870J Obón (Teruel). Fragmacono y posible cámara de habitación. Antigua clasificación: Hildoceratidae gen. indet. Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1900.

1681J Ciruelos (Guadalajara). Molde interno. Antigua clasificación: "*Ammonites*" *radians* SCHLOTHEIM. Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1900.

***Pseudogrammoceras* gr. *fallaciosum* (BAYLE, 1878)**

Posición estratigráfica: Toarciense. Zona Insigne.

1437J Becerrilejos (Palencia). Núcleo. Antigua clasificación: *Renziceras nausikae* (RENZ).

***Pseudogrammoceras struckmanni* (DENCKMANN, 1887)**

Posición estratigráfica: Toarciense.

1172J Alcañiz (Teruel). Fragmento de Cámara de habitación. Antigua clasificación: *Grammoceras striatulus* (SOWERBY).

***Pseudogrammoceras muelleri* (DENCKMANN, 1887)**

Posición estratigráfica: Toarciense.

571J Teruel. Fragmento de fragmacono. Antigua clasificación: *Arietoceras algovianum* (D'ORBIGNY). Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1940.

***Pseudogrammoceras* sp.**

Posición estratigráfica: Toarciense.

550J Ricla (Zaragoza). Molde interno. Antigua clasificación: *Dumortieria levesquei* (D'ORBIGNY). Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1900.

978J Traid (Guadalajara). Molde interno de vuelta externa. Antigua clasificación: *Ammonites radians* SCHLOTHEIM. Fecha, forma y fuente de ingreso: 1900 Donación Sr. Reguera.

1441J Becerrilejos (Palencia). Núcleo piritoso. Antigua clasificación: *Renziceras nausikae* (RENZ).

2731J Maranchón (Guadalajara). Fragmento de cámara de habitación. Antigua clasificación: *Arietoceras algovianum* (D'ORBIGNY). Septiembre de 1958, Recolección. J. de la Revilla. Figurado Castell y De la Concha 1956; L. XVI, figs. 6 y 7.

2732J Maranchón (Guadalajara). Fragmacono?. Antigua clasificación: *Protogrammoceras celebratum* (FUCINI). Fecha, forma y fuente de ingreso: Septiembre de 1958. Recolección. J. de la Revilla. Figurado por Castell y De la Concha 1956; L. XVII, fig. 1.

***Podagrosites aratum* (BUCKMAN), 1890**

Posición estratigráfica: Toarciense. Zona Variabilis.

577J Josa (Teruel). Fragmacono y fragmento de

cámara de habitación. Antigua clasificación: *Grammoceras striatulus* (SOWERBY). Anterior a 1940. (L. 4, fig. 1).

***Podagrosites* sp.**

Posición estratigráfica: Toarciense.

564J Barcenilla (Cantabria). Núcleo piritoso. [cf. *P. latescens*]. Antigua clasificación: *Haugia variabilis* (D'ORBIGNY).

987J Maranchón (Guadalajara). Núcleo piritoso. Antigua clasificación: *Dumortieria haugi* (GEYER). Fecha, forma y fuente de ingreso: Septiembre de 1958. Recolección. J. de la Revilla.

2728J Maranchón (Guadalajara). Núcleo. Antigua clasificación: *Dumortieria haugi* (GEYER). Fecha, forma y fuente de ingreso: Septiembre de 1958. Recolección. J. de la Revilla.

2730J Maranchón (Guadalajara). Núcleo. Antigua clasificación: *Emuciatoceras levidorsatum* FUCINI. Fecha, forma y fuente de ingreso: 1958. Recolección. J. de la Revilla.

***Pseudolillia* cf. *murvillensis* MAUBEUGE, 1949**

Posición estratigráfica: Toarciense. Zona Insigne.

567J Anchuela del Campo (Guadalajara). Fragmento de fragmocono y cámara de habitación. Antigua clasificación: *Polyplectus discoides* (ZIETEN). Anterior a 1940.

***Pseudolillia* sp.**

Posición estratigráfica: Toarciense. Zona Insigne.

945J Albarracín (Teruel). Cámara de habitación y fragmento de fragmocono. Antigua clasificación: *Ammonites thouarensis* D'ORBIGNY. Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1945.

954J Camarasa (Lérida). Molde interno. Antigua clasificación: *Ammonites normanianus* D'ORBIGNY. Fecha, forma y fuente de ingreso: 1900.  
1170J Becerrilejos (Palencia). Núcleos.

1173J Casarejos (Soria). Fragmocono y fragmento de cámara de habitación. Antigua clasificación: *Dumortieria radians* (SCHLOTHEIM). (L. 4, fig. 6).

1175J Molina de Aragón (Guadalajara). Fragmento de fragmocono. Antigua clasificación: *Dumortieria radians* (SCHLOTHEIM).

***Gruneria gruneri* (DUMORTIER, 1874)**

Posición estratigráfica: Toarciense. Zona Insigne.

543J Cillamayor (Palencia). Fragmocono y fragmento de cámara de habitación. Antigua clasificación: *Pleydellia aalensis* (ZIETEN). Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1940. (L. 4, fig. 3).

***Dumortieria levesquei* (D'ORBIGNY, 1842)**

Posición estratigráfica: Toarciense. Zona Pseudoradiosa.

799J Ricla (Zaragoza). Molde interno. Antigua clasificación: *Dumortieria levesquei* (D'ORBIGNY). Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1900.

890J Procedencia desconocida. Fragmocono y fragmento de cámara de habitación?.

966J Ricla (Zaragoza). Molde interno. Antigua clasificación: *Ammonites surlilis* D'ORBIGNY. Fecha, forma y fuente de ingreso: 1900.

***Dumortieria pseudoradiosa* (BRANCO, 1879)**

Posición estratigráfica: Toarciense. Zona Pseudoradiosa.

1165J Romeral, Obón (Teruel). Molde interno. Antigua clasificación: *Tropidoceras masseanus* (D'ORBIGNY). (L. 4, fig. 5).

***Paradumortieria tectiforme* ELMI-CALOO-FORTIER, 1985**

Posición estratigráfica: Toarciense. Zona Pseudoradiosa.

943J Mataporquera (Palencia). Molde interno. Antigua clasificación: *Dumortieria levesquei* D'ORBIGNY. Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1880.

***Cotteswoldia subcandida* BUCKMAN, 1907**

Posición estratigráfica: Toarciense. Zona Aalensis

544J Aguilón (Zaragoza). Fragmocono y fragmento de cámara de habitación. Antigua clasificación: *Pleydellia aalensis* (ZIETEN). Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1940.

***Cotteswoldia* cf. *egena* BUCKMAN, 1907**

Posición estratigráfica: Toarciense. Zona Aalensis

891J Maranchón (Guadalajara). Molde interno. Antigua clasificación: *Pleydellia aalensis* (ZIETEN). Fecha, forma y fuente de ingreso: 1958. Recolección. J. de la Revilla.

***Cotteswoldia paucicostata* BUCKMAN, 1904**

Posición estratigráfica: Toarciense. Zona Aalensis

1169J Anchuela del Campo (Guadalajara). Fragmocono y fragmento de cámara de habitación. Antigua clasificación: *Pleydellia aalensis* (ZIETEN). Anterior a 1940.

1608J Alcolea del Pinar (Guadalajara). Fragmocono y fragmento de cámara de habitación?. Antigua clasificación: *Amaltheus snibelianus* D'ORBIGNY.

***Cotteswoldia costulata* (ZIETEN, 1830)**

Posición estratigráfica: Toarciense. Zona Aalensis.

546J Barahona (Soria). Fragmocono y fragmento de cámara de habitación. *Pleydellia aalensis* (ZIETEN). Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1940. (L. 4, fig. 4).

647J Ricla (Zaragoza). Molde interno. Antigua clasificación: *Echioceras raricostatum* (ZIETEN). Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1940.  
892J Collado del río Mulas, Vélez Rubio (Almería). Molde interno. Antigua clasificación: "*Ammonites*" *levesquei* D'ORBIGNY. Anterior a 1900.

893J Collado del río Mulas, Vélez Rubio (Almería). Fragmocono y fragmento de cámara de habitación. Antigua clasificación: "*Ammonites*" *levesquei* D'ORBIGNY. Anterior a 1900.

2729J Maranchón (Guadalajara). Fragmento de cámara de habitación. Antigua clasificación: *Dumortieria levesquei* (D'ORBIGNY). Fecha, forma y fuente de ingreso: Septiembre de 1958, Recolección. J. de la Revilla.

***Cotteswoldia* cf. *costulata* (ZIETEN, 1830)**

Posición estratigráfica: Toarciense. Zona Aalensis.

894J Vélez Rubio (Almería). Fragmento de fragmocono. Antigua clasificación: "*Ammonites*" *levesquei* D'ORBIGNY. Anterior a 1900.

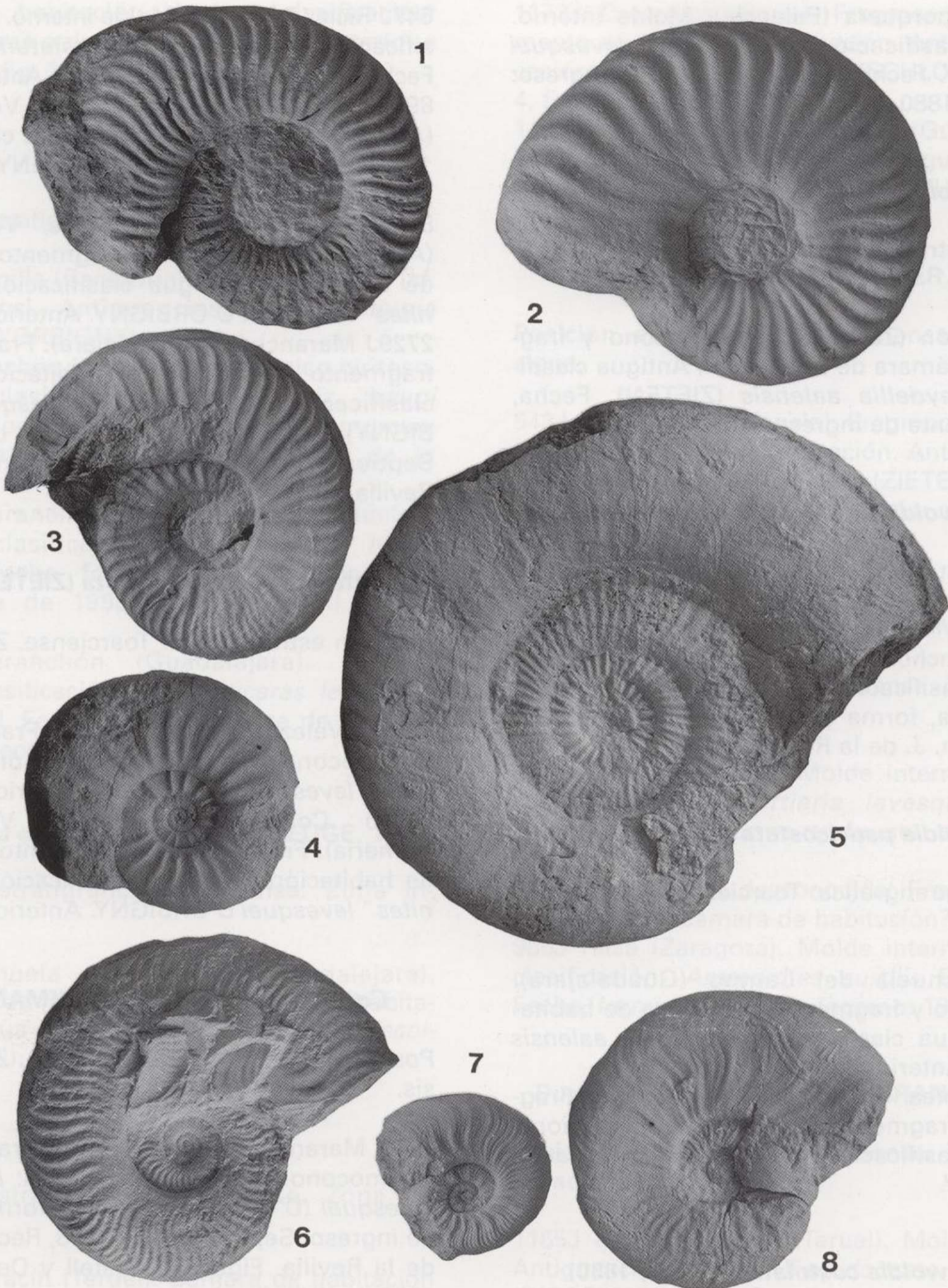
1745J Collado del río Mulas, Vélez Rubio (Almería). Fragmocono y fragmento de cámara de habitación. Antigua clasificación: "*Ammonites*" *levesquei* D'ORBIGNY. Anterior a 1900.

***Cotteswoldia distans* (BUCKMAN, 1904)**

Posición estratigráfica: Toarciense. Zona Aalensis.

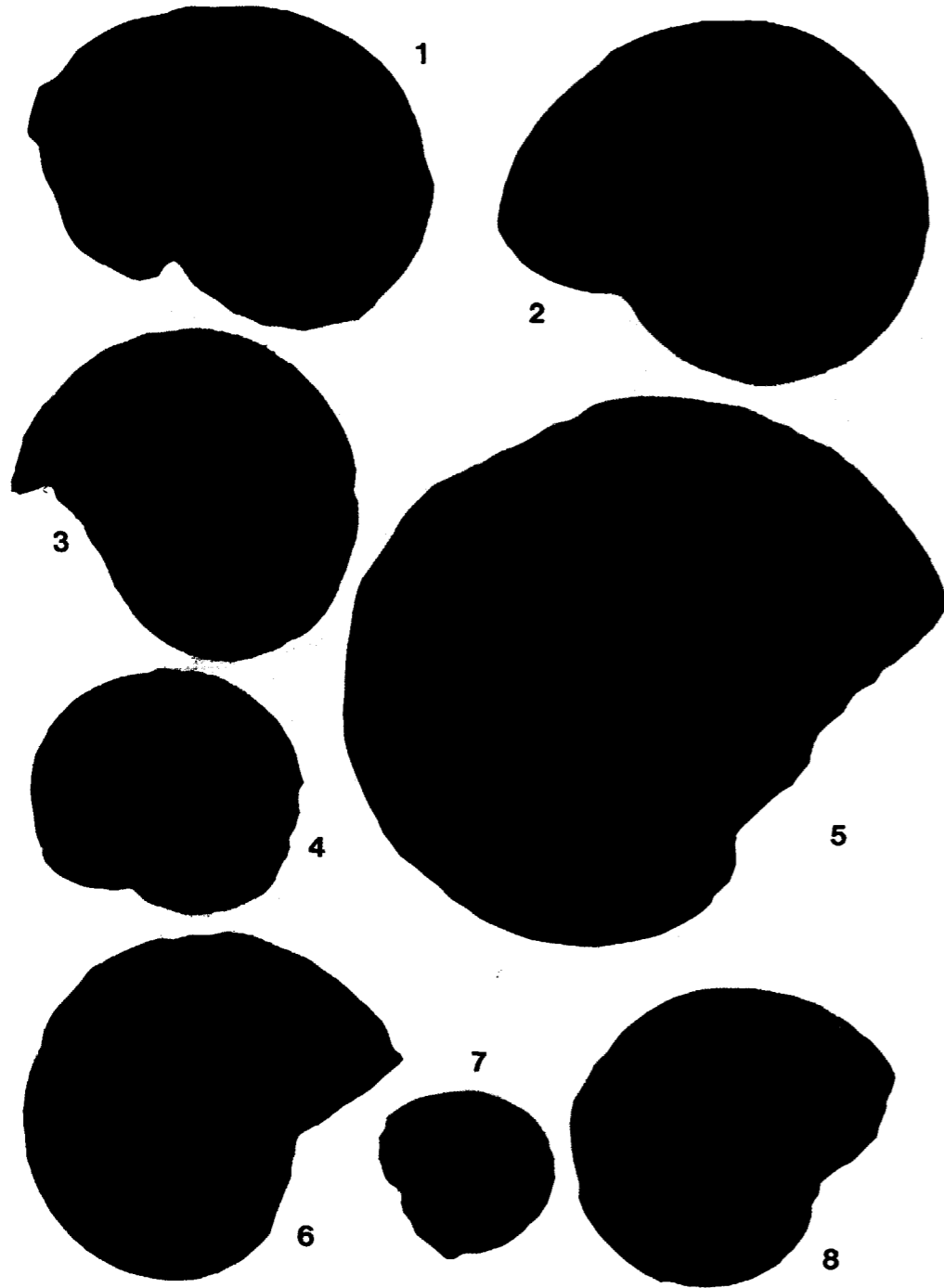
895J Maranchón (Guadalajara). Fragmento de fragmocono. Antigua clasificación: *Dumortieria levesquei* (D'ORBIGNY). Fecha, forma y fuente de ingreso: Septiembre de 1958, Recolección. J. de la Revilla. Figurado Castell y De la Concha 1956; L. XVII, fig. 4.

2752J Maranchón (Guadalajara). Fragmento de cámara de habitación. Antigua clasificación: *Paltoleuroceras* cf. *buckmani* (MOJS). Fecha, forma y fuente de ingreso: Septiembre de 1958, Recolección. J. de la Revilla. Figurado Castell y De la Concha; L. XV, fig. 7.



- 1.-577J. *Podagrosites aratum* (BUCKMAN). Josa (Teruel).  
 2.-576J. *Pseudomercaticeras frantzi* (REYNES). Torremocha (Guadalajara).  
 3.-543J. *Gruneria gruneri* (DUMORTIER). Cillamayor (Palencia).  
 4.-546J. *Cottesswoldia costulata* (ZIETEN). Barahona (Soria).  
 5.-1165J. *Dumortieria pseudoradiosa* (BRANCO). Obón (Teruel).  
 6.-1173J. *Pseudolillia* sp. Casarejos (Soria).  
 7.-2120J. *Pleydellia subcompta* (BRANCO). Maranchón (Guadalajara).  
 8.-955J. *Pleydella aalensis* (ZIETEN). Anchuela del Campo (Guadalajara).

## LAMINA 4



- 1.-577J. *Podagrosites aratum* (BUCKMAN). Josa (Teruel).  
 2.-576J. *Pseudomercaticeras frantzi* (REYNES). Torremocha (Guadalajara).  
 3.-543J. *Gruneria gruneri* (DUMORTIER). Cillamayor (Palencia).  
 4.-546J. *Cotteswoldia costulata* (ZIETEN). Barahona (Soria).  
 5.-1165J. *Dumortieria pseudoradiosa* (BRANCO). Obón (Teruel).  
 6.-1173J. *Pseudolillia* sp. Casarejos (Soria).  
 7.-2120J. *Pleydellia subcompta* (BRANCO). Maranchón (Guadalajara).  
 8.-955J. *Pleydella aalensis* (ZIETEN). Anchuela del Campo (Guadalajara).

***Pleydellia cf. falcifer* MAUBEUGE, 1950**

Posición estratigráfica: Toarciense. Zona Aalensis.

547J Torremocha (Guadalajara). Tránsito de *P. aalensis* a *P. falcifer*. Fragmento de cámara de habitación. Antigua clasificación: *Dumortieria radians* (SCHLOTHEIM).

899J Maranchón (Guadalajara). Fragmento de cámara de habitación. Antigua clasificación: *Pleydellia aalensis* (ZIETEN). Fecha, forma y fuente de ingreso: 1958. Recolección. J. de la Revilla.

***Pleydellia aalensis* (ZIETEN, 1830)**

Posición estratigráfica: Toarciense. Zona Aalensis.

545J Anchuela del Campo (Guadalajara). Fragmacono y fragmento de cámara de habitación. Antigua clasificación: *Pleydellia aalensis* (ZIETEN). Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1940.

896J Maranchón (Guadalajara). Molde interno. Antigua clasificación: *Pleydellia aalensis* (ZIETEN). Fecha, forma y fuente de ingreso: 1958. Recolección. J. de la Revilla.

897J Maranchón (Guadalajara). Molde interno. Antigua clasificación: *Pleydellia aalensis* (ZIETEN). Fecha, forma y fuente de ingreso: 1958. Recolección. J. de la Revilla.

955J Anchuela del Campo (Guadalajara). Fragmacono y fragmento de cámara de habitación. Antigua clasificación: *Ammonites aalensis* (ZIETEN). Fecha, forma y fuente de ingreso: 1900. (L 4, fig. 8).

990J Maranchón (Guadalajara). Molde interno. Antigua clasificación: *Praeleioceras lamacoi* (FUCINI). Fecha, forma y fuente de ingreso: Septiembre de 1958. Recolección. J. de la Revilla.

2139J Barcenilla (Palencia). Molde interno. Antigua clasificación: *Pleydellia aalensis* (ZIETEN). Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1900.

***Pleydellia cf. aalensis* (ZIETEN, 1830)**

Posición estratigráfica: Toarciense. Zona Aalensis.

1764J Alcolea del Pinar-Bujarrabal (Guadalajara). Molde interno. Antigua clasificación: *Harpoceras elegans* SOWERBY.

2744J Maranchón (Guadalajara). Molde interno. Antigua clasificación: *Praeleioceras lamacoi* (FUCINI). Fecha, forma y fuente de ingreso: Septiembre de 1958. Recolección. J. de la Revilla. Figurado por Castell y De la Concha 1956; L. XVII, fig. 7.

2748J Maranchón (Guadalajara). Molde interno. Antigua clasificación: *Gleviceras (Oxynoticeras) guibalianus* (WRIGHT). Fecha, forma y fuente de ingreso: Septiembre de 1958. Recolección. J. de la Revilla. Figurado por Castell y De la Concha 1956; L. XV, fig. 5.

2750J Maranchón (Guadalajara). Fragmento de cámara de habitación. *Pleydellia aalensis* (ZIETEN). Fecha, forma y fuente de ingreso: Septiembre de 1958. Recolección. J. de la Revilla.

***Pleydellia subcompta* (BRANCO, 1879)**

Posición estratigráfica: Toarciense. Zona Aalensis.

743J Maranchón (Guadalajara). Molde interno. Antigua clasificación: *Pleydellia aalensis* (ZIETEN). Fecha, forma y fuente de ingreso: 1958. Recolección. J. de la Revilla. Figurado Castell y De la Concha; L. XV, fig. 4.

898J Procedencia desconocida. Fragmacono y fragmento de cámara de habitación.

2120J Maranchón (Guadalajara). Molde interno. Antigua clasificación: *Pleydellia aalensis* (ZIETEN). Fecha, forma y fuente de ingreso: 1958. Recolección. J. de la Revilla. (L. 4, fig. 7).

***Pleydellia* sp.**

Posición estratigráfica: Toarciense. Zona Aalensis.

920J Torremocha (Guadalajara). Fragmento de cámara de habitación. Antigua clasificación: *Dumortieria radians* SCHLOTHEIM. Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1940.

2746J Maranchón (Guadalajara). Molde interno. Antigua clasificación: *Praeleioceras* aff. *insuetum* (FUCINI). Fecha, forma y fuente de ingreso:



Septiembre de 1958. Recolección. J. de la Revilla. Figurado por Castell y De la Concha 1956; L. XVIII, fig. 6.

***Onychoceras* sp.**

Posición estratigráfica: Toarciense. Zona Insigne-Pseudoradiosa.

1435J Becerrilejos (Palencia). Antigua clasificación: *Renziceras nausikae* (RENZ).

**Grammocerotinae gen. indet.**

Posición estratigráfica: Toarciense.

900J Maranchón (Guadalajara). Molde interno. Antigua clasificación: *Pleydellia aalensis* (ZIETEN). Fecha, forma y fuente de ingreso: 1958. Recolección. J. de la Revilla.

984J Maranchón (Guadalajara). Molde interno. Antigua clasificación: *Pleydellia aalensis* (ZIETEN). Fecha, forma y fuente de ingreso: 1958. Recolección. J. de la Revilla.

**Familia HAMMATOCERATIDAE BUCKMAN, 1887**

**Subfamilia HAMMATOCERATINAE BUCKMAN, 1887**

***Hammatoceras insigne* (SCHLÜBLER in ZIETEN, 1830)**

Posición estratigráfica: Toarciense. Zona Insigne.

1762J Valdepez (Burgos). Fragmento de fragmocono. Antigua clasificación: *Harpoceras insignis*. Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1900.

2751J Maranchón (Guadalajara). Molde interno. Antigua clasificación: *Pleydellia* sp. Fecha, forma y fuente de ingreso: Septiembre de 1958, Recolección. J. de la Revilla.

***Hammatoceras capuccinum* BUCKMAN, 1921**

Posición estratigráfica: Toarciense. Zona Insigne.

532J Becerril (Palencia). Fragmento de fragmocono. Antigua clasificación: *Metophioceras conybeari* (SOWERBY). Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1940.

***Geczyceras porcarellaense* (BONARELLI, 1899)**

Posición estratigráfica: Toarciense. Zona Insigne-Pseudoradiosa.

573J Torremocha (Guadalajara). Fragmento de fragmocono. Antigua clasificación: *Hammatoceras insigne?* (SCHLÜBLER). Fecha, forma y fuente de ingreso: Anterior a 1945.

2733J Maranchón (Guadalajara). Fragmento de cámara de habitación. Antigua clasificación: *Hammatoceras insigne* (ZIETEN). Fecha, forma y fuente de ingreso: Septiembre de 1958. Recolección. J. de la Revilla.

***Geczyceras allobrogense* (DUMORTIER, 1874)**

Posición estratigráfica: Toarciense. Zona Pseudoradiosa-Aalensis.

2734J Maranchón (Guadalajara). Fragmento de fragmocono. Antigua clasificación: *Hammatoceras insigne* (ZIETEN). Fecha, forma y fuente de ingreso: Septiembre de 1958, Recolección. J. de la Revilla. Figurado Castell y De la Concha 1956; L. XVIII, fig. 8.

***Geczyceras* sp.**

Posición estratigráfica: Toarciense.

1160J Vilanova de Meyá (Lérida). Fragmento de fragmocono. Antigua clasificación: *Arietites bisulcatus* (BRUGUIERE).

***Bredya cf. subinsignis* (OPPEL, 1856)**

Posición estratigráfica: Toarciense. Zona Aalensis-Aaleniense. Zona Opalinum.

1737J Cardó (Tarragona). Molde interno. Antigua clasificación: *Harpoceras insignis?*

***Bredya aff. subinsignis* (OPPEL, 1856)**

Posición estratigráfica: Toarciense. Zona Aalensis-Aaleniense. Zona Opalinum.

2739J Maranchón (Guadalajara). Molde interno. Antigua clasificación: *Haugia variabilis* (D'ORBIGNY). Fecha, forma y fuente de ingreso: Septiembre de 1958, Recolección. J. de la Revilla. Figurado por Castell y De la Concha 1956; L. XVIII, figs. 1, 2.

***Bredya uretae* MARTINEZ, 1992**

Posición estratigráfica: Toarciense. Zona Aalensis.

1676J Montillana (Granada). Molde interno. Antigua clasificación: "*Ammonites*" *variabilis?* D'ORBIGNY.

2738J Vadillo (Soria). Fragmento de fragmocono. Antigua clasificación: *Hammatoceras insigne* (ZIETEN). Fecha, forma y fuente de ingreso: Septiembre de 1958, Recolección. J. de la Revilla.

**CONCLUSIONES**

En el presente trabajo se estudian desde el punto de vista taxonómico, 217 ejemplares de Ammonoideos depositados en el Museo Geominero. Teniendo en cuenta las clasificaciones realizadas con anterioridad, se han efectuado algunos cambios en la nominación de los diferentes taxones de acuerdo a criterios de actualización, o por considerar que se han producido errores de interpretación. Se han desdoblado los números de algunas siglas por existir varios taxones con el mismo número y se han corregido algunas localidades. Así, se distinguen 69 especies, incluidas en 47 géneros del Sinemuriense, Pliensbachiense y Toarciense procedentes de 67 localidades españolas.

**AGRADECIMIENTOS**

Queremos expresar nuestra gratitud a los profesores Antonio Goy, Sixto Fernández-López,

Soledad Ureta y María José Comas-Rengifo por su importante ayuda en las determinaciones de algunos ejemplares y a Uly Martín por el excelente trabajo de fotografía.

**REFERENCIAS**

BERNAD, J. (1993): Ammonitina del Toarciense en Salinas de Pisuerga (Palencia, España). *Coloquios de Paleontología*, 45: 91-136.

BRAGA, J. C. (1983): Ammonites del Domeriense de la Zona Subbética (Cordilleras Béticas, Sur de España). Tesis doctoral. *Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Granada*: 410 pp.

CASTELL y DE LA CONCHA (1956): Mapa Geológico de España. Escala 1:50.000. Hoja 462 Maranchón (Guadalajara). IGME.

COMAS-RENGIFO, M. J. (1985): El Pliensbachiense de la Cordillera Ibérica. *Col. Tesis doctorales de la Universidad Complutense de Madrid*, 19/85: 591 pp.

GABILLY, J. (1975): Evolutions et Systématique des Phymatoceratinae et des Grammocerotinae (Hildoceratinae, Ammonitina) de la région de Thouars, stratotype du Toarcien. *Mémoires de la Société Géologique de la France, N.S.*, 54: 193 pp.

GABILLY, J. (1976): Le Toarcien à Thouars et dans le Centre-ouest de la France. Biostratigraphie-Evolution de la faune (Harpoceratinae-Hildoceratinae). *Lab. ass. au C.N.R.S. 11 et 157*, 3: 217 p.

GOY, A. (1974): *El Lías de la mitad Norte de la Rama Castellana de la Cordillera Ibérica*. Tesis Doct. Fac. Geología, Univ. Complutense, 3 t., XV + 940 p. (Inéd.), Resumen: *Publ. Depart. Paleont., Univ. Compl. Madrid*, 14: 35 p.

GOY, A. y MARTINEZ, G. (1990): Biozonación del Toarciense en el Sector Central de la Cordillera Ibérica. *Cuadernos de Geología Ibérica*, 14: 11-53.

GUÉX, J. (1973): Observations sur la répartition biostratigraphique des ammonites du Toarcien supérieur de L'Aveyron (France). *Bull. Lab. Geol. Min. Géop. et Musée geol. de L'Univ. de Lausanne*, 207: 1-14.

GUÉX, J. (1975): Description biostratigraphique du Toarcien supérieur de la bordure sud des causses (France). *Eclogae geol. Hel.*, 68 (1): 97-129.

MARTINEZ, G. (1986): *El Toarciense en el Sector comprendido entre La Almunia de Doña Godina y Ricla (Prov. de Zaragoza) - Paleontología (Ammonoidea) y Bioestratigrafía*. Tesis de Licenciatura. Universidad Complutense de Madrid, 254 p. (Inéd).

MARTINEZ, G. (1992): Hammatoceratinae (Ammonitina)

del Toarciense superior y Aalenense en la Cordillera Ibérica. *Colección Tesis Doctorales Universidad Complutense de Madrid*, 374/92: 331 pp.

SCHLEGELMILCH, R. (1976): *Die Ammoniten des süd-deutschen Lias. Ein Bestimmungsbuch für Fossilien-sammler und Geologen*. Fischer Ed.: 212 pp.

Original recibido: Enero 1996.  
Original aceptado: Marzo 1996.

## Comportamiento reológico de la Formación Candelaria y la Zona de Movimiento Tectónico de Carreiro (Cabo Ortegá, NO de España) durante el metamorfismo sintectónico eo-Hercínico de grado medio y alto.

Por J. AZCARRAGA (\*) y B. ABALOS (\*)

### R E S U M E N

El estudio de las microestructuras y fábricas de venas deformadas de cuarzo y de su comportamiento reológico mediante la utilización de leyes cinéticas, geopiezómetros y ecuaciones constitutivas derivadas teórica y experimentalmente; permite restringir las condiciones de deformación de dos unidades tectónicas (Formación Candelaria y Zona de Movimiento Tectónico de Carreiro) del complejo de Cabo Ortegá (NO de España).

La Formación Candelaria sufrió una milonitización dúctil bajo condiciones termomecánicas de alta temperatura (por encima de 590 °C) y un régimen de deformación predominantemente no coaxial. Esta deformación tuvo lugar en condiciones de esfuerzos diferenciales bajos ( $\leq 8$  MPa) y tasas de deformación lentas ( $10^{-17}$ - $10^{-14}$  s $^{-1}$ ). Las milonitas de la Zona de Movimiento Tectónico de Carreiro se formaron inicialmente bajo condiciones similares: esfuerzos diferenciales iguales o inferiores a 11 MPa, tasas de deformación lentas ( $10^{-17}$ - $10^{-14}$  s $^{-1}$ ) y temperaturas ligeramente por encima de 600 °C. Durante el enfriamiento subsecuente tuvo lugar un proceso de localización de la deformación que progresó hasta temperaturas próximas a 500 °C bajo esfuerzos diferenciales más altos ( $\geq 30$  MPa) y tasas de deformación más rápidas ( $10^{-13}$ - $10^{-11}$  s $^{-1}$ ).

*Palabras clave:* geopiezómetro, reología, zona de cizalla, Hercínico, Cabo Ortegá, España.

### A B S T R A C T

Microstructures and fabrics in deformed quartz veins are used together with theoretically and experimentally derived grain growth kinetic laws, geopiezometers and constitutive flow laws to constrain the conditions of deformation and rheological behavior of two of the tectonic units (The Candelaria Formation and The Carreiro Zone of tectonic Movement) from the Cabo Ortegá allochthon (NW Spain).

The Candelaria Formation underwent pervasive ductile mylonitization under high temperature (well above 590 °C) and a dominantly non-coaxial deformation regime. High-temperature mylonitization occurred under low differential stresses ( $\leq 8$  MPa), and slow strain rates ( $10^{-17}$ - $10^{-14}$  s $^{-1}$ ). Mylonites from the Carreiro Zone of Tectonic Movement formed initially under conditions similar to the Candelaria Formation: low differential stress ( $\leq 11$  MPa), slow strain rates ( $10^{-17}$ - $10^{-14}$  s $^{-1}$ ), and temperatures slightly above 600 °C. Subsequent localized deformation (also under a predominantly non-coaxial regime) progressed to temperatures down to 500 °C, higher differential stresses ( $\geq 30$  MPa), and faster strain rates ( $10^{-13}$ - $10^{-11}$  s $^{-1}$ ) during retrogressive metamorphism.

*Key words:* paleopiezometry, rheology, shear zone, Hercynian, Cabo Ortegá, Spain.

(\*) Departamento de Geodinámica. Universidad del País Vasco. Apdo. 644, E-48080 Bilbao (España).

## 1. INTRODUCCION

En las últimas décadas se ha producido una mejora significativa del conocimiento de la reología de la litosfera continental gracias al avance en el conocimiento de las ecuaciones constitutivas sobre plasticidad intracrystalina y recristalización dinámica de minerales petrogenéticos comunes (cuarzo y olivino, fundamentalmente). En un estudio de este tipo es necesario determinar los tres parámetros siguientes: (1) la temperatura de deformación, (2) el esfuerzo diferencial, y (3) la tasa o velocidad de la deformación. El papel de la "presión termodinámica" (presión de confinamiento) en el sentido de MANCK-TELOW (1993, p. 802) es, en principio, un parámetro de importancia secundaria.

Por lo que respecta a la temperatura de la deformación dúctil de rocas corticales en las partes internas de los orógenos, ésta varía a menudo entre 350 °C (facies de los esquistos verdes de baja temperatura) y 700-800 °C (facies metamórfica de las granulitas y de las eclogitas de temperatura intermedia-alta).

La magnitud de los esfuerzos diferenciales en rocas deformadas naturalmente, por su parte, puede variar desde menos de 100 MPa hasta alrededor de 200 MPa (TWISS 1977; ORD y CHRISTIE, 1984). Sin embargo, en los últimos años se han propuesto, también para la deformación natural, valores de esfuerzos diferenciales mucho más bajos (HACKER et al., 1990; STÖCKHERT et al., 1995; ABALOS et al., 1996).

Finalmente, las tasas de deformación pueden estar en un rango que abarca cinco órdenes de magnitud (desde  $10^{-11}$  hasta  $10^{-16}$  s<sup>-1</sup>; RUTTER, 1976; SIBSON, 1982).

En este trabajo se acotan las temperaturas, esfuerzos diferenciales y tasas de deformación prevalecientes durante la deformación dúctil de venas de cuarzo en dos unidades litoestratigráficas (Formación Candelaria y Zona de Movimiento Tectónico de Carreiro) del Complejo de Cabo Ortegal. Con este propósito se utilizan leyes cinéticas de crecimiento, geopiezómetros y ecuaciones constitutivas para la deformación plástica del cuarzo determinadas teórica y experimentalmente por diversos autores.

## 2. CONTEXTO GEOLOGICO

El Complejo de Cabo Ortegal está constituido por un apilamiento de mantos metamórficos. Junto con otras cinco unidades comparables, conforma una parte de los llamados Complejos Alóctonos con rocas máficas y ultramáficas (Arenas *et al.* 1986) del noroeste de la Península Ibérica (Fig. 1) que fueron emplazados sobre el autóctono Ibérico durante el Hercínico. Las unidades litoestratigráficas que se pueden diferenciar en el complejo de Cabo Ortegal (VOGEL, 1967; ENGELS, 1972; FERNANDEZ-POMPA y

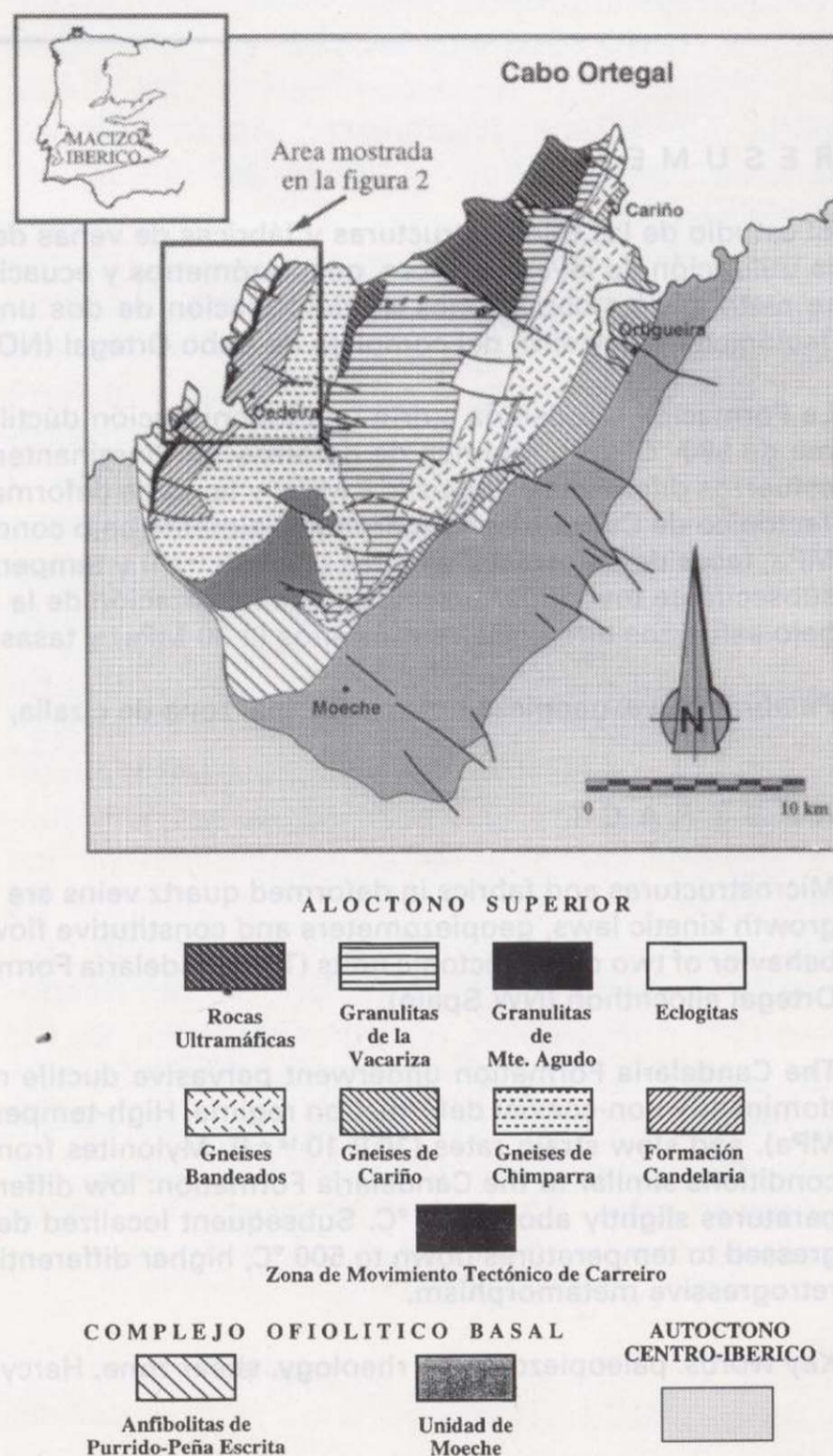


Figura 1.- Mapa geológico simplificado del complejo de Cabo Ortegal (modificado de Bastida *et al.* 1984).

1. INTRODUCCION

En las últimas décadas se ha producido una mejora significativa del conocimiento de la reología de la litosfera continental gracias el avance en el conocimiento de las ecuaciones constitutivas sobre plasticidad intracristalina y recristalización dinámica de minerales petrogenéticos comunes (cuarzo y olivino, fundamentalmente). En un estudio de este tipo es necesario determinar los tres parámetros siguientes: (1) la temperatura de deformación, (2) el esfuerzo diferencial, y (3) la tasa o velocidad de la deformación. El papel de la "presión termodinámica" (presión de confinamiento) en el sentido de MANCKTELOW (1993, p. 802) es, en principio, un parámetro de importancia secundaria.

Por lo que respecta a la temperatura de la deformación dúctil de rocas corticales en las partes internas de los orógenos, ésta varía a menudo entre 350 °C (facies de los esquistos verdes de baja temperatura) y 700-800 °C (facies metamórfica de las granulitas y de las eclogitas de temperatura intermedia-alta).

La magnitud de los esfuerzos diferenciales en rocas deformadas naturalmente, por su parte, puede variar desde menos de 100 MPa hasta alrededor de 200 MPa (TWISS 1977; ORD y CHRISTIE, 1984). Sin embargo, en los últimos años se han propuesto, también para la deformación natural, valores de esfuerzos diferenciales mucho más bajos (HACKER et al., 1990; STÖCKHERT et al., 1995; ABALOS et al., 1996).

Finalmente, las tasas de deformación pueden estar en un rango que abarca cinco órdenes de magnitud (desde 10<sup>-11</sup> hasta 10<sup>-16</sup> s<sup>-1</sup>; RUTTER, 1976; SIBSON, 1982).

En este trabajo se acotan las temperaturas, esfuerzos diferenciales y tasas de deformación prevalecientes durante la deformación dúctil de venas de cuarzo en dos unidades litoestratigráficas (Formación Candelaria y Zona de Movimiento Tectónico de Carreiro) del Complejo de Cabo Ortegal. Con este propósito se utilizan leyes cinéticas de crecimiento, geopiezómetros y ecuaciones constitutivas para la deformación plástica del cuarzo determinadas teórica y experimentalmente por diversos autores.

2. CONTEXTO GEOLOGICO

El Complejo de Cabo Ortegal está constituido por un apilamiento de mantos metamórficos. Junto con otras cinco unidades comparables, conforma una parte de los llamados Complejos Alóctonos con rocas máficas y ultramáficas (Arenas et al. 1986) del noroeste de la Península Ibérica (Fig. 1) que fueron emplazados sobre el autóctono Ibérico durante el Hercínico. Las unidades litoestratigráficas que se pueden diferenciar en el complejo de Cabo Ortegal (VOGEL, 1967; ENGELS, 1972; FERNANDEZ-POMPA y

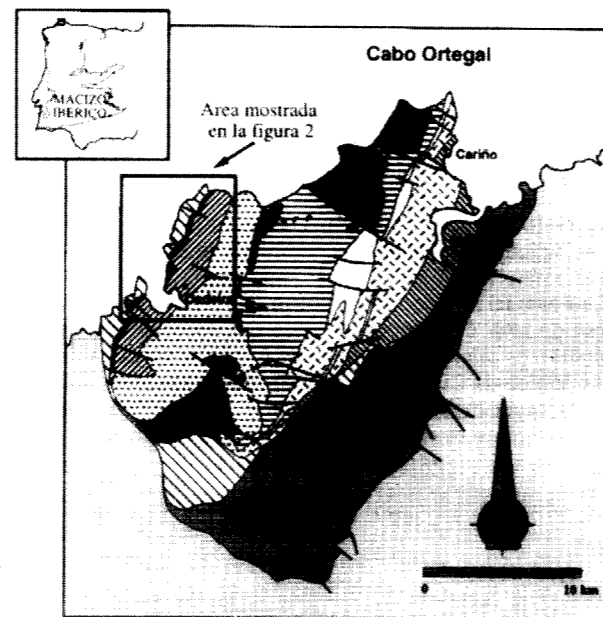


Figura 1.- Mapa geológico simplificado del complejo de Cabo Ortegal (modificado de Bastida et al. 1984).

MONTESERIN, 1976; FERNANDEZ MARTINEZ y FERNANDEZ-POMPA 1977; BASTIDA et al., 1984) pueden ser categorizadas en un complejo ofiolítico basal con rocas metamórficas de grado bajo principalmente, y un alóctono superior con tectonitas de grado alto (GIL IBARGUCHI et al., 1990). Este último constituye un apilamiento de mantos (mostrando un gradiente metamórfico invertido) que sufrió meta-

morfismo y deformación eo-Hercínicos de alta presión (AP) y alta temperatura (AT).

La Formación Candelaria (Fig. 2) aflora en la base del alóctono superior, en la parte occidental del Complejo de Cabo Ortegal. Contiene tectonitas formadas bajo condiciones de temperatura similares (grado transicional entre las facies de las anfibolitas y granulitas) y de pre-

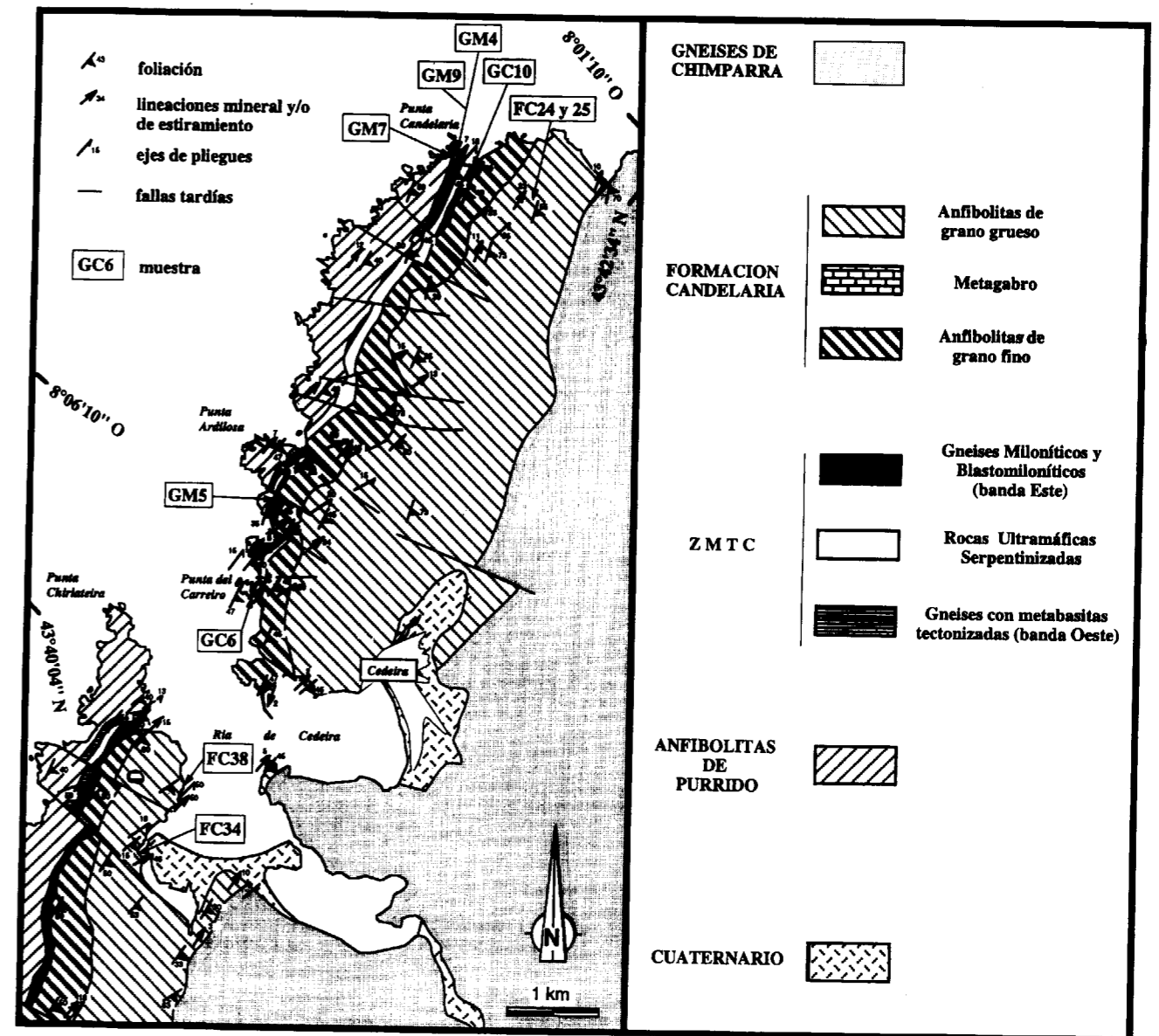


Figura 2.- Mapa geológico-estructural de las unidades implicadas en este estudio (Formación Candelaria y Zona de Movimiento Tectónico de Carreiro (ZMTC) en el que se muestra la localización de las muestras estudiadas.

sión inferiores a las de las unidades suprayacentes (GIL IBARGUCHI et al., 1990).

La Zona de Movimiento Tectónico de Carreiro (ZMTC, Fig. 2), a su vez, aflora por debajo de la Formación Candelaria, constituyendo el límite entre el complejo ofiolítico basal (en esta parte del Complejo de Cabo Ortegal representado por las Anfibolitas de Purrido) y el alóctono superior. Se trata de una importante zona de cizalla que contiene rocas de origen cortical y mantélico, y constituye probablemente la base de los mantos suprayacentes (ENGELS, 1972).

A continuación se describen las características petro-estructurales más significativas de estas dos unidades haciendo hincapié en los aspectos relacionados con la geometría y cinemática de la deformación.

### 2.1. La Formación Candelaria

La Formación Candelaria es una unidad metabásica heterogénea de una potencia media de un kilómetro. Aparece limitada al Oeste por la ZMTC, y al Este por los Gneises de Chimparra (VOGEL, 1967; Fig. 2). El contacto con esta última unidad se verifica a través de una zona de cizalla estrecha. La Formación Candelaria está constituida por anfibolitas bandeadas y cuerpos lenticulares de dimensiones métricas a decamétricas de gabros variablemente recristalizados, doleritas y plagiogranitos (GIL IBARGUCHI et al., 1990). Las estimaciones de temperatura (T) y presión (P) realizadas a partir de un metaplagiogranito de esta formación por SANTOS ZALDUEGUI (1995) dan como resultado 700 °C y 1.15 GPa. Los metagabros coroníticos muestran transiciones graduales hacia anfibolitas granatíferas foliadas en relación con un incremento de la deformación (BRODIE Y RUTTER, 1987; GIL IBARGUCHI et al., 1990).

Las anfibolitas están compuestas por hornblenda, plagioclasa y granate. Presentan una foliación continua bastante uniforme con un buzamiento medio de 38°/125°. La foliación está definida por una alternancia de bandas leucocráticas y melanocráticas que exhiben texturas granonematoblásticas de origen milonítico. Sobre

los planos de foliación aparecen lineaciones minerales definidas por el crecimiento orientado de anfíboles y/o epidota y/o esfena con una orientación 14°/047°.

Dentro de esta formación se pueden distinguir en general dos bandas de dirección NNE-SSO: una occidental con anfibolitas de tamaño de grano fino, y otra al este donde predominan las anfibolitas de tamaño de grano medio a grueso. Ambas subunidades son correlacionables a grosso modo con dominios metamórficos en facies anfibolítica y granulítica, respectivamente (ENGELS, 1972; ARPS et al., 1977; VOGEL et al., 1983). En el límite entre ellas aparecen a menudo lentes de metagabros coroníticos con una paragénesis que incluye granate-clinopiroxeno.

Destaca así mismo la alternancia de bandas de anfibolitas no plegadas de espesor decimétrico a métrico y tamaño de grano más grueso con bandas de tamaño de grano más fino e intensamente plegadas. Estas últimas contienen pliegues intrafoliares y en vaina cuyos ejes y ápices, respectivamente, tienen una orientación media de 17°/050°, similar a la de las lineaciones minerales. La geometría de los sistemas porfiroclásticos observados (PASSCHIER y SIMPSON, 1986), junto con otros indicadores cinemáticos reconocidos en secciones estructurales XZ (paralelas a la lineación y perpendiculares a la foliación) indican un sentido de movimiento tectónico de techo hacia el NE. Todas estas características sugieren la existencia de un reparto de la deformación en bandas de reología contrastada.

### 2.2. La Zona de Movimiento Tectónico de Carreiro (ZMTC)

Se trata de una zona de cizalla de 40 a 220 metros de potencia delimitada a techo por la Formación Candelaria y a muro por las Anfibolitas de Purrido (anfíbolitas laminadas muy homogéneas). La ZMTC tiene una dirección N020-040E con un buzamiento medio de 37° hacia el SE. En su interior pueden distinguirse tres láminas o bandas subparalelas que se acunian longitudinalmente (Fig. 2). Desde el punto de vista de su litología, estas bandas se pueden

considerar resultantes de la intensa milonitización de algunos tipos litológicos de las unidades suprayacentes. A continuación se describen brevemente sus principales características.

#### 2.2.1. Gneises miloníticos y blastomiloníticos con granate-biotita-moscovita±distena

Afloran en la porción más oriental de la ZMTC. Se trata de tectonitas plano-lineares que pasan a tener una estructura lineal hacia su parte central. La foliación gneísica, orientada aproximadamente 35°/125°, está definida por una alternancia de niveles leucocráticos y melanocráticos que exhiben texturas granolepidoblásticas, anastomosadas y granoblásticas. Sobre ella se asientan lineaciones minerales (definidas fundamentalmente por biotita, moscovita y distena) y de estiramiento (definidas por agregados cuarzo-feldespáticos y en ocasiones también por granates alargados) con una orientación media de 14°/040°. Estos gneises son comparables en algunos aspectos a los Gneises de Chimparra, que fueron metamorfoseados bajo condiciones P/T de 800°C y 1.6 GPa (FERNANDEZ RODRIGUEZ, 1993).

Los indicadores cinemáticos más comunes son: sistemas porfiroclásticos cuarzo-feldespáticos aislados, láminas leucocráticas estrechas con geometrías sigmoidales a lo largo de las mismas, lentes máficas asimétricas (a veces imbricadas) de dimensiones decimétricas a métricas, estructuras "mica fish" y fábricas S-C (LISTER y SNOKE, 1984). Todos ellos indican un sentido de movimiento de los bloques de techo hacia el NE. Por otra parte, esta banda presenta pliegues cilíndricos isoclinales de charnela engrosada con ejes subparalelos a la lineación de estiramiento. Estos pliegues podrían constituir partes de pliegues vaina (MIES, 1993). También existen pliegues de arrastre asimétricos con geometrías coherentes con el sentido de cizalla de la zona. Por último, esta lámina gneísica contiene budins de metabasitas de alta presión (GIL IBARGUCHI et al., 1990) y de anfibolitas similares a las de la Formación Candelaria. Todos ellos aparecen intensamente tectonizados y contienen lineaciones subparalelas a la lineación mineral y de estiramiento del encajante.

#### 2.2.2. Rocas ultramáficas serpentinizadas

Esta lámina aparece a lo largo de la parte central de la ZMTC en forma de lentes tectónicas que varían en longitud desde unos pocos metros hasta varios hectómetros y tienen potencias métricas a decamétricas. Las rocas ultramáficas son harzburgitas, similares a las del macizo ultramáfico de Uzal (ENGELS, 1972) aflorante en el alóctono superior de AP. Estas rocas se encuentran intensamente serpentinizadas. En las muestras menos alteradas se puede reconocer una lineación definida por ortopiroxenos estirados. Las serpentinitas exhiben foliaciones anastomosadas con una orientación media de 49°/136° y contienen lineaciones minerales 9°/054°. Presentan una textura interna lenticular relacionada con una fábrica S-C que permite inferir un sentido de movimiento congruente con el definido por la banda gneísica anterior. También existen, atravesando a las serpentinitas, zonas de cizalla compuestas por esquistos clorítico-anfibólicos microcrenulados con pliegues vaina decimétricos de dirección axial en torno a 12°/068°.

#### 2.2.3. Gneises con intercalaciones de metabasitas tectonizadas

Forman parte de la banda situada en la porción oriental de la ZMTC. La lámina está constituida por una matriz de rocas gneísicas (gneises con granate-estaurólita-antofilita y gneises con hornblenda-epidota) que contienen una gran cantidad de inclusiones de rocas metabásicas. Ambos tipos litológicos, los gneises y las metabasitas, presentan una orientación similar con un plano de foliación moderadamente inclinado 35°/127°. Las lineaciones minerales y/o de estiramiento se orientan 5°/040°, y están definidas indistintamente por prismas de hornblenda y antofilita, epidota, biotita, agregados cuarzo-feldespáticos, sombras de presión alrededor del granate, budins, y "rods" de cuarzo. En el contacto Oeste de esta unidad con las Anfibolitas de Purrido afloran esquistos clorítico-anfibólicos.

Las metabasitas son anfibolitas laminadas similares a las Anfibolitas de Purrido infrayacentes. A menudo se encuentran abudinadas y forman-

do pliegues vaina decimétricos a métricos. Exhiben criterios cinemáticos que señalan un sentido de movimiento del techo hacia el NE. Por otro lado, los gneises también contienen sistemas porfiroclásticos del tipo  $\sigma_2$  de PASSCHIER y SIMPSON (1986), congruentes con el citado sentido de transporte tectónico. Al igual que en la banda de serpentinitas también aparecen zonas de cizalla discretas paralelas a la foliación principal que asocian pliegues vaina métricos que en secciones estructurales YZ presentan morfologías elípticas características (MINNIGH, 1980; MIES, 1993). Las zonas apicales de estos pliegues y sus ejes se inclinan aproximadamente  $5-25^\circ/040-060^\circ$ .

### 3. ANALISIS DE FABRICA

#### 3.1. Introducción

En este trabajo se realiza un estudio de la deformación dúctil de venas de cuarzo contenidas en la Formación Candelaria y la ZMTC. Estas venas proporcionan una buena oportunidad para estudiar partes de la historia deformacional sinmetamórfica de sus rocas encajantes. Con objeto de analizar sus microestructuras y fábricas de ejes-c de cuarzo se han recogido un total de diez muestras (Fig. 2) que contienen venas y cintas de cuarzo deformadas y paralelas a la foliación de su encajante. En cada vena fueron cortadas una o varias secciones o láminas delgadas paralelamente a las direcciones estructurales XZ y/o XY ( $X \geq Y \geq Z$ ; XY: plano de foliación; X: dirección de la lineación mineral y/o de estiramiento). Las muestras FC34, FC24, FC25 y FC38 se han obtenido en la Formación Candelaria, donde no son comunes los diferenciados de cuarzo. La primera estaba encajada en una anfibolita de grano fino (facies intensamente milonitizada) y las tres últimas en anfibolitas de grano grueso. Las muestras GC10 y GC6 pertenecen a la banda gneísica oriental de la ZMTC, mientras que las muestras GM9, GM4, GM7 y GM5 pertenecen a la banda gneísica occidental de dicha zona de cizalla.

#### 3.2. Microestructuras

Todas las venas de cuarzo estudiadas presentan texturas heterogranulares con tamaños de

grano que oscilan entre unas decenas de micras y algunos milímetros. Los granos tienen formas subrectangulares, elongadas paralelamente a la dirección estructural X, y también subequidimensionales. Cuando se trata de cintas de cuarzo éstas se pueden asimilar a los "ribbon" policristalinos de tipo III y IV de BOULLIER y BOUCHEZ (1978).

Las microestructuras del cuarzo reconocidas tanto para las venas incluidas en la Formación Candelaria como para las encajadas dentro de la ZMTC (Fig. 3), exhiben en general rasgos propios de una deformación plástica intracristalina a alta temperatura.

El recovery (desarrollo de subgranos) y la recristalización dinámica a granos más pequeños equidimensionales y libres de deformación están bastante extendidos en todas las muestras. La recristalización dinámica se produce fundamentalmente por migración de límites de grano (abundancia de límites de grano irregulares aserrados y con indentaciones en otros granos), aunque también por rotación de subgranos (evidenciada por texturas del tipo "core-mantle" y mediante el análisis de las fábricas de ejes-c de cuarzo; Fig. 3a). Ambos mecanismos de recristalización, cuando operan simultáneamente, son indicativos de un régimen deformacional del cuarzo de AT (régimen 3 de HIRTH y TULLIS, 1992) en el cual el ascenso de dislocaciones y la migración de límites de grano causan un porcentaje elevado de recristalización. Son frecuentes también las texturas en mosaico (Fig. 3b) similares a las descritas por GAPAIS y BARBARIN (1986, Fig. 4b, p. 361). Otras estructuras comunes son los sublímites de grano (subjuntas en su mayoría prismáticas) irregulares y curvados que aparecen ofreciendo una distribución ligeramente asimétrica y con orientación variable respecto a la dirección estructural X.

La muestra GC10-XZ obtenida de la ZMTC exhibe una fábrica de forma que muestra los granos de cuarzo con sus ejes largos formando un ángulo de aproximadamente  $25^\circ$  con respecto a la dirección estructural X. De esta relación geométrica se puede inferir un régimen de deformación no coaxial para la fábrica desarrollada que indica un movimiento de techo al NE cohe-

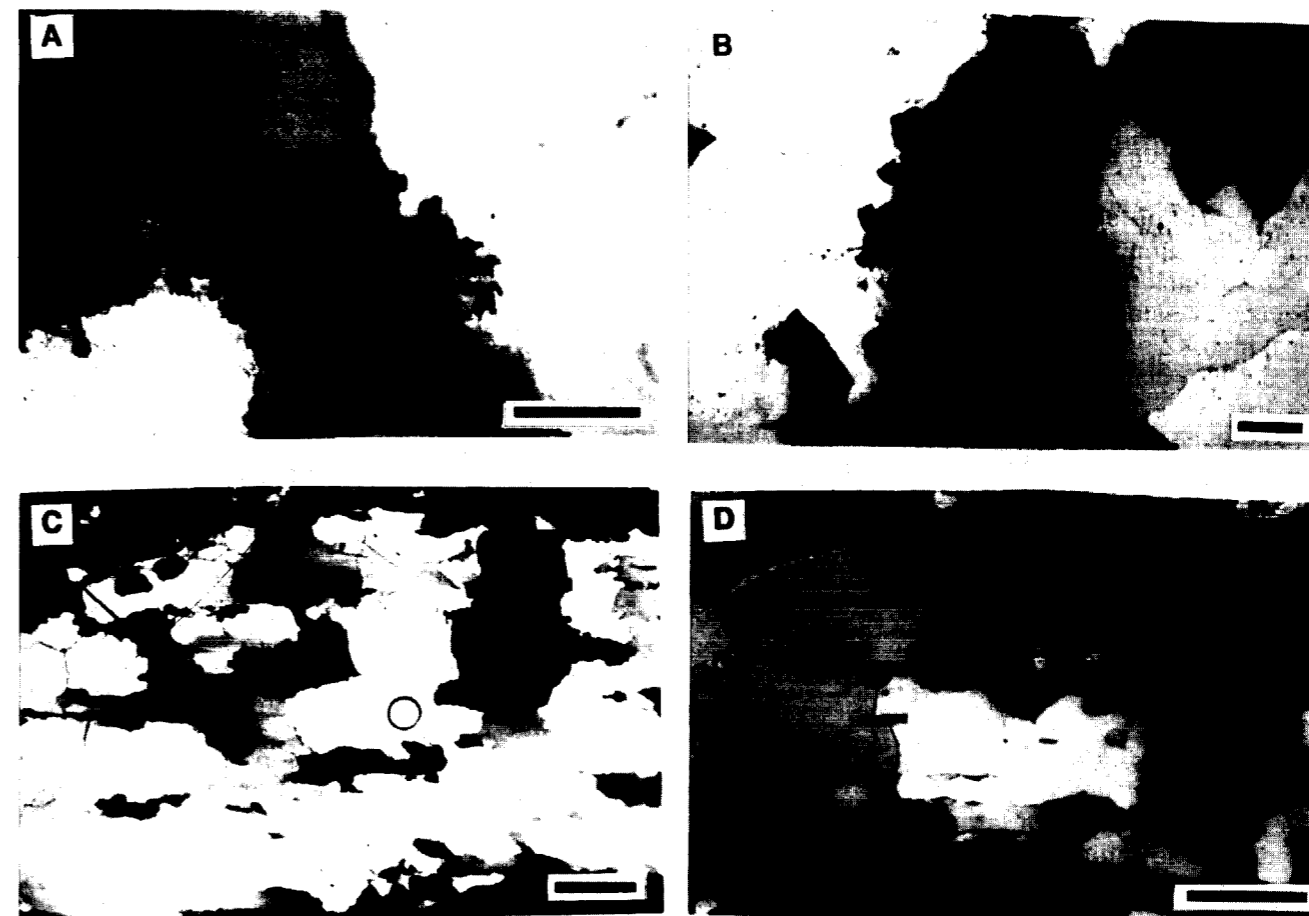


Figura 3.- Microestructuras de deformación plástica presentes en las venas de cuarzo encajadas en las unidades estudiadas. (A) Recristalización dinámica por migración de límite de grano (límites de grano irregulares y con indentaciones en otros granos, "bulging") y por rotación de subgranos evidenciada (textura de tipo núcleo-manto "core-mantle") presente en la muestra GC10 (sector Este de la ZMTC). (B) Textura en mosaico en una vena hospedada en el sector Oeste de la ZMTC (muestra GM9-XZ1). (C) Extinción ondulante y desarrollo variable de deformación lamelar correspondiente al retrabajamiento en frío (muestra FC25), mostrando también subjuntas prismáticas que aparecen ofreciendo una distribución ligeramente asimétrica y con orientación variable respecto a la foliación. (D) Crecimiento de grano postdeformacional evidenciado por la aparición de granos sin apenas deformación interna con límites de grano ligeramente abultados tendentes a rectificar dichos límites y a obliterar la textura alcanzada durante la milonitización. También existen algunos puntos triples así como minerales orientados que definen la foliación de la matriz (micas) incluidos en los granos de cuarzo (muestra GM5-XZ1). Secciones estructurales XZ. Nícoles cruzados. Barras de escala para las microfotografías A, B y D: 500  $\mu$ m, para C: 1 mm.

rente con el inferido mediante otros criterios y con el sentido de cizalla deducido del estudio de las orientaciones de límites de subgrano.

Superpuesto a las microtexturas descritas se pueden reconocer estructuras tales como extinción ondulante y desarrollo variable de lamelas de deformación con una distribución ligeramente asimétrica que permiten inferir un proceso tardío de retrabajamiento en frío ("cold working"; Fig. 3 c).

Existen varios rasgos microtexturales que se asumen como indicativos de procesos post-deformacionales de crecimiento de grano ("annealing"). Entre ellos cabe citar la existencia de límites de grano irregulares en todas direcciones, la tendencia que muestran a rectificarse para formar una textura en mosaico que oblitera la textura estable alcanzada durante la milonitización, la existencia de uniones triples, así como la presencia de minerales orientados (mica, epidota y/o anfíbol) que definen la folia-

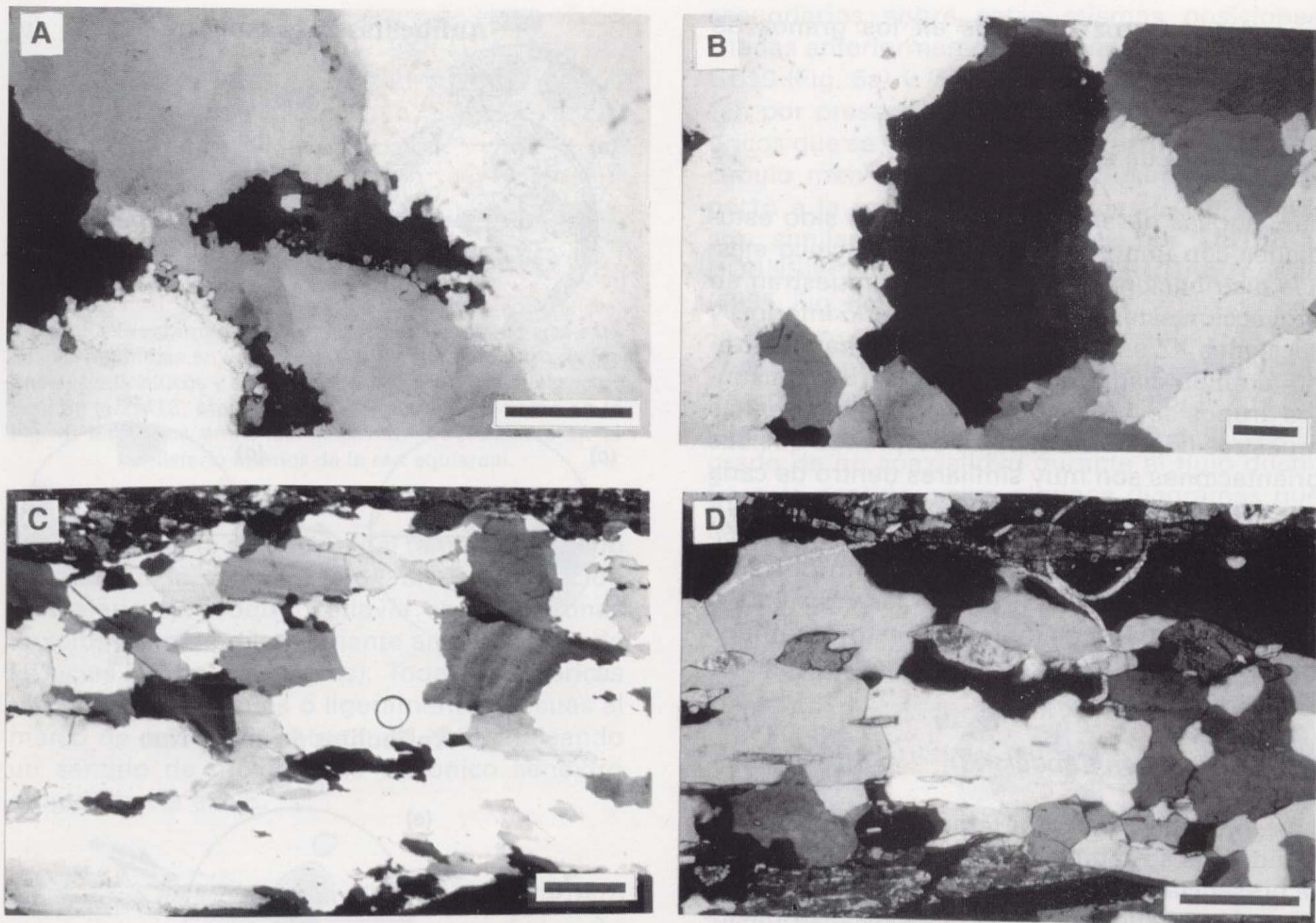


Figura 3.- Microestructuras de deformación plástica presentes en las venas de cuarzo encajadas en las unidades estudiadas. (A) Recristalización dinámica por migración de límite de grano (límites de grano irregulares y con indentaciones en otros granos, "bulging") y por rotación de subgranos evidenciada (textura de tipo núcleo-manto "core-mantle") presente en la muestra GC10 (sector Este de la ZMTC). (B) Textura en mosaico en una vena hospedada en el sector Oeste de la ZMTC (muestra GM9-XZ1). (C) Extinción ondulante y desarrollo variable de deformación lamelar correspondiente al retrabajamiento en frío (muestra FC25), mostrando también subjuntas prismáticas que aparecen ofreciendo una distribución ligeramente asimétrica y con orientación variable respecto a la foliación. (D) Crecimiento de grano postdeformacional evidenciado por la aparición de granos sin apenas deformación interna con límites de grano ligeramente abultados tendentes a rectificar dichos límites y a obliterar la textura alcanzada durante la milonitización. También existen algunos puntos triples así como minerales orientados que definen la foliación de la matriz (micas) incluidos en los granos de cuarzo (muestra GM5-XZ1). Secciones estructurales XZ. Nícoles cruzados. Barras de escala para las microfotografías A, B y D: 500  $\mu$ m, para C: 1 mm.

rente con el inferido mediante otros criterios y con el sentido de cizalla deducido del estudio de las orientaciones de límites de subgrano.

Superpuesto a las microtexturas descritas se pueden reconocer estructuras tales como extinción ondulante y desarrollo variable de lamelas de deformación con una distribución ligeramente asimétrica que permiten inferir un proceso tardío de retrabajamiento en frío ("cold working"; Fig. 3 c).

Existen varios rasgos microtexturales que se asumen como indicativos de procesos post-deformacionales de crecimiento de grano ("annealing"). Entre ellos cabe citar la existencia de límites de grano irregulares en todas direcciones, la tendencia que muestran a rectificarse para formar una textura en mosaico que oblitera la textura estable alcanzada durante la milonitización, la existencia de uniones triples, así como la presencia de minerales orientados (mica, epidota y/o anfíbol) que definen la folia-

ción de la matriz incluidos en los granos de cuarzo (fig. 3d).

### 3.3. Fábricas de ejes-c de cuarzo

Las fábricas de ejes-c de cuarzo han sido estudiadas con una platina universal de cinco ejes. Las distribuciones encontradas se muestran en proyección estereográfica (hemisferio inferior) y secciones XZ en las figs. 4, 5 y 6. Se han realizado también diagramas de ejes-c para los distintos grupos de tamaño de grano presentes en las muestras (Fig. 7). De ellos se desprende que sus orientaciones son muy similares dentro de cada muestra, y que la recristalización dinámica por rotación progresiva de subgranos fue un mecanismo de deformación dúctil importante (POIRIER y NICOLAS, 1975). En las Figs. 7a y b se muestran dos ejemplos de este fenómeno representativos de las dos unidades estudiadas.

#### 3.3.1. Formación Candelaria

Las muestras estudiadas en la Formación Candelaria se caracterizan en muchos casos por la presencia de máximos de ejes-c próximos a la dirección estructural X (Fig. 4). Tales distribuciones de ejes-c indican una deformación de temperatura alta ( $\geq 650$  °C), capaz de activar el sistema de deslizamiento intracrystalino prismático según [c] (MAINPRICE et al., 1986). Las venas encajadas dentro de anfibolitas de grano grueso (Fig. 4a,b,c,d) muestran algunas evidencias de que la deformación, además de tener lugar a alta temperatura, posiblemente estuvo condicionada por la presencia de fluidos. La muestra FC38 (perteneciente a una vena plegada) exhibe además de anterior máximos entre X e Y y paralelamente a la dirección estructural Y (este último indicativo de deslizamiento prismático según <a>; SCHMID y CASEY, 1986). Estas distribuciones de ejes c son también características de deformaciones a temperaturas relativamente altas, por encima de 500 °C. Además de estos máximos están presentes concentraciones menores de ejes-c en torno a Z (e.g.: OKUDAIRA et al., 1995, Fig. 7b), indicando un deslizamiento basal según <a> propio de temperaturas más bajas alcanzadas durante un retrabajamiento a temperatura menor.

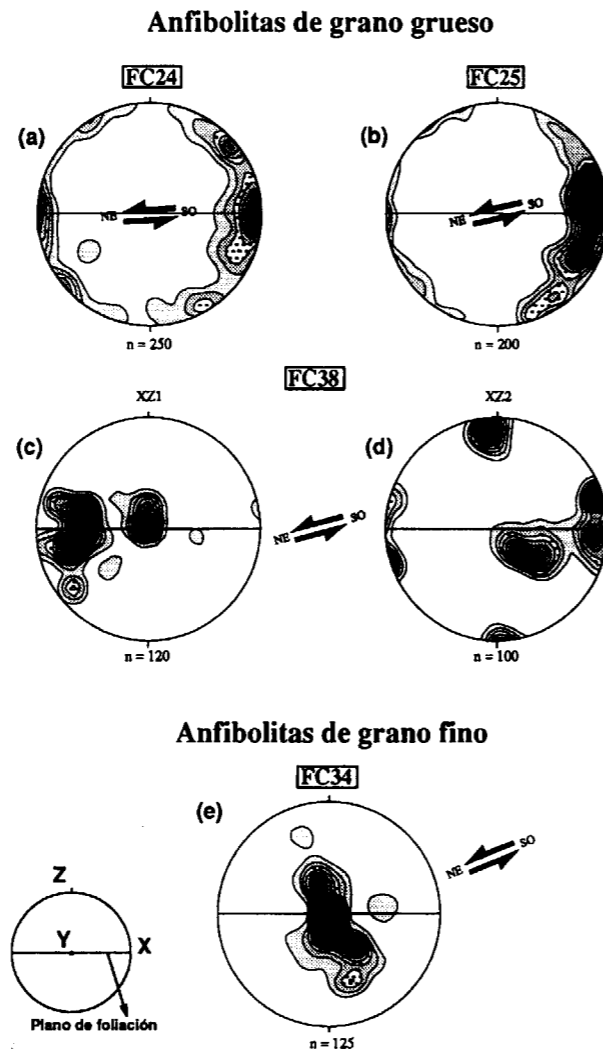


Figura 4.— Diagramas de orientación preferente de ejes-c de cuarzo obtenidos en venas de la Formación Candelaria. Las fábricas de ejes-c mostradas en (a), (b), (c) y (d) corresponden a venas encajadas en anfibolitas de grano grueso, mientras que en (e) se exhibe la fábrica de una vena encajada en una anfibolita de grano fino. Todas las fábricas de ejes-c son presentadas en secciones estructurales XZ, con "n" indicando el número de medidas. Intervalos entre isolinéas:  $1\sigma$ . Proyecciones en el hemisferio inferior de la red equiareal.

Dentro de las anfibolitas de grano fino (milonitizadas; Fig. 4e) se pueden reconocer fábricas de ejes-c con una guirnalda única (distribución de tipo I de LISTER, 1977) oblicua al referencial XYZ. Tales guirnaldas aparecen definidas por un máximo de ejes-c sobre Y y dos submáximos sobre posiciones romboédricas. Estas fábricas

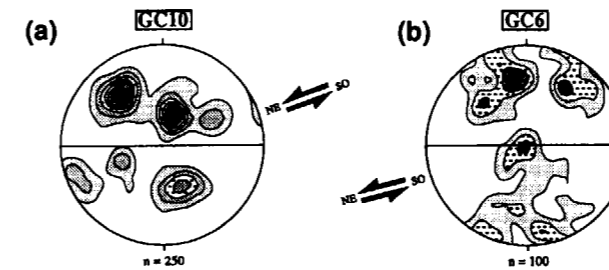


Figura 5.— Diagramas de orientación preferente de ejes-c de cuarzo obtenidos en venas y cintas de cuarzo dentro de los gneises miloníticos y blastomiloníticos situados en el sector Este de la ZMTC. Marco referencial estructural como en la Fig. 4. Intervalos entre isolinéas:  $1\sigma$ . Proyecciones en el hemisferio inferior de la red equiareal.

indicarían que la reducción del tamaño de grano asociada a la milonitización en la Formación Candelaria se produjo todavía en condiciones de temperaturas relativamente altas (propias de la facies de las anfibolitas). Todas las fábricas referidas son oblicuas o ligeramente oblicuas al marco de referencia estructural XYZ, indicando un sentido de movimiento tectónico senestro dirigido hacia el NE.

#### 3.3.2. Zona de Movimiento Tectónico de Carreiro

Las fábricas de ejes-c correspondientes a la ZMTC (Fig. 5 y 6) incluyen guirnaldas simples (muestra GM5) o dobles (muestras GC10, GC6 y GM9), estas últimas con desarrollo desigual. Los diagramas están definidos por distribuciones más o menos complejas que caracterizan una deformación en condiciones de temperatura de grado medio y alto. Las muestra GM4 presenta máximos de ejes-c próximos a X (Fig. 6b y c) denotando la activación de los sistemas de deslizamiento intracrystalino de AT. Además, contiene máximos menores cercanos a Z. La sección GM7 (Fig. 6a) exhibe un máximo principal entre Y y X (LISTER y DORNSIEPEN, 1982) junto con pequeñas concentraciones de ejes-c próximas a X. Las secciones GC6 y GM5 aparecen mostrando guirnaldas con diferentes máximos principales: cercanos a Z (característicos de deformaciones a temperatura baja; Fig. 5b y 6i), entre Y y Z (deslizamiento romboédrico según <a>, Fig. 6f), sobre Y (Fig. 6h), y entre Y y X (Fig. 6g). No obstante también incluyen un conjunto de máximos

secundarios sobre estas mismas posiciones citadas anteriormente. Finalmente, las muestras GC10 (Fig. 5a) y GM9 (Fig. 6d y e) se caracterizan por presentar máximos puntuales romboédricos que se disponen a modo de guirnaldas de círculo menor alrededor de Z asimétricas respecto a la foliación. Las fábricas GC10 y GM9 son similares a las obtenidas por LISTER y DORNSIEPEN (1982, Fig. 4i) y OKUDAIRA et al. (1995, Fig. 6c), respectivamente.

Todas las muestras exhiben una ligera oblicuidad con respecto al marco estructural XYZ, la cual es interpretada como debida a un cierto grado de no coaxialidad durante el flujo dúctil. En este sentido, salvo algunos diagramas que resultan ambiguos para una deducción adecuada del sentido de movimiento tectónico (GM9 y

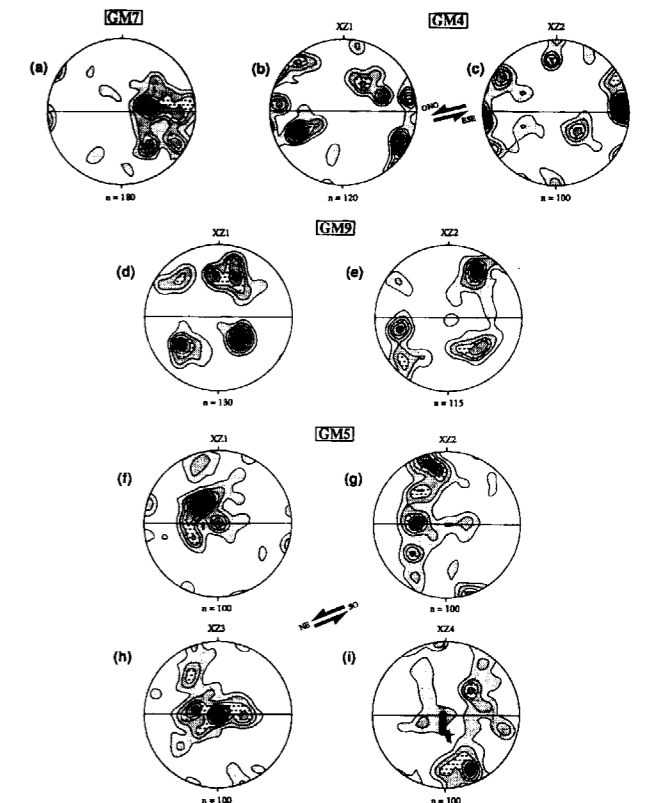


Figura 6.— Diagramas de orientación preferente de ejes-c de cuarzo obtenidos en venas y cintas de cuarzo dentro de los gneises con abundancia de metabasitas situados en el sector Oeste de la ZMTC. Marco referencial estructural como en la Fig. 4. Intervalos entre isolinéas:  $1\sigma$ . Proyecciones en el hemisferio inferior de la red equiareal.



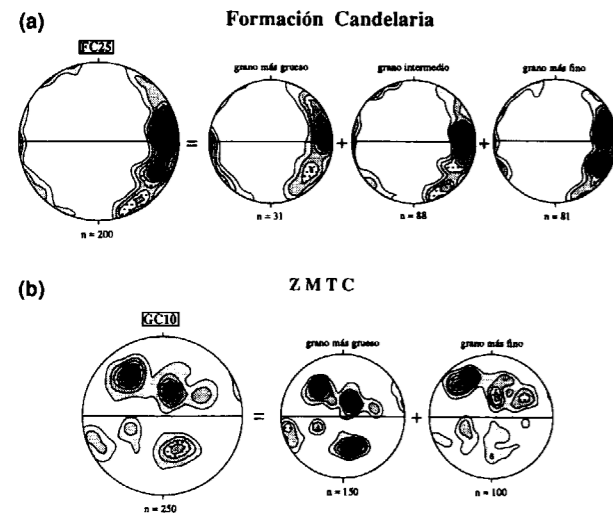


Figura 7.- Representación gráfica de diagramas de ejes correspondientes a los distintos grupos de tamaño de grano presentes en cada muestra. Se observa que los diagramas son muy similares dentro de cada muestra demostrando la importancia de la recristalización dinámica por rotación progresiva de subgranos en la deformación dúctil del cuarzo. En la figura se expone un ejemplo de este fenómeno para cada unidad: (a) muestra FC25 (Formación Candelaria) y (b) GC10 (ZMTC). Marco referencial estructural como en la Fig. 4.

GM7); la mayor parte de las fábricas indican también un movimiento de los bloques de techo hacia el NE. La muestra GM4 indica un sentido de movimiento hacia el ONO. Este hecho puede ser debido a que fue recogida cerca de la zona de charnela de un pliegue en vaina, de ahí su orientación diferente.

#### 4. CONDICIONES DE LA DEFORMACION

##### 4.1. Introducción

La mayoría de los minerales constituyentes de las unidades tectónicas descritas presentan evidencias de deformación dúctil (extinción ondulante generalizada, subgranos, maclas de deformación, etc.). El análisis de fábrica de las venas de cuarzo deformadas descritas en el apartado anterior, junto con leyes cinéticas de crecimiento de grano, geopiezómetros, y leyes de flujo derivadas teórico-experimentalmente, permiten restringir las condiciones de deformación y el comportamiento reológico de la Formación Candelaria y la Zona de Movimiento Tectónico

de Carreiro. Ejemplos de este tipo de estudio han sido publicados previamente por (HACKER et al., 1990 y 1992; PRIOR et al., 1990 y ABALOS et al., 1996).

A partir de los estudios experimentales realizados sobre metales o materiales cerámicos se ha podido determinar que hay tres parámetros fundamentales que dependen directamente del nivel de esfuerzos aplicados (NICOLAS y POIRIER, 1976): la densidad de dislocaciones, el tamaño de los subgranos y el tamaño de los granos nuevos producto de la recristalización dinámica. Estas relaciones también se han encontrado en las rocas mediante estudios de deformación experimental u observaciones empíricas (MERCIER et al., 1977; BURG y LAURENT, 1978; ETHERIDGE y WILKIE, 1981; ORD y CHRISTIE, 1984). El último parámetro citado, el tamaño de grano resultante de la recristalización dinámica, es el que se puede medir con mayor facilidad en la práctica, considerándose además el menos sensible a los reajustes posteriores al estado de equilibrio alcanzado durante la deformación (estado estacionario de la deformación). La determinación del tamaño de grano permite calcular los esfuerzos diferenciales prevalecientes durante la deformación de las unidades estudiadas, asumiendo que se cumplen las condiciones generales para un estudio geopiezométrico fiable (TWISS, 1977). Se asume, por lo tanto, que tras la deformación plástica estacionaria por movimiento o reptación de dislocaciones (creep), los esfuerzos diferenciales decaen. El tamaño de los granos de cuarzo recristalizado tenderá a crecer si las temperaturas se mantienen lo suficientemente altas durante lapsos de tiempo considerables. En consecuencia, el tamaño de grano promedio final es el que resulta del crecimiento de grano postdeformacional debido a procesos de annealing. El crecimiento del tamaño de grano implica, en el contexto de los cálculos geopiezométricos, que los esfuerzos diferenciales calculados son menores que los prevalecientes durante la deformación dúctil.

##### 4.2. Determinación del tamaño de grano final ( $\bar{L}$ )

Para determinar el tamaño de grano inicial ( $\bar{L}_0$ ) del cuarzo recristalizado dinámicamente, el

punto de partida consiste en medir el tamaño de grano final ( $\bar{L}$ , el que se observa en las muestras), el cual es producto de la modificación de tamaño inicial por los procesos de annealing post-deformacional.

Con este propósito se ha usado un método de medición consistente en determinar (en secciones XZ) las dimensiones, larga según la dirección estructural X y corta según la dirección estructural Z (perpendicular a X) de cada grano. La combinación de ambas medidas utilizando la media geométrica permite calcular el tamaño de cada grano de cuarzo. La representación gráfica de los datos obtenidos para cada muestra en diagramas de frecuencias permite establecer que las correspondientes curvas de distribución de frecuencias son del tipo log-normal. De estas distribuciones de frecuencias se han tomado como parámetros estadísticos representativos la media aritmética, la desviación estandar y el skewnes o grado de asimetría de la curva (Tabla 1). La media aritmética así calculada se considera como valor representativo del tamaño de grano medio ( $\bar{D}$ ). En las muestras GM4 y FC38 el tamaño de grano se ha determinado de una forma diferente. En este caso se ha calculado la media geométrica de las tres medias aritméticas que resultan de las tres distribuciones de frecuencia log-normal correspondientes a las dimensiones medidas según las direcciones X, Y y Z respectivamente.

Los skewnes toman valores en su mayoría negativos (cola larga de la curva hacia los valores de tamaño de grano menor) que indican que la reducción del tamaño de grano predomina sobre el crecimiento de grano durante el proceso de deformación (MICHIBAYASHI, 1993). De este modo, el crecimiento de grano y la recristalización compiten en un equilibrio dinámico para alcanzar el tamaño de grano del estado estacionario. En este proceso el tamaño de grano individual recristalizado dinámicamente no es necesariamente estable aunque si lo sea el tamaño de grano medio de la muestra estabilizado en torno al tamaño de grano del estado estacionario (REE, 1991). Debido a ello los tamaños de los granos cambiarían a medida que la milonitización progresa. Este hecho explicaría la acusada heterometría del tamaño de grano y de ahí las elevadas desviaciones estandar del tamaño de grano medio ( $\bar{D}$ ) en las diferentes secciones.

Finalmente, antes de su introducción en las ecuaciones geopiezométricas, los valores del tamaño de grano medio ( $\bar{D}$ ) han sido multiplicados por una constante o factor de forma (generalmente = 1.5) que resulta en los valores del tamaño de grano final ( $\bar{L}$ ). Los resultados aparecen expuestos en la Tabla 2 en formato no logarítmico.

##### 4.3. Determinación del tamaño de grano inicial ( $\bar{L}_0$ )

Las leyes cinéticas que rigen el crecimiento de los granos de cuarzo derivadas de forma experimental como una función de la presión y la temperatura (TULLIS y YUND, 1982; PIERCE, 1987; PIERCE y CHRISTIE, 1987) se han empleado para inferir el tamaño de grano durante el flujo dúctil estacionario del cuarzo. La presión y temperatura bajo las cuales tuvo lugar la deformación deben ser conocidas previamente (a través de estudios termobarométricos y de fábrica), al igual que la velocidad de enfriamiento (por medio de estudios geocronológicos).

De acuerdo con PIERCE (1987), el tamaño de grano final L de los granos de cuarzo que sufrie-

Tabla 1: Valor logarítmico del tamaño de grano medio (Log  $\bar{D}$ ) y valor del skewnes de las distribuciones log-normal del tamaño de grano de las diferentes muestras

Muestra	Nº granos	log D	Skewnes
<b>Z.M.T.C.</b>			
<b>Gneises de la banda Oeste</b>			
GM4	200	3.032 ± 0.395	< 0
GM7-XZ	110	2.816 +0.137/-0.238	- 0.179
GM9-XZ1	58	3.220 ± 0.241	+ 0.350
GM9-XZ2	110	3.024 ± 0.329	- 0.11
GM5-XZ1	100	2.551 ± 0.311	- 0.695
GM5-XZ2	100	2.755 ± 0.382	+ 0.083
GM5-XZ3	100	2.636 ± 0.301	- 0.426
GM5-XZ4	120	2.806 ± 0.356	- 0.118
<b>Gneises de la banda Este</b>			
GC10-XZ			
de grano más fino	50	1.890 ± 0.298	- 0.237
de grano más grueso	70	3.157 ± 0.319	- 0.520
GC6-XZ	80	2.682 ± 0.359	- 0.094
<b>Formación Candelaria</b>			
<b>Bandas de grano más grueso</b>			
FC24-XZ	170	2.874 ± 0.348	- 0.470
FC25-XZ	150	2.747 ± 0.332	- 0.152
FC38	145	2.935 ± 0.379	< 0
<b>Bandas de grano más fino</b>			
FC34-XZ	80	2.867 ± 0.349	- 0.329

ron annealing postdeformacional está relacionado con el tamaño de grano inicial  $L_0$  (ambos en  $\mu\text{m}$ ) por la expresión:

$$\bar{L} = \sqrt{ct + L_0^2} \quad (1)$$

donde  $t$  es el tiempo y  $c$  es una variable dada por:

$$c = c_0 * e^{\frac{(H+PV^*)}{RT}} \quad (2)$$

En esta fórmula (2)  $c_0$  es una constante pre-exponencial,  $H$  es la energía de activación,  $P$  la presión,  $V^*$  el volumen,  $R$  la constante de los gases y  $T$  es la temperatura absoluta, la cual depende a su vez de la temperatura reinante al final de la milonización ( $T_0$ ), del tiempo y de la tasa de enfriamiento (CR) según:

$$T = T_0 - CRt \quad (3)$$

Los valores y unidades de estas constantes se dan en la Tabla 3.

Por sustitución de (2) y (3) en (1) se obtiene la ecuación:

$$\bar{L} = \sqrt{L_0^2 + c_0 t e^{\frac{(H+PV^*)}{T_0 - CRt}}} \quad (4)$$

la cual puede ser escrita también como:

$$\bar{L} = \sqrt{L_0^2 + 7.47 \cdot 10^{-4} t e^{\frac{1.86 \cdot 10^{-8} P - 33.80}{T_0 - CRt}}} \quad (5)$$

Esta última fórmula permite el cálculo de las trayectorias de enfriamiento y de crecimiento de los granos de cuarzo tras la milonización asumiendo: (1) que el creep del estado estacionario dio lugar a un tamaño de grano controlado por los esfuerzos diferenciales, y (2) que la deformación cesó instantáneamente dando paso a un proceso de annealing durante un proceso de enfriamiento en ausencia de esfuerzos diferen-

ciales. Estas suposiciones, no obstante, constituyen grandes simplificaciones acerca de las historias de esfuerzos y temperatura de las rocas deformadas plásticamente.

#### 4.4. Determinación de las temperaturas de deformación y annealing

De la expresión (4) resulta evidente que el tamaño de grano  $\bar{L}$  depende de  $L_0$  y  $T_0$ . Para un tamaño de grano inicial ( $L_0$ ), si la temperatura a la cual cesa la milonización ( $T_0$ ) es suficientemente alta, el tamaño de grano crecerá por encima de  $\bar{L}$  cualquiera que sea el valor de  $L_0$  para una tasa de enfriamiento dada. Esto pone un límite inferior a la temperatura del flujo dúctil del estado estacionario antes del annealing ( $T_{\text{máx}}$ ). De la misma manera, si  $T_0$  es demasiado baja, los granos de cuarzo no crecerán nada, dado que el annealing es inhibido. Este hecho coloca un límite de temperatura inferior ( $T_{\text{mín}}$ ) a los procesos de annealing por debajo del cual no pueden tener lugar. Ambos límites térmicos,  $T_{\text{máx}}$  y  $T_{\text{mín}}$ , pueden ser determinados mediante cálculos iterativos e integración numérica, siempre que el tamaño de grano final ( $\bar{L}$ ),  $P$  y  $CR$  sean conocidos.

Una vez conocida  $T_{\text{máx}}$  ( $= T_0$ ), la ecuación (4) puede reescribirse como sigue:

$$\bar{L}_0 = \sqrt{L^2 - \int_{t=0}^{t=\frac{T_0 - 250^\circ\text{C}}{CR}} c_0 t e^{\frac{(H+PV^*)}{R(T_0 - CRt)}} dt} \quad (6)$$

Esta última expresión permite calcular, mediante integración numérica, el tamaño inicial ( $L_0$ ) de los granos de cuarzo recristalizados dinámicamente, eliminando los efectos debidos al recrecimiento postectónico por annealing. El límite de integración superior ha sido restringido asumiendo una historia de enfriamiento hasta  $250^\circ\text{C}$ . Por debajo de esta temperatura la deformación plástica del cuarzo por creep de dislocaciones es improbable en la naturaleza

(RUTTER, 1976). En cualquier caso, la integral (6) converge y se aproxima a un límite a temperaturas mayores, cercanas a  $400^\circ\text{C}$ , por lo que en la práctica se puede considerar que por debajo de  $400^\circ\text{C}$  los granos prácticamente no crecen.

No obstante todo lo anterior, la clave para determinar las temperaturas precisas que fijan el annealing ( $T_{\text{máx}}$  y  $T_{\text{mín}}$ ) en función de la amplia gama de variables existentes (ABALOS et al., 1996), y a partir de ellas determinar el tamaño de grano inicial ( $L_0$ ); reside de la integral numérica:

$$\int_{t=0}^{t=\frac{T_0 - 250^\circ\text{C}}{CR}} c_0 t e^{\frac{(H+PV^*)}{R(T_0 - CRt)}} dt \quad (7)$$

Esta integral debe tomar valores comprendidos entre 0 y  $L^2$ , para que de ese modo la raíz cuadrada de la ecuación (6) dé como resultado un número positivo. La tasa de enfriamiento (CR) es la variable fundamental que condiciona los valores de las demás. Para el caso de Cabo Ortegá, CR puede establecerse a partir de datos geocronológicos publicados (GIL IBARGUCHI et al., 1990; DALLMEYER et al., 1993; SCHÄFER et al., 1993) como una tasa de enfriamiento lineal de  $c. 17^\circ\text{C}/\text{Ma}$  (ABALOS et al., 1996).

En la Tabla 2 se presentan los resultados obtenidos para el cálculo de los valores precisos de  $L_0$ ,  $T_{\text{máx}}$  y  $T_{\text{mín}}$  en las diferentes muestras, asumiendo  $CR = 17^\circ\text{C}/\text{Ma}$  y  $P = 1.15 \text{ GPa}$  (SANTOS ZALDUEGUI 1995). Dada la evidencia textural de un annealing en todas las secciones estudiadas, podemos admitir que la plasticidad intracristalina del cuarzo en las venas de la Formación Candelaria tuvo lugar a temperaturas que alcanzaron  $590^\circ\text{C}$ , en consonancia con las microestructuras y fábricas de ejes-c de cuarzo observadas (Fig. 4). Dentro de la ZMTC la milonización se produjo en condiciones de temperatura comprendidas entre  $600^\circ\text{C}$  y  $500^\circ\text{C}$ , congruentes con las microestructuras y fábricas de ejes-c obtenidas (Fig. 5 y 6). En ambas unidades el annealing se habría iniciado a las temperaturas más altas citadas ( $590\text{-}600^\circ\text{C}$ ) y habría inducido un crecimiento de grano postdeformacional de aproximadamente el 20% del tamaño de grano inicial.

En la Tabla 2 se presentan también las duraciones estimadas para el proceso de annealing sufrido por los granos de cuarzo en las distintas muestras. Se observa que el annealing se habría producido durante períodos de tiempo que oscilan entre 4 y 6 Ma, inmediatamente después del cese de la deformación dúctil del cuarzo. Es necesario recalcar que todas estas estimaciones se hacen simplificando considerablemente la

Tabla 2

Muestra	Tamaño de grano final ( $\mu\text{m}$ ) $\bar{L} = 1.5 * \bar{D}$	T máx. al inicio del annealing ( $^\circ\text{C}$ )	T mín. del annealing ( $^\circ\text{C}$ )	Tamaño de grano inicial $L_0$ ( $\mu\text{m}$ )	Duración del annealing (Ma)
GM4	1613 +2391/-963	602	493	1343 +1997/-807	5.80
GM7-XZ	983 +1349/-568	582	477	809 +1137/-470	5.48
GM9-XZ1	2487 +1842/-1058	621	507	2074 +1527/-888	5.91
GM9-XZ2	1584 +1793/-841	602	492	1307 +1509/-692	5.69
GM5-XZ1	534 +558/-273	557	459	442 +461/-229	4.12
GM5-XZ2	853 +1205/-499	576	472	704 +1003/-415	5.30
GM5-XZ3	648 +648/-324	565	464	534 +541/-270	4.22
GM5-XZ4	960 +1217/-537	581	476	790 +1025/-445	4.60
GC10-XZ					
de grano más fino	116 +115/-58	503	416	94 +96/-46	3.45
de grano más grueso	2151 +2333/-1119	615	502	1784 +1970/-935	6.01
GC6-XZ	722 +927/-406	569	467	597 +774/-339	4.25
FC24-XZ	1123 +1378/-514	587	481	930 +1161/-619	5.50
FC25-XZ	838 +960/-448	575	472	694 +799/-375	5.22
FC38	1293 +1802/-753	593	485	1070 +1509/-626	5.80
FC34-XZ	1104 +1360/-609	586	480	917 +1130/-513	5.44

Tabla 3: Valores y unidades de las constantes (a partir de PIERCE, 1987) y variable respectivamente, usadas para calcular el tamaño de grano original y limitar la temperatura del flujo del estado estacionario y del annealing

Constantes	
Constante pre-exponencial ( $c_0$ )	$7.47 \times 10^{-4} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$
Entalpía de activación (H)	281 kJ/mol
Volumen de activación ( $V^*$ )	$-1.86 \times 10^{-8} \text{ m}^3\text{mol}^{-1}$
Constante de los gases (R)	$8.314 \text{ J}^\circ\text{K}^{-1}\text{mol}^{-1}$
Unidades variables	
Tiempo (t)	s
Presión (P)	GPa
Temperatura (T)	°K
Tasa de enfriamiento (CR)	°Ks <sup>-1</sup> (1°C/Ma = $3.169 \times 10^{-14} \text{ }^\circ\text{Ks}^{-1}$ )

historia de esfuerzos y la evolución térmica (HACKER et al., 1992). Nuestros resultados contrastan con los de TULLIS y YUND (1982), que proponen períodos de crecimiento relativamente rápidos (de unos cientos a miles de años) bajo las condiciones metamórficas convencionales. Sin embargo, ellos prevén que, presumiblemente, las tasas de crecimiento en la naturaleza podrían ser considerablemente más bajas, incluso extremadamente lentas para los sistemas relativamente anhidros.

#### 4.5. Determinación del esfuerzo diferencial

El tamaño de grano inicial ( $\bar{L}_0$ ) calculado y expuesto en la Tabla 2 para las diferentes muestras estudiadas se ha usado para determinar los esfuerzos diferenciales prevalecientes durante la deformación plástica en cada caso. Este cálculo se realizó utilizando los geopiezómetros de TWISS (1977, 1980), MERCIER et al. (1977), WHITE (1979), ETHERIDGE y WILKIE (1981), KOCH (1983) y ORD y CHRISTIE (1984), basados en el tamaño de grano recristalizado dinámicamente. Todos estos obedecen a ecuaciones del tipo:

$$\sigma = \left( \frac{\bar{L}_0}{b} \right)^r \quad (8)$$

donde " $\sigma$ " es el esfuerzo diferencial (MPa), y " $b$ " y " $r$ " son constantes determinadas experimentalmente cuyos valores son presentados en la Tabla 4. En principio, se han seguido preferencialmente la relación teórica de TWISS (1977, 1980) y los geopiezómetros experimentales de

KOCH (1983). La primera porque es más congruente con los nuevos resultados experimentales sobre esfuerzos de flujo obtenidos por GLEASON y TULLIS (1993, 1995). Los últimos por estar basados en datos combinados de experimentos de deformación en condiciones anhidras y en presencia de fluidos en un amplio rango de presiones, temperaturas y velocidades de deformación. En cualquier caso, es necesario realizar alguna extrapolación a esfuerzos más bajos que aquellos mantenidos durante los experimentos (50-2000 MPa). A este respecto, y en vista de los nuevos resultados de GLEASON y TULLIS (1993, 1995), parece que el geopiezómetro de KOCH (1983) a bajos esfuerzos diferenciales es menos sensible para granos recristalizados que la relación de TWISS (1977, 1980).

Tabla 4: Valores de las constantes usadas para el cálculo de los esfuerzos diferenciales

Fuente	b (µmMPa <sup>-R</sup> )	r
Twiss (1977, 1980)	$1.45 \times 10^4$	-1.47
Mercier et al. (1977)	$4.07 \times 10^3$	-1.40
White (1979)	$1.29 \times 10^4$	-1.43
Etheridge y Wilkie (1981)	$1.42 \times 10^4$	-1.47
Koch (1983)	$4.90 + 0.47/-0.43 \times 10^2$	$-0.59 \pm 0.2$
Ord y Christie (1984)	$1.78 \times 10^3$	-0.90

En la Tabla 5 se presentan los valores de los esfuerzos diferenciales calculados para las muestras analizadas (ver también la Fig. 8). En el caso de las microestructuras de cuarzo de la Formación Candelaria, deformadas bajo temperaturas por encima de 590 °C, se han obtenido esfuerzos diferenciales muy bajos (<8 MPa) tanto para las venas encajadas en la facies anfíbolítica de grano más fino (milonitización más intensa), como para las encajadas en las anfíbolitas de grano más grueso. Por su parte, las deformaciones de más alta temperatura (por encima de 600 °C) registradas en la ZMTC, tuvieron lugar bajo esfuerzos diferenciales igualmente bajos (<11 MPa). No obstante, en esta unidad se obtuvieron esfuerzos diferenciales superiores a 30 MPa para la deformación dúctil del cuarzo a temperaturas más bajas (en torno a 500 °C) en el seno de gneises intensamente deformados.

Las venas de cuarzo de las cuales fueron recogidas las muestras constituyen pequeños cuerpos

Tabla 5: Esfuerzos diferenciales (MPa)

Muestra	Twiss (1977, 1980)	Mercier et al. (1977)	White (1979)	Etheridge y Wilkie (1981)	Koch (1983)	Ord y Christie (1984)
GM4	5.0 +2.3/-1.4	2.2 +1.1/-0.6	4.9 +2.3/-1.4	5.0 +2.3/-1.4	0.2 ±0.1	1.4 +0.9/-0.6
GM7-XZ	7.1 +3.2/-1.9	3.2 +1.5/-0.9	6.9 +3.2/-1.9	7.0 +3.2/-1.9	0.4 +0.3/-0.2	2.4 +1.5/-1.0
GM9-XZ1	3.8 +1.2/-0.8	1.6 +0.5/-0.4	3.6 +1.1/-0.8	3.7 +1.2/-0.8	0.1 +0.1/-0.0	0.8 +0.4/-0.3
GM9-XZ2	5.1 +2.1/-1.3	2.3 +0.9/-0.6	5.0 +2.1/-1.3	5.1 +2.1/-1.3	0.2 ±0.1	1.4 +0.8/-0.5
GM5-XZ1	10.8 +4.1/-2.7	4.9 +2.0/-1.3	10.6 +4.2/-2.7	10.6 +4.1/-2.6	1.2 +0.8/-0.6	4.7 +2.6/-1.7
GM5-XZ2	7.8 +3.5/-2.4	3.5 +1.6/-1.1	7.6 +3.5/-2.4	7.7 +3.5/-2.4	0.5 +0.4/-0.3	2.8 +1.8/-1.3
GM5-XZ3	9.4 +3.6/-2.3	4.3 +1.7/-1.1	9.3 +3.6/-2.3	9.3 +3.5/-2.3	0.9 +0.6/-0.4	3.8 +2.1/-1.4
GM5-XZ4	7.2 +3.1/-1.9	3.2 +1.4/-0.9	7.0 +3.1/-1.9	7.1 +3.1/-1.9	0.4 +0.3/-0.2	2.5 +1.5/-1.0
GC10-XZ						
de grano más fino	30.9 +11.8/-7.4	14.8 +5.8/-3.7	31.3 +12.2/-7.7	30.4 +11.6/-7.3	16.5 +11.5/-8.2	26.3 +14.3/-9.5
de grano más grueso	4.2 +1.7/-1.0	1.8 +0.7/-0.5	4.0 +1.6/-1.0	4.1 +1.6/-1.0	0.1 ±0.1	1.0 +0.6/-0.4
GC6-XZ	8.8 +3.8/-2.3	3.9 +1.8/-1.1	8.6 +3.8/-2.3	8.6 +3.7/-2.3	0.7 +0.5/-0.4	3.4 +2.0/-1.3
FC24-XZ	6.5 +2.7/-1.9	2.9 +1.3/-0.9	6.3 +2.7/-1.9	6.4 +2.7/-1.9	0.3 +0.3/-0.2	2.1 +1.2/-0.9
FC25-XZ	7.9 +3.2/-2.0	3.5 +1.5/-0.9	7.7 +3.2/-2.0	7.8 +3.2/-2.0	0.6 +0.4/-0.3	2.8 +1.6/-1.1
FC38	5.9 +2.7/-1.6	2.6 +1.2/-0.7	5.7 +2.6/-1.6	5.8 +2.6/-1.6	0.3 +0.2/-0.1	1.8 +1.1/-0.7
FC34-XZ	6.5 +2.8/-1.7	2.9 +1.3/-0.8	6.4 +2.7/-1.7	6.5 +2.7/-1.7	0.3 +0.3/-0.2	2.1 +1.2/-0.8

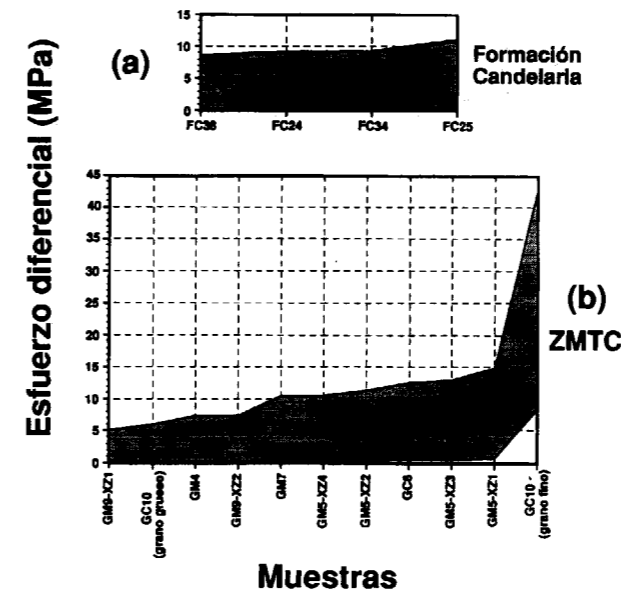


Figura 8.- Representaciones gráficas de los niveles de esfuerzo diferencial calculados para las muestras estudiadas pertenecientes a la Formación Candelaria (a) y a la ZMTC (b). Los intervalos representados por las áreas en gris incluyen el rango completo de los esfuerzos de flujo calculados con los geopiezómetros listados en las Tablas 4 y 5.

de material reológicamente más débil contenidos en el seno de una fase más resistente (metabasitas y gneises miloníticos). Este dispositivo conformaría un armazón relativamente más resistente a la deformación que portaría una

pequeña o moderada proporción de material más fácilmente deformable (HANDY, 1994), siendo el contraste de resistencia viscosa entre ambos moderado. Puesto que las porciones menos resistentes se verían forzadas a deformarse a la misma velocidad que el armazón resistente, los esfuerzos de flujo calculados para las venas de cuarzo podrían ser interpretados más bien como ligeramente inferiores que los sufridos por las rocas encajantes. Esto podría significar que el conjunto tectónico compuesto por la Formación Candelaria y la ZMTC habría estado sujeto a esfuerzos diferenciales similares o ligeramente superiores a los calculados para las venas de cuarzo.

#### 4.6. Estimaciones de las tasas de deformación durante la milonitización

Para el cálculo de las velocidades de deformación se ha utilizado una ecuación constitutiva (ley de flujo) que relaciona los esfuerzos diferenciales, la temperatura y la tasa de deformación de la siguiente forma:

$$\dot{\epsilon} = A \sigma^n e^{\frac{H}{RT}} \quad (9)$$

donde  $\dot{\epsilon}$  es la tasa o velocidad de deformación, "T" la temperatura, "A" una constante pre-exponencial, "n" el exponente, "H" la entalpía

de activación y “R” la constante de los gases; tratándose en todos los casos de constantes determinadas experimentalmente. En los cálculos se han considerado las calibraciones de las leyes de flujo para cuarcitas “anhidas” e “hidratadas” establecidas por quince autores (ver Tabla 6). En la Tabla 7 se presentan los resultados obtenidos con una selección de las leyes de flujo citadas en combinación con los esfuerzos diferenciales calculados mediante los geopiezómetros de TWISS (1977, 1980), KOCH (1983) y MERCIER et al., (1977). Para esta selección se han seguido los criterios adoptados por HACKER et al. (1992; p. 43).

Tabla 6: Valores de las constantes usadas para el cálculo de las tasas de deformación

Fuente	A (MPa <sup>n</sup> -s <sup>-1</sup> )	H (kJ/mol)	n
Heard y Carter (1967, 1968)	-	377	11
Parrish et al. (1976)			
'seco'	-	230±29	2.6±0.4
'humedo'	4.44 +19.9/-0.32·10 <sup>-2</sup>	266±23	6.5±0.8
Heard (1976)			
'humedo'	3.98 +46/-3.7·10 <sup>-2</sup>	231±28	2.6±0.4
'seco'	7.94 +623/-7.84·10 <sup>-11</sup>	243±21	5.7±0.8
Brace y Kohlstedt (1980)			
'seco'	5.0·10 <sup>-6</sup>	190	3.0
Jaoul et al. (1981)			
'humedo'	3.74·10 <sup>-2</sup>	153±21	1.2
'seco'	1.59·10 <sup>4</sup>	153±21	2.8
Shelton y Tullis (1981)			
'seco'	1.26 +0.19/-0.16·10 <sup>-3</sup>	168	2.0
Hansen (1982)			
'humedo'	3.16·10 <sup>-1</sup>	174	1.9
Hansen y Carter (1982)			
'seco'	3.47·10 <sup>-5</sup>	123	1.9
Koch (1983) *			
'seco'	1.10 +1.20/-0.58·10 <sup>-7</sup>	134±32	2.7±0.2
Koch (1983)			
'seco'	5.05±0.006·10 <sup>-6</sup>	145±17	2.6±0.15
Kronenberg (1983)			
'humedo'	2.18 +2.18/-1.45·10 <sup>-6</sup>	120±10	2.7±0.3
'seco'	5.00+2.6/-4.0·10 <sup>-6</sup>	170±20	2.9±0.3
Jaoul et al. (1984)			
'humedo'	5.30·10 <sup>-3</sup>	146±4	1.5±0.5
Kronenberg y Tullis (1984) **			
'humedo'	1.58·10 <sup>-5</sup>	134±10	2.6±0.3
Koch et al. (1989) **			
'humedo'	5.05±5.0·10 <sup>-6</sup>	145±17	2.61±0.15
'seco'	1.16+1.15/-0.58·10 <sup>-7</sup>	134±32	2.72±0.19
Gleason y Tullis (1995)			
'con fundido'	1.80·10 <sup>(-8±2)</sup>	137±34	4.0±0.9
'seco'	1.10·10 <sup>(-4±2)</sup>	223±56	4.0±0.9

\* Incluyendo datos experimentales de Heard y Carter (1968)

\*\* Constante pre-exponencial a partir de Kirby y Kronenberg (1983)

Las tasas de deformación calculadas para la Formación Candelaria para las deformaciones de temperatura más alta (>590 °C) oscilan entre 10<sup>-17</sup> y 10<sup>-14</sup> s<sup>-1</sup> (Fig. 9a). Por otro lado, en la ZMTC (Fig. 9b) las tasas de deformación determinadas para las deformaciones de más alta (> 600 °C) y más baja temperatura (≥500 °C) varían, respectivamente, entre 10<sup>-17</sup>-10<sup>-14</sup> s<sup>-1</sup> y 10<sup>-13</sup>-10<sup>-11</sup> s<sup>-1</sup>.

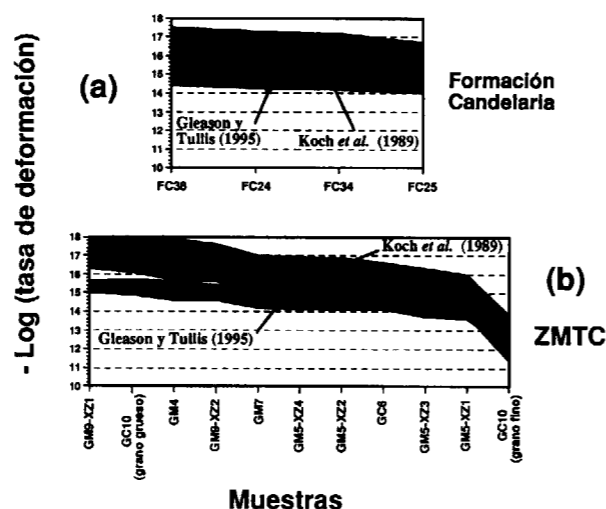


Figura 9.- Representaciones gráficas de las tasas de deformación calculadas para las muestras estudiadas pertenecientes a la Formación Candelaria (a) y a la ZMTC (b). Los intervalos retratados por áreas en gris claro corresponden al rango de valores calculados con el geopiezómetro de KOCH (1983) en combinación con la ley de flujo calibrada experimentalmente de KOCH et al. (1989). Las áreas en gris oscuro se refieren a los valores calculados con los geopiezómetros de MERCIER et al. (1977) y la ley de flujo de GLEASON y TULLIS (1994). Ver también Tabla 7.

## 5. DISCUSION

Los resultados obtenidos en los apartados anteriores permiten discutir las condiciones termomecánicas de la deformación y el comportamiento reológico de la Formación Candelaria y la ZMTC. Para la deformación coherente de un agregado policristalino los cristales deben satisfacer el criterio de VON MISES (1928) de mantener activos cinco sistemas de deslizamiento intracristalino independientes. En muchos minerales, como es el caso del cuarzo, es improbable que esta condición se cumpla, por lo que podrían activarse otros mecanismos de la deformación en los cristales con el fin de minimizar los huecos y solapamientos resultantes de una deformación heterogénea. Este hecho podría explicar la presencia mayoritaria de subjunta prismáticas, además de otro tipo de subestructuras (subgranos, subjunta basales...) en las venas de cuarzo con fábricas que muestran deslizamiento prismático según [c]; dado que las

Tabla 7: Logaritmos negativos de las tasas de deformación (s<sup>-1</sup>)

Muestra	Shelton y Tullis (1981)	Hansen (1982)	Hansen y Carter (1982)	Jaoul et al. (1984)	Kronenberg y Tullis (1984)	Gleason y Tullis (1995)	Koch et al. (1989)
Esfuerzos diferenciales a partir de: Twiss (1977, 1980)							
GM4	11.8 ± 0.2	9.8 ± 0.3	10.7 ± 0.3	10.2 ± 0.2	11.3 ± 0.7	13.7 ± 0.6	16.8 ± 1.1
GM7-XZ	11.7 ± 0.2	9.8 ± 0.2	10.6 ± 0.2	10.2 ± 0.2	11.1 ± 0.8	13.2 ± 0.7	16.0 ± 1.1
GM9-XZ1	11.7 ± 0.2	9.7 ± 0.2	10.7 ± 0.2	10.1 ± 0.2	11.4 ± 0.7	13.8 ± 0.5	17.1 ± 0.8
GM9-XZ2	11.7 ± 0.2	9.8 ± 0.2	10.7 ± 0.2	10.1 ± 0.1	11.3 ± 0.7	13.5 ± 0.6	16.6 ± 1.0
GM5-XZ1	11.6 ± 0.2	9.7 ± 0.2	10.5 ± 0.2	10.1 ± 0.2	10.8 ± 0.8	12.7 ± 0.7	14.9 ± 1.1
GM5-XZ2	11.7 ± 0.2	9.8 ± 0.3	10.6 ± 0.3	10.2 ± 0.2	11.1 ± 0.8	13.2 ± 0.7	15.8 ± 1.1
GM5-XZ3	11.6 ± 0.2	9.7 ± 0.2	10.5 ± 0.2	10.1 ± 0.2	10.9 ± 0.8	12.8 ± 0.7	15.2 ± 1.1
GM5-XZ4	11.7 ± 0.2	9.7 ± 0.2	10.6 ± 0.2	10.2 ± 0.2	11.1 ± 0.8	13.2 ± 0.7	15.9 ± 1.1
GC10-XZ							
de grano más fino	11.4 ± 0.2	9.6 ± 0.2	10.1 ± 0.2	10.1 ± 0.2	10.2 ± 1.0	11.4 ± 0.9	12.6 ± 1.3
de grano más grueso	11.8 ± 0.2	9.8 ± 0.2	10.7 ± 0.2	10.1 ± 0.2	11.4 ± 0.7	13.8 ± 0.6	17.0 ± 0.9
GC6-XZ	11.7 ± 0.2	9.7 ± 0.2	10.5 ± 0.2	10.2 ± 0.2	11.0 ± 0.8	13.0 ± 0.7	15.5 ± 1.1
FC24-XZ	11.7 ± 0.2	9.8 ± 0.2	10.6 ± 0.2	10.2 ± 0.2	11.2 ± 0.8	13.3 ± 0.6	16.2 ± 1.1
FC25-XZ	11.7 ± 0.2	9.7 ± 0.2	10.6 ± 0.2	10.2 ± 0.2	11.0 ± 0.8	13.1 ± 0.7	15.6 ± 1.1
FC38	11.8 ± 0.2	9.8 ± 0.2	10.7 ± 0.2	10.2 ± 0.2	11.2 ± 0.7	13.5 ± 0.6	16.4 ± 1.1
FC34-XZ	11.7 ± 0.2	9.8 ± 0.2	10.6 ± 0.2	10.2 ± 0.2	11.1 ± 0.8	13.3 ± 0.6	16.1 ± 1.1

Esfuerzos diferenciales a partir de: Mercier et al. (1977)

GM4	12.5 ± 0.3	10.5 ± 0.3	11.4 ± 0.3	10.7 ± 0.3	12.3 ± 0.7	15.1 ± 0.5
GM7-XZ	12.4 ± 0.2	10.4 ± 0.3	11.3 ± 0.3	10.7 ± 0.4	12.0 ± 0.7	14.7 ± 0.5
GM9-XZ1	12.5 ± 0.2	10.4 ± 0.2	11.4 ± 0.2	10.6 ± 0.3	12.3 ± 0.6	15.3 ± 0.3
GM9-XZ2	12.5 ± 0.2	10.5 ± 0.2	11.4 ± 0.2	10.7 ± 0.3	12.2 ± 0.6	15.0 ± 0.4
GM5-XZ1	12.3 ± 0.2	10.4 ± 0.2	11.1 ± 0.2	10.6 ± 0.5	11.7 ± 0.7	14.1 ± 0.5
GM5-XZ2	12.4 ± 0.2	10.5 ± 0.3	11.3 ± 0.3	10.7 ± 0.4	12.0 ± 0.7	14.6 ± 0.5
GM5-XZ3	12.3 ± 0.2	10.4 ± 0.2	11.1 ± 0.2	10.6 ± 0.5	11.8 ± 0.7	14.2 ± 0.5
GM5-XZ4	12.4 ± 0.2	10.4 ± 0.2	11.3 ± 0.2	10.7 ± 0.4	12.0 ± 0.7	14.6 ± 0.5
GC10-XZ						
de grano más fino	12.1 ± 0.2	10.2 ± 0.2	10.7 ± 0.2	10.6 ± 0.7	11.1 ± 0.9	12.7 ± 0.7
de grano más grueso	12.5 ± 0.2	10.5 ± 0.2	11.4 ± 0.2	10.7 ± 0.3	12.3 ± 0.6	15.3 ± 0.4
GC6-XZ	12.4 ± 0.2	10.4 ± 0.2	11.2 ± 0.2	10.7 ± 0.5	11.9 ± 0.7	14.4 ± 0.5
FC24-XZ	12.5 ± 0.2	10.5 ± 0.2	11.3 ± 0.2	10.7 ± 0.4	12.1 ± 0.7	14.8 ± 0.5
FC25-XZ	12.4 ± 0.2	10.4 ± 0.2	11.2 ± 0.2	10.7 ± 0.4	12.0 ± 0.7	14.5 ± 0.5
FC38	12.5 ± 0.2	10.5 ± 0.3	11.4 ± 0.3	10.7 ± 0.4	12.2 ± 0.7	14.9 ± 0.5
FC34-XZ	12.4 ± 0.2	10.4 ± 0.2	11.3 ± 0.2	10.7 ± 0.4	12.1 ± 0.7	14.7 ± 0.5

subjuntas prismáticas parecen dominar sólo en los deslizamientos intracristalinos según <a> (MAINPRICE et al., 1986; OKUDAIRA et al., 1995).

Por otra parte, el hecho de que algunas fábricas pertenecientes a la ZMTC presenten modelos de guirnalda débiles con máximos en torno a Z, podría deberse a un incremento en la deformación por cizalla hacia la parte interna de la zona de cizalla (SIMPSON, 1980).

Las microestructuras y fábricas de ejes-c descritas para las venas de cuarzo permiten estimar el esfuerzo de flujo y la tasa de deformación mini-

mos experimentados por la Formación Candelaria y la ZMTC. La deformación dúctil para ambas unidades a altas temperaturas (por encima de cerca de 600 °C) fue debida al inicio de un régimen de esfuerzos relativamente bajo (esfuerzos diferenciales inferiores a 11 MPa en general) y tasas de deformación lentas (10<sup>-17</sup>-10<sup>-14</sup> s<sup>-1</sup>). Estos resultados contrastan con los obtenidos con un método comparable por HACKER et al., (1990, 1992) en un marco tectónico bastante diferente (como es el de los "core complex"). En estos terrenos la deformación ocurrió bajo esfuerzos diferenciales más altos y tasas de deformación dos o tres órdenes de magnitud

más rápidas. Los esfuerzos diferenciales estimados por estos autores pertenecen al régimen de deformación de esfuerzos moderados de TWISS y MOORES (1992), situado entre 20 y 200 MPa para la mayor parte de los minerales y rocas, en tanto que el régimen de esfuerzos bajos es situado por debajo de 20 MPa. Este último régimen de esfuerzos no está suficientemente bien conocido en la actualidad, pero podría ser más importante de lo que se ha supuesto hasta ahora. En este sentido los trabajos de STOCKHERT et al. (1995) y ABALOS et al. (1996) podrían confirmar que el régimen de esfuerzos bajos sería el imperante para la deformación dúctil en los niveles más profundos de la corteza continental.

Los valores de las velocidades de deformación establecidos permiten calcular la tasa de desplazamiento verificado paralelamente a la zona de cizalla sometida a deformación dúctil generalizada (ZMTC más Formación Candelaria), ya que su espesor es conocido, asumiendo que la historia de la deformación estuvo dominada por un proceso de cizalla simple heterogénea. Para un espesor medio de la zona de cizalla próximo a 1200 m resulta una tasa de desplazamiento mínimo de 0.38 mm/a (para tasas de deformación de  $10^{-14}$  s<sup>-1</sup>). Esto sería válido para una deformación interna "homogénea" del conjunto total de la zona de cizalla. Las relaciones de campo, sin embargo, indican que hubo localización de la deformación en el curso del enfriamiento, de modo que esta se concentra en una banda de 350 m de espesor medio compuesta por la ZMTC y la franja de anfíbolitas de Candelaria de tamaño de grano fino. Esta zona de cizalla concentraría la deformación bajo niveles de esfuerzos diferenciales más altos (probablemente por encima de 30 MPa) y velocidades de desplazamiento progresivamente más rápidas (de hasta casi 11 mm/a para tasas de deformación de  $10^{-12}$  s<sup>-1</sup>). Estos valores de desplazamiento paralelo a la zona de cizalla (entre 0.38 y 11 mm/a) son comparables a los resultados obtenidos por ABALOS et al. (1996) para el apilamiento de unidades de alta presión en la parte oriental del alóctono superior de Cabo Ortegal: comprendidos entre 0.79 y 7.9 mm/a para tasas de deformación de  $10^{-14}$  s<sup>-1</sup> y  $10^{-13}$  s<sup>-1</sup>.

## 6. CONCLUSIONES

La Formación Candelaria sufrió una milonitización dúctil y generalizada que se produjo bajo un régimen predominantemente no coaxial a altas temperaturas (por encima de 590 °C), esfuerzos diferenciales bajos ( $\leq 8$  MPa) o esfuerzos de cizalla máximos menores de 4 MPa, y tasas de deformación lentas ( $10^{-17}$ - $10^{-14}$  s<sup>-1</sup>); tanto para la facies con una milonitización más intensa como para la facies con menor reducción del tamaño de grano.

En la Zona de Movimiento Tectónico de Carreiro se produjo también una milonitización de alta temperatura en condiciones similares a las de la Formación Candelaria: esfuerzo diferencial bajo ( $\leq 11$  MPa) o esfuerzo de cizalla máximo menor de 6 MPa, tasas de deformación lentas ( $10^{-17}$ - $10^{-14}$  s<sup>-1</sup>) y temperaturas ligeramente por encima de 600 °C. Durante el enfriamiento subsecuente tuvo lugar un proceso de localización de la deformación que progresó hasta temperaturas próximas a 500 °C bajo esfuerzos diferenciales más altos ( $\geq 30$  MPa), o esfuerzos de cizalla máximos superiores a 15 MPa, y tasas de deformación más rápidas ( $10^{-13}$ - $10^{-11}$  s<sup>-1</sup>).

El comportamiento termomecánico inferido para la Formación Candelaria y la ZMTC es resultado de procesos de deformación dúctil bajo condiciones de temperatura de grado medio y alto. Estas condiciones son similares a las registradas durante la deformación sinmetamórfica de las unidades del alóctono superior con metamorfismo de alta presión. Desde el punto de vista de la cinemática de todas estas deformaciones, todas ellas podrían ser relacionadas con un emplazamiento eo-Hercínico dirigido al NNE de los mantos de alto grado del complejo de Cabo Ortegal.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto de investigación de la DGICYT PB95-1035.

## REFERENCIAS

ABALOS, B., AZCARRAGA, J., GIL IBARGUCHI, J. I., MENDIA, M. S. y SANTOS ZALDUEGUI, J. F. (1996): Flow stress,

strain rate and effective viscosity evaluation in a high-pressure nappe (Cabo Ortegal, Spain). *Journal of Metamorphic Geology*, 14, 227-248.

ARENAS, R., GIL IBARGUCHI, I., GOZALEZ LODEIRO, F., KLEIN, E., MARTINEZ CATALAN, J. R., ORTEGA GIRONES, E., de PABLO MACIA, J. G. y PEINADO, M. (1986): Tectonostratigraphic units in the complexes with mafic and related rocks of the NW of the Iberian Massif. *Hercynica* 2, 87-110.

ARPS, C. E. S., CALSTEREN, P. W. C. van, HILGEN, J. D., KUIJPER, R. P. y DEN TEX, E. (1977): Mafic and related complexes in Galicia: an excursion guide. *Leidse Geol. Meded.*, 51, 63-94.

BASTIDA, F., MARCOS, A., MARQUINEZ, J., MARTINEZ CATALAN, J. R., PEREZ ESTAUN, A. y PULGAR, J. A. (1984): Hoja nº 1 del Mapa Geológico Nacional 1:200.000 (La Coruña) y memoria. *Publ. del IGME*, 155p.

BOULLIER, A. M. y BOUCHEZ, J. L. (1978): Le quartz en rubans dans les mylonites. *Bull. Soc. géol. France*, 7, 253-262.

BRODIE, K. H. y RUTTER, E. H. (1987): The role of transiently fine-grained reaction products in syntectonic metamorphism: natural and experimental examples. *Can. J. Earth Sci.*, 24, 556-564.

BURG, J. P. y LAURENT, P. (1978): Strain analysis of a shear zone in a granodiorite. *Tectonophysics*, 47, 15-42.

DALLMEYER, R. D., MARTINEZ CATALAN, J. R., ARENAS, R., GIL IBARGUCHI, J. I., GERVAS, P., FARIAS, P., ALLER, J., BASTIDA, F. y GUTIERREZ ALONSO, G. (1993): <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar dating of mylonites in the allochthonous complexes of NW Spain. *Terra Abstracts, Abstr. Suppl. 1 to Terra Nova*, 5, 384.

ENGELS, J. P. (1972): The catazonal poly-metamorphic rocks of Cabo Ortegal (NW Spain), a structural and petrographic study. *Leidse Geol. Meded.* 48, 83-133.

ETHERIDGE, M. A. y WILKIE, J. C. (1981): An assesment of dynamically recrystallized grain size as a paleopiezometer in quartz-bearing mylonite zones. *Tectonophysics*, 78, 475-508.

FERNANDEZ MARTINEZ, F. y FERNANDEZ POMPA, F. (1977): Mapa y memoria explicativa de la Hoja 1:50.000, Nº 1 (Cariño) del Mapa Geológico Nacional (MAGNA). *Instituto Geológico y Minero de España (IGME)*, Madrid, 34p.

FERNANDEZ POMPA, F. y MONTESERIN, V. (1976): Mapa y memoria explicativa de la Hoja 1:50.000, Nº 7 (Cedeira) del Mapa Geológico Nacional (MAGNA). *Instituto Geológico y Minero de España (IGME)*, Madrid, 73p.

FERNANDEZ RODRIGUEZ, F. J. (1993): Estructuras desarrolladas en gneises bajo condiciones de alta P y T. (Gneises de Chimparra, Cabo Ortegal). Tesis Doctoral. Universidad de Oviedo, 254pp.

GIL IBARGUCHI, J. I., MENDIA, M., GIRARDEAU, J. y PEU-

CAT, J. J. (1990): Petrology of eclogites and clinopyroxene-garnet metabasites from the Cabo Ortegal Complex (north-western Spain). *Lithos*, 25, 133-162.

GLEASON, G. C. y TULLIS, J. (1993): Improving flow laws and piezometers for quartz and feldspar aggregates. *Geophys. Res. Lett.*, 20, 2111-2114.

GLEASON, G. C. y TULLIS, J. (1995): A flow law creep of quartz aggregates determined with the molten salt cell. *Tectonophysics*, 247, 1-23.

HACKER, B. R., YIN, A., CHRISTIE, J. M. y SNOKE, A. W. (1990): Differential stress, strain rate, and temperatures of mylonitization in the Ruby Mountains, Nevada: implications for the rate and duration of uplift. *J. Geophys. Res.*, 95, 8569-8580.

HACKER, B. R., YIN, A., CHRISTIE, J. M. y DAVIES, G. A. (1992): Stress magnitude, strain rate, and rheology of extended middle continental crust inferred from quartz grain sizes in the Whipple Mountains, California. *Tectonics*, 11, 36-46.

HANDY, M. R. (1994): Flow laws for rocks containing two non-linear viscous phases: a phenomenological approach. *J. Struct. Geol.*, 16, 287-301.

HIRTH, G. y TULLIS, J. (1992): Dislocation creep regimes in quartz aggregates. *J. Struct. Geol.*, 14, 145-159.

KOCH, P. S. (1983): Rheology and microstructures of experimentally deformed quartz aggregates. Ph.D. Diss. Univ. of California, Los Angeles, 464p.

LISTER, G. S. (1977): Discussion: crossed girdle c-axis fabrics in quartzites plastically deformed by plane strain and progressive simple shear. *Tectonophysics*, 39, 51-54.

LISTER, G. S. y DORNSIEPEN, U. F. (1982): Fabric transitions in the Saxony granulite terrain. *J. Struct. Geol.*, 4, 81-92.

LISTER, G. S. y SNOKE, A. W. (1984): S-C mylonites. *Journal of Structural Geology*, 6, 617-638.

MAINPRICE, D., BOUCHEZ, J. L., BLUMENFELD, Ph. y TUBIA, J. M. (1986): Dominant c-slip in naturally deformed quartz: implications for dramatic softening at high temperature. *Geology*, 14, 819-822.

MANCKTELOW, N. S. (1993): Tectonic overpressure in competent mafic layers and the development of isolated eclogites. *J. Met. Geol.*, 11, 801-812.

MERCIER, J. C., ANDERSON, D. A. y CARTER, N. L. (1977): Stress in the lithosphere. Inferences from steady state flow of rocks. *Pure Appl. Geophys.*, 115, 119-126.

MICHIBAYASHI, K. (1993): Syntectonic development of a strain-independent steady-state grain size during mylonitization. *Tectonophysics*, 222, 151-164.

MIES, J. W. (1993): Structural analysis of sheath folds in the Sylacauga Marble Group, Talladega slate belt, southern Appalachians. *Journal of Structural Geology*, 15, 983-993.

MINNIGH, L. D. (1980): Structural analysis of sheath -folds in a meta-chert from the Western Italian Alps. *Journal of Structural Geology*, 1, 275-282.

NICOLAS, A. y POIRIER, J. P. (1976): Crystalline plasticity and solid-state flow in metamorphic rocks. Willey, New York: 1-444.

OKUDAIRA, T., TAKESHITA, T., HARA, I. y ANDO, J. I. (1995): A new estimate of the conditions for transition from basal (a) to prism [c] slip in naturally deformed quartz. *Tectonophysics*, 250, 31-46

ORD, A. y CHRISTIE, J. M. (1984): Flow stresses from microstructures in mylonitic quartzites of the Moine Thrust zone, Assynt area, Scotland. *J. Struct. Geol.*, 6, 639-654.

PASSCHIER, C. W. y SIMPSON, C. (1986): Porphyroblast systems as kinematic indicators. *J. Struct. Geol.*, 8, 831-843.

PIERCE, M. L. (1987): Kinetics of recovery and grain growth in hydrostatically annealed quartz aggregates. Ms.S. Thesis. Univ. of California, Los Angeles, 116p.

PIERCE, M. L. y CHRISTIE, J. M. (1987): Kinetics of grain growth in quartz aggregates. *Eos Trans. AGU*, 68, 422.

POIRIER, J. P. y NICOLAS, A. (1975): Deformation induced recrystallization due to progressive misorientation of subgrains, with special reference to mantle peridotites. *J. Geol.*, 83, 707-720.

PRIOR, D. J., KNIPE, R. J. y HANDY, M. R. (1990): Estimates of the rates of microstructural changes in mylonites. In: Knipe, R. J. and Rutter, E.H. (Eds.): Deformation Mechanisms, Rheology and Tectonics. Geol. Soc. Spec. Publ. n° 54: 309-319.

REE, J. H. (1991): An experimental steady-state foliation. *J. Struct. Geol.*, 13, 1001-1011.

RUTTER, E. H. (1976): The kinetics of rocks deformation by pressure-solution. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Ser. A*, 283, 203-213.

SANTOS ZALDUEGUI, J. F. (1995): Geocronología geoquímica isotópica de diferentes unidades de los complejos alóctonos de Cabo Ortegal y Malpica-Tuy (Noroeste de España). *Lab. Xeol. Laxe. Serie Nova Terra*, 11, 177pp.

SCHÄFER, H. J., GEBAUER, D., GIL IBARGUCHI, J. I. y PEUCAT, J. J. (1993): Ion-microprobe U-Pb zircon dating on the HP/HT Cabo Ortegal Complex (Galicia, NW Spain): preliminary

results. *Terra Abstracts, Abstr. Suppl. 4 to Terra Nova*, 5, 22.

SIBSON, R. H. (1982): Fault zone models, heat flow, and depth distribution of earthquakes in the continental crust of the United States. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 72, 151-161.

SIMPSON, C. (1980): Oblique girdle orientation patterns of quartz C-axes from a shear zone in the basement core of the Maggia Nappe Ticino, Switzerland. *J. Struct. Geol.*, 2, 243-247.

SCHMID, S. M. y CASEY, M. (1986): Complete fabric analysis of some commonly observed quartz C-axis patterns. In: Mineral and Rock Deformation: Laboratory Studies. the Paterson Volume (eds Hobbs, B.E. & Heard, H.C.), American Geophysical Union, Geophysical Monograph Series, 36, 263-286.

STÖCKHERT B., NOWLAN E. U. y MASSONNE H.-J. (1995): High-pressure metamorphism under low differential stress - the record of a metapelite from the eclogite zone, Tauern window, Eastern Alps. *Bochumer Geologische und Geotechnische Arbeiten*, 44: 229-234.

TULLIS, J. y YUND, R. A. (1982): Grain growth kinetics of quartz and calcite aggregates. *J. Geol.*, 90, 301-318.

TWISS, R. J. (1977): Theory and applicability of a recrystallized grain size piezometer. *Pure Appl. Geophys.*, 115, 227-244.

TWISS, R. J. (1980): Static theory of size variation with stress for subgrains and dynamically recrystallized grains. *U.S. Geol. Surv. Open File Rep.*, 80-625, 665-683.

TWISS, R. J. y MOORES, E. M. (1992): Structural Geology. Freeman and Co., New York; 530p.

VOGEL, D. E. (1967): Petrology of eclogite- and pyrochlorite-bearing polymetamorphic rock complex at Cabo Ortegal, NW Spain. *Leidse Geol. Meded.*, 40, 121-213.

VOGEL, D. E., ENGELS, J. P. y DEN TEX, E. (1983): El complejo del Cabo Ortegal. In: *Libro Jubilar J.M. Ríos (Geología de España, Vol. 1)*, I.G.M.E., Madrid, 440-449.

VON MISES, R. (1928): Mechanik der plastischen Formänderung von Kristallen. *Z. Angew. Math. Mech.*, 8: 161-185.

WHITE, S. H. (1979): Paleostress estimates in the Moine Thrust zone. *Nature*, 280, 222-223.

Original recibido: Febrero 1996.  
Original aceptado: Marzo 1996.

## Consideraciones bioestratigráficas sobre *Allocricetus bursae* (Cricetidae, Rodentia) en el Pleistoceno inferior y medio de Atapuerca (Burgos, España).

Por E. GIL. (\*)

### RESUMEN

En este trabajo se estudian las poblaciones de *Allocricetus bursae* de los yacimientos Gran Dolina, Cueva de los Zarpazos (TZ4), Galería y Tres Simas (Boca Norte), del Pleistoceno inferior y medio de Atapuerca. Se cuestiona, además, la sistemática utilización de las líneas evolutivas propuestas y seguidas por algunos autores para esta especie, que basadas en la sucesión de subespecies cronológicas, marcaron la posición bioestratigráfica de otros yacimientos pleistocenos españoles.

**Palabras clave:** *Allocricetus bursae*, Cricetidae, Pleistoceno inferior, Pleistoceno medio, Bioestratigrafía, Atapuerca.

### ABSTRACT

In this work the *Allocricetus bursae* populations are studied, in the sites named Gran Dolina, Cueva de los Zarpazos (TZ4), Galería and Tres Simas (Boca Norte), from the Lower and Middle Pleistocene of Atapuerca. Biostratigraphically, the use in another Spanish sites of the evolutives lines proposed for something authors for this species, founded in the succession of the chronological subspecies, is here questioned.

**Key words:** *Allocricetus bursae*, Cricetidae, Lower Pleistocene, Middle Pleistocene, Biostratigraphy, Atapuerca.

### 1.-INTRODUCCION

El material fósil de cricétidos utilizado para este trabajo procede de las campañas de excavación realizadas y dirigidas por el Prof. E. Aguirre en la Trinchera de Ferrocarril de la Sierra de Atapuerca entre los años 1982 y 1984, y fue utilizado en la tesis doctoral del autor (GIL BAZAN, 1986). El estudio descriptivo de los distintos yacimientos de la Trinchera, denominados Gran Dolina (TD), y Complejo Tres Simas (CTS), con Cueva de los Zarpazos (TZ), Galería (TG) y Tres Simas, Boca Norte (TN), así como la correlación de sus niveles estratigráficos, es realizada, con

sucesivas modificaciones y precisiones, por GIL BAZAN (1986), GIL, AGUIRRE y HOYOS (1987) y AGUIRRE (1995).

La gran importancia bioestratigráfica que se otorga a la especie de cricétido *Allocricetus bursae*, así como a sus subespecies cronológicas (CHALINE, 1971,1972), queda bien reflejada en la literatura científica sobre el tema. Es por este motivo, y teniendo en cuenta la amplia distribución estratigráfica de las poblaciones de *Allocricetus bursae* en Atapuerca, presente en la casi totalidad de sus niveles fosilíferos, además de las especialmente numerosas poblaciones registradas en los niveles superiores de los rellenos kársticos (TD11, de Gran Dolina, y CTS.3: en TZ4 y TG11), por lo que podemos pre-

(\*) I.E.S. María Moliner. C/ S. Vicente Ferrer, s/n. 50.011 Zaragoza.

sentar en este trabajo algunas consideraciones de marcado interés bioestratigráfico.

Para la descripción de todos los tipos molares de *Allocrietus bursae* se ha utilizado la nomenclatura empleada por CHALINE (1972) y LOPEZ MARTINEZ (1980). Todos los ejemplares han sido dibujados en vista oclusal por medio de una cámara clara Nikon, de 0.025 mm. de precisión. Biométricamente, se utiliza el parámetro de la longitud máxima (L), medido siempre en la superficie oclusal del diente, expresándose en milímetros.

2.-PALEONTOLOGIA

2.1.- Estudio sistemático.

Familia CRICETIDAE MURRAY,1866  
 Género *Cricetulus* MILNE-EDWARDS, 1867  
 Subgénero *Allocrietus* SCHAUB, 1930  
*Allocrietus bursae* SCHAUB, 1930

Fig.5

2.1.1.-Material:

Las poblaciones estudiadas se listan a continuación utilizando las siglas que corresponden a los niveles estratigráficos de los cortes realizados en los rellenos kársticos sedimentarios de la Trinchera de Atapuerca (GIL BAZAN, 1986; GIL, AGUIRRE y HOYOS, 1987), de los que proceden:

- TN4: Inf.: 9M1, 8M2, 3M3; Sup.: 2M1, 2M2.
- TN5: Inf.: 2M1, 2M2, 4M3; Sup.: 1M1, 1M2.
- TN6: Inf.: 11M1, 10M2, 4M3; Sup.: 11M1, 4M2, 7M3.
- TD3: Inf.: 7M1, 9M2, 5M3; Sup.: 3M1, 6M2, 3M3.
- TD4: Inf.: 5M1, 10M2, 3M3; Sup.: 6M1, 4M2, 1M3.
- TD5: Inf.: 3M1,3M2; Sup.: 3M1, 6M2.
- TD6: Inf.: 8M1, 5M2, 2M3; Sup.: 13M1, 12M2, 9M3.
- TD8: Inf.: 2M1, 2M2, 2M3; Sup.: 1M1, 1M2, 1M3.
- TD10: Inf.: 4M1, 7M2, 5M3; Sup.: 3M1, 2M2, 2M3.
- TD11: Inf.: 18M1, 19M2, 13M3; Sup.: 11M1, 10M2, 9M3.
- TZ4: Inf.: 20M1, 11M2, 10M3; Sup.: 5M1, 6M2, 9M3.

- TG9: Sup.: 2M1, 2M2, 1M3.
- TG10: Inf.: 2M1, 4M2, 1M3; Sup.: 4M1, 2M2, 2M3.
- TG11: Inf.: 103M1, 64M2, 21M3; Sup.: 96M1, 72M2, 23M3.

2.1.2.-Medidas: Ver Tabla 1 y Figs. 1, 2, 3, y 4.

Nivel	M1				M2				M3				
	Máx.	Med	Mín.	N	Máx.	Med	Mín.	N	Máx.	Med	Mín.	N	
TZ4	I	2.06	1.97	1.84	20	1.68	1.59	1.52	11	1.74	1.61	1.44	10
	S	2.16	2.06	1.98	5	1.72	1.62	1.54	6	1.46	1.35	1.28	9
TG11	I	2.20	1.97	1.76	103	1.76	1.60	1.46	64	1.72	1.60	1.54	21
	S	2.32	2.10	1.83	96	1.84	1.61	1.42	72	1.44	1.34	1.24	23
TG10	I	1.96	1.94	1.92	2	1.64	1.57	1.52	4	--	1.68	--	1
	S	2.18	2.11	2.02	4	--	1.64	--	2	1.96	1.94	1.92	2
TG9	I	--	1.96	--	2	1.48	1.46	1.44	2	--	1.28	--	1
	S	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
TD11	I	2.08	1.94	1.86	18	1.72	1.57	1.44	19	1.64	1.51	1.44	13
	S	2.16	2.06	1.98	11	1.68	1.52	1.38	10	1.40	1.30	1.12	9
TD10	I	2.08	1.95	1.78	4	1.70	1.63	1.56	7	1.72	1.56	1.48	5
	S	2.12	2.06	2.00	3	1.60	1.53	1.46	2	1.40	1.36	1.32	2
TD8	I	2.18	2.16	2.14	2	1.80	1.76	1.72	2	1.76	1.74	1.72	2
	S	--	2.08	--	1	--	1.52	--	1	--	1.24	--	1
TD6	I	2.10	1.99	1.92	8	1.60	1.55	1.48	5	1.66	1.62	1.58	2
	S	2.20	2.08	1.92	13	1.68	1.58	1.46	12	1.38	1.31	1.20	9
TD5	I	2.08	1.98	1.86	3	1.56	1.55	1.54	3	--	--	--	--
	S	2.08	2.04	1.98	3	1.60	1.54	1.44	6	--	--	--	--
TD4	I	2.02	1.93	1.86	5	1.62	1.55	1.50	10	1.60	1.58	1.56	3
	S	2.20	2.09	2.00	6	1.54	1.49	1.44	4	--	1.24	--	1
TD3	I	2.00	1.95	1.92	7	1.62	1.57	1.48	9	1.60	1.55	1.50	5
	S	2.20	2.11	2.04	3	1.60	1.54	1.48	6	--	1.36	--	3
TN6	I	2.00	1.92	1.84	11	1.64	1.58	1.50	10	1.64	1.59	1.52	4
	S	2.24	2.08	1.96	11	1.56	1.52	1.44	4	1.48	1.37	1.24	7
TN5	I	1.94	1.93	1.92	2	1.66	1.61	1.56	2	1.70	1.60	1.52	4
	S	--	2.00	--	1	--	1.46	--	1	--	--	--	--
TN4	I	2.04	1.92	1.84	9	1.60	1.54	1.52	8	1.60	1.56	1.52	3
	S	2.12	2.10	2.08	2	1.56	1.52	1.48	2	--	--	--	--

Tabla 1.- Número de ejemplares y medidas de su longitud máxima, media, y mínima en vista oclusal, expresadas en milímetros, de las poblaciones de *Allocrietus bursae* de la Trinchera del Ferrocarril de Atapuerca. I: Serie dentaria inferior; S: Serie dentaria superior.

2.1.3.-Descripción:

A) Molares superiores:

**M1:** Presenta seis tubérculos agrupados y dispuestos de dos en dos, siendo los anteroconos de tamaño ligeramente más pequeño que las demás cúspides. El paracono y el protocono son de igual tamaño, pero más reducidos que el hi-

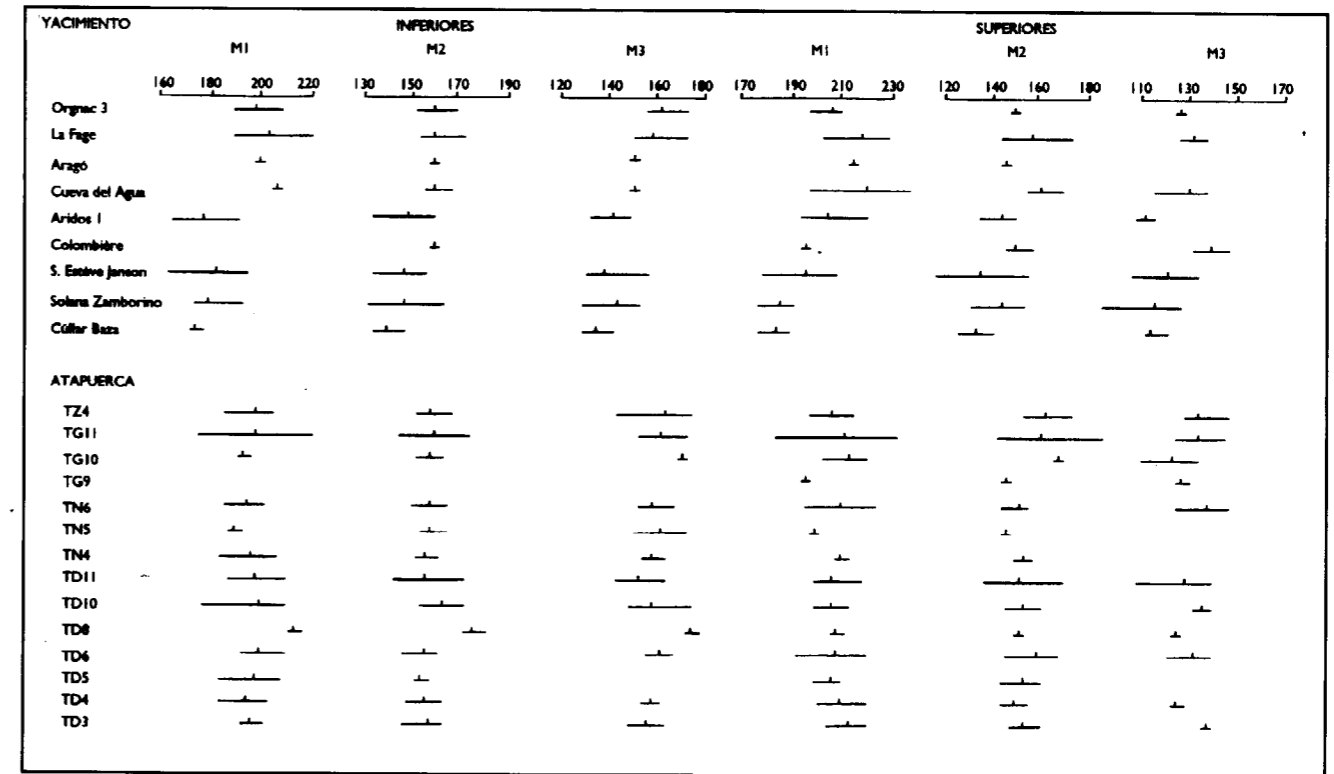


Fig. 1.- Intervalos de variación de la longitud de todos los tipos molares de *Allocrietus bursae*, en Atapuerca, en comparación con los de otros yacimientos españoles y franceses del Pleistoceno medio: Orgnac 3, La Fage, S. Estève Janson, La Colombière (CHALINE, 1972); Aragón (CHALINE, 1971); Cueva del Agua (LOPEZ MARTINEZ y RUIZ BUSTOS, 1977); Cúllar Baza (RUIZ y MICHAUX, 1976); Solana del Zamborino (RUIZ BUSTOS et al., 1982).

pocono y metacono. En vista oclusal, presenta un ligero desplazamiento hacia el lado labial del metacono y hacia el lado lingual del protocono. Desarrolla un pequeño posterolofa. En muy pocos ejemplares existe un cierre completo de islotes de esmalte, aunque el brazo anterior del hipocono y protocono están presentes, con más o menos desarrollo, en la mayoría de ellos. Posee cuatro raíces. Ver Fig. 5: 1,2.

**M2:** Con cuatro cúspides de semejante tamaño, en vista oclusal, tiene forma rectangular, y no presenta islotes de esmalte cerrados. Está muy desarrollada la cresta anterior, aunque casi desaparece en su lado externo. Tiene cuatro raíces bajo los cuatro tubérculos principales, respectivamente. Ver Fig. 5: 3,4.

**M3:** Es el diente más pequeño de la serie dentaria superior. Tiene cuatro cúspides de desigual tamaño, siendo su corona de forma pseudotriangular. Las cúspides posteriores son mucho más

pequeñas que las anteriores, cerrándose en algún ejemplar dos islotes de esmalte. Presenta una cresta anterior desarrollada y tres raíces. Ver Fig. 5: 5,6.

B) Molares inferiores:

**M1:** Con seis tubérculos alineados en dos filas, los anterocónidos están en posición paralela, muy próximos entre sí, y más pequeños que el resto de los tubérculos. El resto de las cúspides se disponen alternantes dos a dos, y de tamaño desigual: hipocónido y entocónido son mayores que el protocónido y metacónido. No presentan mesolófido, pero sí un posterolófido bien desarrollado como prolongación hacia la base del diente del esmalte del hipocónido. Posee dos raíces. Ver Fig. 5: 7,8.

**M2:** Compuesto por cuatro cúspides alternas, tiene en vista oclusal una forma rectangular. No

hay mesoléfido en ninguno de los ejemplares. Desarrolla una marcada cresta anterior y postero-loléfido. Presenta cuatro raíces. Ver Fig. 5: 9, 10.

**M3:** Diente con cuatro cúspides alternas, que en vista oclusal presenta una forma pseudotriangular alargada. La mayor parte de los ejemplares tienen mesoléfido y desarrollan una cresta anterior. Tienen dos raíces. Ver Fig. 5: 11, 12.

#### 2.1.4.-Discusión:

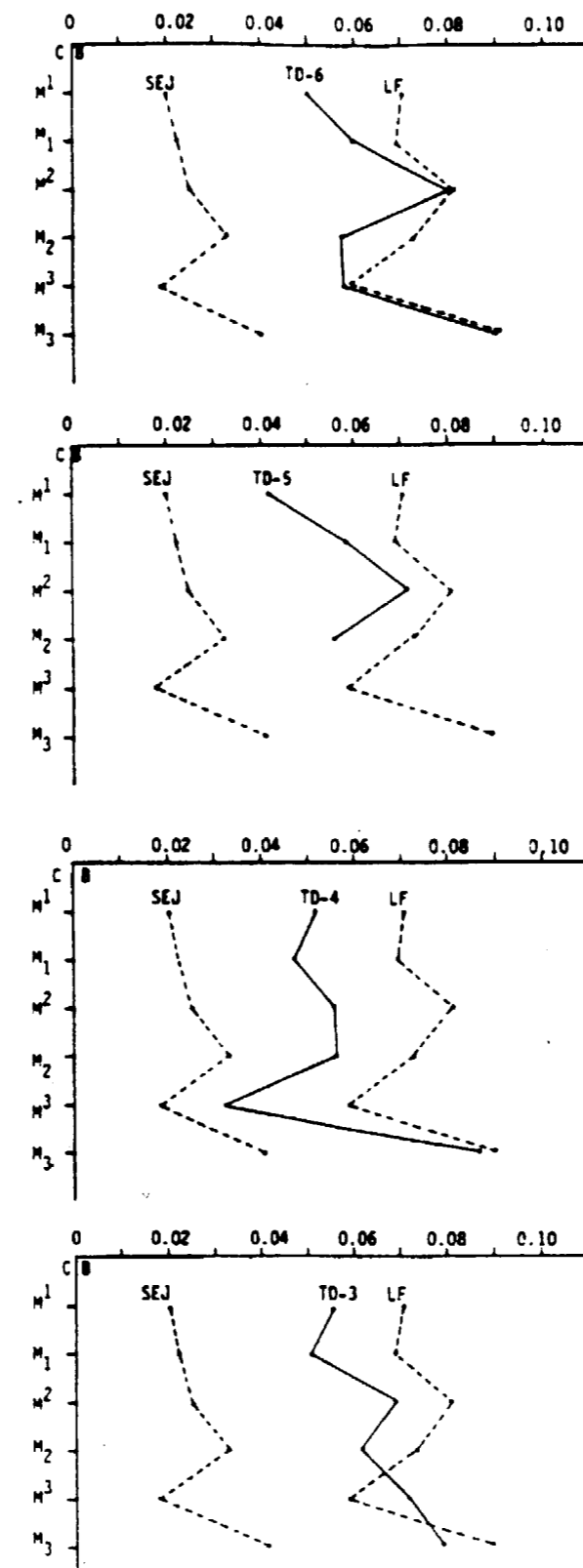
Las tendencias evolutivas de *Allocricetus bursae* propuestas por CHALINE (1972) están basadas en un aumento de talla en M1 y M2 superiores, y decrecimiento del M3 superior, mientras que en molares inferiores se mantiene constante la talla del M1, decrece el M2 y se produce un crecimiento del M3. Basándose fundamentalmente en estas tendencias se han definido varias subespecies, que coinciden con los sucesivos estadios evolutivos de la especie: *Allocricetus bursae pyrenaicus* (CHALINE, 1971), *Allocricetus bursae balaruciensis* (CHALINE, 1972), *Allocricetus bursae duranciensis* (CHALINE, 1972), *Allocricetus bursae colombierensis* (CHALINE, 1972) y *Allocricetus bursae correzensis* (CHALINE, 1972).

En yacimientos españoles en los que aparece *Allocricetus bursae* han sido considerados los diferentes estadios evolutivos de la especie, que presenta, según LOPEZ MARTINEZ (1980): "caracteres evolutivos particulares, tales como la persistencia de mesoléfido y la reducción del M3 inferior". Así, en el Pleistoceno medio se identifican de más antiguo a más moderno: *A.b. duranciensis* (RUIZ y MICHAUX, 1976) de Cúllar Baza; *A.b. duranciensis* del Higuero (LOPEZ MARTINEZ, 1972); *A.b. cf. duranciensis* de Aridos 1 (LOPEZ MARTINEZ, 1980); *A.b. colombierensis* de Solana del Zamborino (RUIZ BUSTOS et al., 1982); *A.b. cf. pyrenaicus* de Cueva del Agua (LOPEZ MARTINEZ y RUIZ BUSTOS, 1977) y *Allocricetus bursae cf. correzensis* en la Sima de los Huesos de Atapuerca (CUENCA BESCOS, LAPLANA y CANUDO, 1994). En el Pleistoceno superior, *Allocricetus bursae* aparece en los yacimientos de Las Yedras (RUIZ BUSTOS, 1978); La Carigüela (RUIZ BUSTOS y GAR-

CIA SANCHEZ, 1977) y Pinilla del Valle (ALFEREZ et al., 1982; TONI y MOLERO, 1990).

En lo referente a los yacimientos objeto de este estudio, en la Trinchera del Ferrocarril de la Sierra de Atapuerca, la especie *Allocricetus bursae* está ampliamente representada, y se caracteriza significativamente por la gran homogeneidad morfológica que presentan las poblaciones de todos los niveles estratigráficos en los que aparece. Así, son comunes a todas ellas caracteres morfológicos tales como los presentados por los M1 superiores, con los anterocornos de similar tamaño al del resto de las cúspides; en los M3 inferiores, un marcado mesoléfido en la mayor parte de los ejemplares; así como la notoria imperfección en el cierre completo de islotes de esmalte en todas las piezas dentarias (Ver Fig. 5).

Desde un punto de vista biométrico, todas estas poblaciones de *Allocricetus bursae* de Atapuerca se sitúan, utilizando diagramas logarítmicos de medias de longitud de los distintos tipos molares (Ver Figs. 2, 3 y 4), en una posición intermedia entre las de Saint Estève Janson (*A.b. duranciensis*, CHALINE, 1972) y La Fage (*A.b. correzensis*, CHALINE, 1972). Sin embargo, y teniendo en cuenta las poblaciones más numerosas registradas en Atapuerca, que se corresponden con los niveles estratigráficos TD11, TZ4 y TG11, se observa que, en especial los intervalos de variación de longitud de la población de TG11, engloban, casi en su totalidad, a los intervalos de variación de las poblaciones del resto de los niveles estratigráficos de los rellenos de la Trinchera (Ver Fig. 1), así como a los intervalos de las distintas subespecies descritas en otros yacimientos, como en la Sima de los Huesos de Atapuerca: *Allocricetus bursae cf. correzensis* (CUENCA BESCOS, LAPLANA y CANUDO, 1994), o de Saint Estève Janson: *Allocricetus bursae duranciensis* (CHALINE, 1972); Aridos 1: *Allocricetus bursae cf. duranciensis* (LOPEZ MARTINEZ, 1980); Solana del Zamborino: *Allocricetus bursae colombierensis* (RUIZ BUSTOS et al., 1982); Cueva del Agua: *Allocricetus bursae pyrenaicus* (LOPEZ MARTINEZ y RUIZ BUSTOS, 1977); l'Aragó: *Allocricetus bursae pyrenaicus* (CHALINE, 1971); La Fage y Orgnac 3: *Allocricetus bursae correzensis*



(CHALINE, 1972) (Ver Fig. 1). Así pues, y basándonos en estas apreciaciones de carácter biométrico, así como en los caracteres morfológicos antes expresados, consideramos precisa la determinación de estas poblaciones de Atapuerca únicamente a nivel específico: *Allocricetus bursae*.

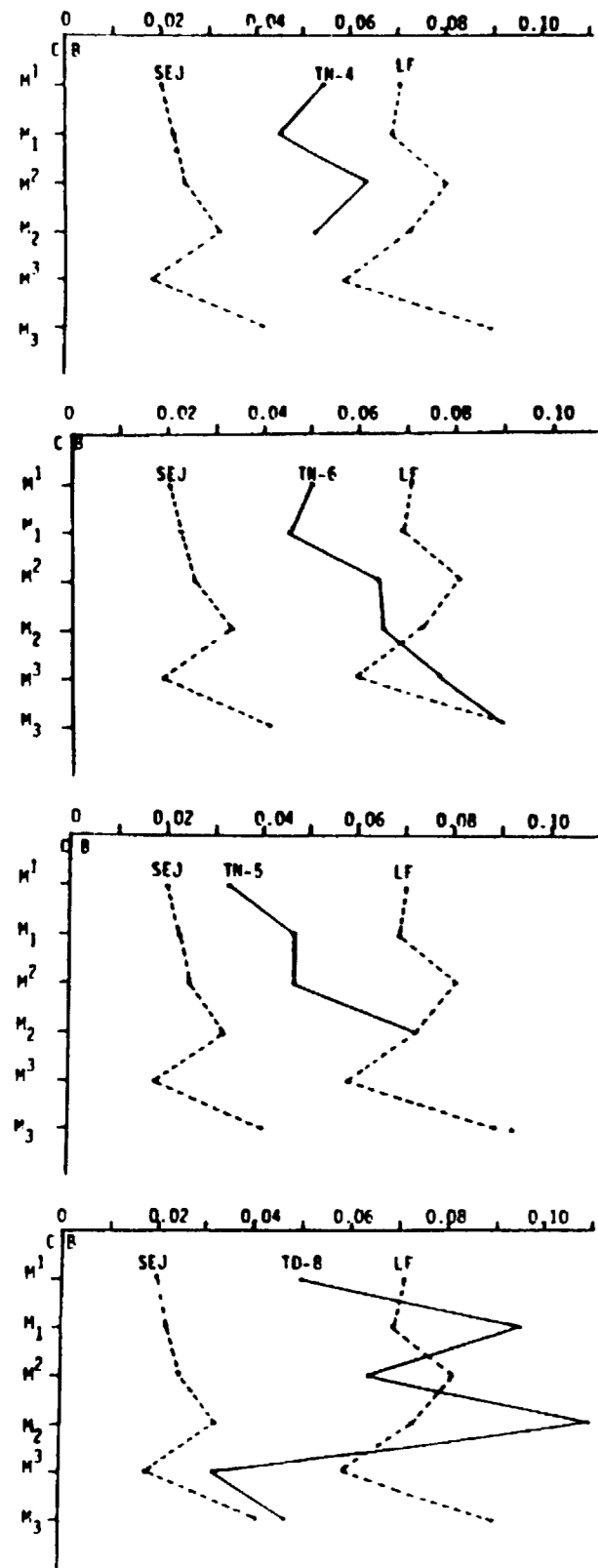
#### 2.2.-Consideraciones y conclusiones bioestratigráficas.

La posición bioestratigráfica de los yacimientos españoles del Pleistoceno medio, así como las correlaciones cronoestratigráficas realizadas con otros yacimientos europeos (LOPEZ MARTINEZ y RUIZ BUSTOS, 1977; LOPEZ MARTINEZ, 1980, 1983) se basan, fundamentalmente, en el estadio evolutivo en que aparecen representados en esos yacimientos tres taxones de roedores, considerados tradicionalmente en la literatura científica como buenos indicadores bioestratigráficos: *Microtus brecciensis*, *Allocricetus bursae* y *Arvicola*.

En Atapuerca, es muy amplia la distribución estratigráfica de *Allocricetus bursae* en todos los yacimientos de la Trinchera del Ferrocarril, desde los niveles más antiguos a los más modernos. Se detecta inicialmente el cambio Matuyama/Bruhnes, considerada el tránsito Pleistoceno inferior/medio, en la base del nivel de lutitas TD3 del corte de Gran Dolina (CARRACEDO et al., 1987) y se data en casi 120 ka aA, serie del U, y próximo a 180 ka aA por ESR, los niveles de techo del relleno de Galería (GRÜN y AGUIRRE, 1987). PARES y PEREZ GONZALEZ, (1995) sitúan la inversión Matuyama /Bruhnes, de 780 ka aA, entre los niveles TD6 y TD8 del relleno de Gran Dolina. Estos datos, junto a las correlaciones estratigráficas propuestas entre los niveles de los rellenos kársticos de la Trinchera (GIL BAZAN, 1986; GIL, AGUIRRE y HOYOS, 1987; AGUIRRE, 1995), así como la gran homogeneidad morfológica y biométrica de todas las poblaciones estudiadas, no nos permi-

Fig.2.- Diagramas logarítmicos. Diferencias de los logaritmos de las medias de longitud para cada tipo molar de *Allocricetus bursae* de los niveles TD3,TD4,TD5 y TD6, en relación con Cúllar Baza (CB), Saint Estève Janson (SEJ), y La Fage (LF).





ten identificar en Atapuerca las tendencias evolutivas de *Allocricetus bursae* expresadas anteriormente.

Los criterios en que fundamentalmente se basa la fina línea evolutiva establecida para *Allocricetus bursae* en el Pleistoceno medio europeo, según las subespecies cronológicas de esa especie definidas por CHALINE (1971, 1972), han sido aplicados, aunque con las peculiaridades expuestas más arriba, a los yacimientos pleistocenos españoles. Sin embargo, el muy reducido número de ejemplares registrados en la mayoría de las poblaciones de *Allocricetus bursae* descritas en la literatura científica de esos yacimientos, ponen en tela de juicio su determinación taxonómica a nivel de subespecie. Esta se lleva a cabo considerando los escasos datos biométricos disponibles como altamente significativos, utilizándolos como criterio fundamental en la asignación de los restos a una determinada subespecie, cuando bien podrían situarse éstos en los extremos de los intervalos de variación de talla (longitud de las piezas dentarias) correspondientes a poblaciones más numerosas y/o dentro de los de otros yacimientos en los que se describen subespecies distintas (Ver Fig. 1). Además, la ausencia generalizada en los estudios publicados de los yacimientos antes mencionados, de una referencia clara a un apoyo secuencial estratigráfico que sirva como base para el muestreo paleontológico, sin duda ha podido condicionar, cuando no distorsionar, la conclusión de datos, sobre todo bioestratigráficos, a partir del registro fósil de *Allocricetus bursae*.

Estos hechos contrastan significativamente con las condiciones de estudio del amplio registro paleontológico de esta especie en la Trinchera del Ferrocarril de Atapuerca. El detallado soporte estratigráfico de sus rellenos kársticos, así como las correlaciones y dataciones cronoestratigráficas establecidas, nos sirven de referencia instrumental incomparable en la interpretación de la distribución estratigráfica de *Allocricetus*

Fig. 3.- Diagramas logarítmicos. Diferencias de los logaritmos de las medias de longitud para cada tipo molar de *Allocricetus bursae* de los niveles TN4, TN5, TN6 y TD8, en relación con Cúllar Baza (CB), Saint Estève Janson (SEJ), y La Fage (LF).

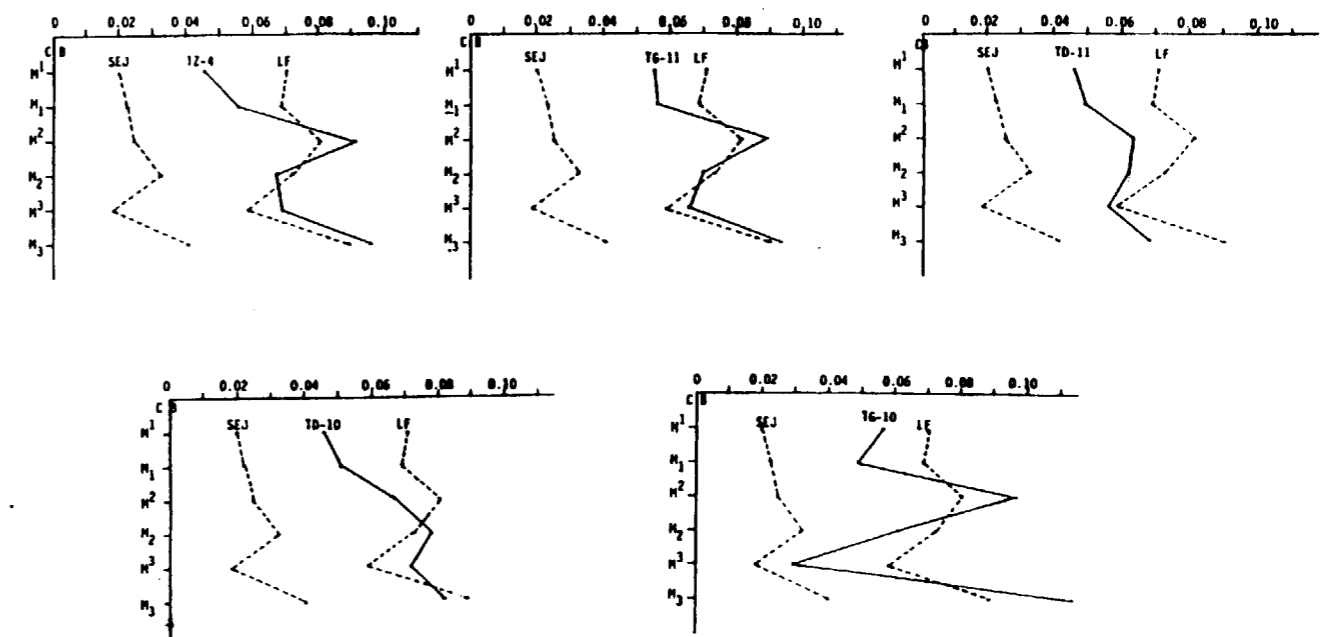
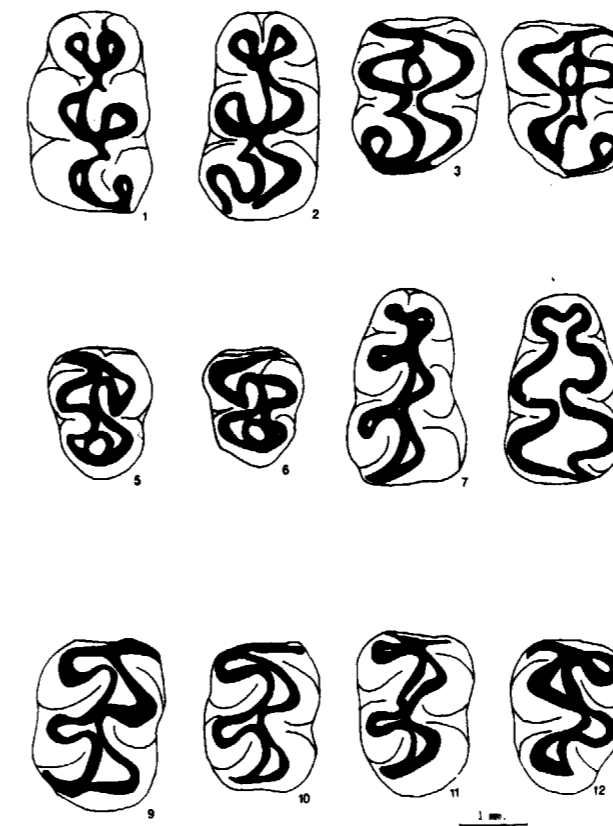


Fig. 4.- Diagramas logarítmicos. Diferencias de los logaritmos de las medias de longitud para cada tipo molar de *Allocricetus bursae* de los niveles TG10, TD10, TG11, TD11, y TZ4, en relación con Cúllar Baza (CB), Saint Estève Janson (SEJ), y La Fage (LF).



*bursae* y la conclusión de datos taxonómicos, evolutivos y bioestratigráficos. Así, se constata su presencia en Atapuerca desde los últimos episodios del Pleistoceno inferior, registrado en los niveles basales de Gran Dolina, y a lo largo de todo el Pleistoceno medio. Por otro lado, y teniendo en cuenta el estudio de los caracteres morfológicos y biométricos de estas poblaciones de *Allocricetus bursae*, así como todos los datos geológicos ya expuestos, consideramos necesario cuestionar, por tanto, la sistemática utilización de las líneas evolutivas antes citadas en la determinación subespecífica de poblaciones de *Allocricetus bursae*, en especial las poco

Fig. 5.- *Allocricetus bursae*.  
 1.- M1 sup. izdo. TD3.  
 2.- M1 sup. dcho. TD4.  
 3.- M2 sup. dcho. TG11.  
 4.- M2 sup. izdo. TG11.  
 5.- M3 sup. izdo. TG11.  
 6.- M3 sup. dcho. TG11.  
 7.- M1 inf. dcho. TN6.  
 8.- M1 inf. izdo. TN6.  
 9.- M2 inf. dcho. TG11.  
 10.- M2 inf. dcho. TG11.  
 11.- M3 inf. dcho. TG11.  
 12.- M3 inf. izdo. TG11.

numerosas, lo que disminuye de forma considerable, a nuestro juicio, el alto grado de interés asignado a esta especie como marcador bioestratigráfico de los yacimientos españoles del Pleistoceno.

#### REFERENCIAS

AGUIRRE, E. (1995): Atapuerca (Burgos, España): su contribución a las ciencias del Cuaternario. *Rev. Esp. Pal.* 10(1), 58-82.

ALFEREZ, F; MOLERO, G; MALDONADO, E; BUSTOS, V; BREA, P; BUITRAGO, A. M. (1982): Descubrimiento del primer yacimiento cuaternario (Riss-Würm) de vertebrados con restos humanos en la provincia de Madrid (Pinilla del Valle). *COLPA*, 37. 15-32.

CARRACEDO, J. C; HELLER, F; SOLER, V; AGUIRRE, E. (1987): Estratigrafía magnética del yacimiento de Atapuerca: Determinación del límite Matuyama/Brunhes. *in: El hombre fósil de Ibeas y el Pleistoceno de la Sierra de Atapuerca*. I. E. Aguirre, E. Carbonell, J. M. Bermúdez de Castro, Eds. Junta de Castilla y León, Valladolid, 193-200.

CUENCA BESCOS, G; LAPLANA, C; CANUDO, J. I. (1994): Precisiones sobre la edad de la Sima de los Huesos (Pleistoceno Medio, Atapuerca, Burgos). *Comunicaciones de las X Jornadas de Paleontología*, pp. 53-56. Madrid, 1994.

CHALINE, J. (1971): L'Age des Hominiens de la Caune de l'Aragó à Tautavel (Pyrénées-Orientales), d'après l'étude des Rongeurs. *Note. C. R. Acad. Sc. Paris*. 272. 1743-1746.

CHALINE, J. (1972): Les Rongeurs du Pléistocène Moyen et Supérieur de France. *Cah. Pal.* 1-410.

GIL BAZAN, E. (1986): Taxonomía y bioestratigrafía de micromamíferos del Pleistoceno medio, especialmente roedores, de los rellenos kársticos de la Trinchera del Ferrocarril de la Sierra de Atapuerca (Burgos). Tesis Doctoral Universidad de Zaragoza. 1-229.

GIL, E; AGUIRRE, E; HOYOS, M. (1987): Contexto estratigráfico de los rellenos kársticos de Atapuerca *in: Sierra El hombre fósil de Ibeas y el Pleistoceno de la Sierra de Atapuerca*. I. E. Aguirre, E. Carbonell, J. M. Bermúdez de Castro, Eds. Junta de Castilla y León, Valladolid, 47-54.

GIL, E; SESE, C. (1986): Middle Pleistocene small mammals from Atapuerca (Burgos, Spain). *in: Datation et caractérisation des milieux pleistocènes (Actes des symposiums 11 et 17, XIe. Réunion Annuel des Sciences de la Terre. Clermont-Ferrand* (J. P. Raynal et D. Miallier, Eds.). *Cahiers du Quaternaire* 16, 337-347.

GRÜN, R; AGUIRRE, E. (1987): Datación por ESR y por la serie del U en los depósitos cársticos de Atapuerca. *in: El hombre fósil de Ibeas y el Pleistoceno de la Sierra de Atapuerca*. I. E. Aguirre, E. Carbonell, J. M. Bermúdez de Castro, Eds. Junta de Castilla y León, Valladolid, 201-204.

LOPEZ, N. (1972): Los micromamíferos del Cuaternario del Rincón de la Victoria. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat.*, 70. 223-233.

LOPEZ MARTINEZ, N. (1980): Los micromamíferos (RODENTIA, INSECTIVORA, LAGOMORPHA Y CHIROPTERA) del sitio de ocupación achelense de Aridos 1 (Arganda, Madrid). *Pub. Excma. Dip. Prov. Madrid*. 161-202.

LOPEZ MARTINEZ, N. (1983): El papel de la microfauna en la reconstrucción paleoambiental del Pleistoceno. *V Reunión de Paleolíticos Españoles*. Peñíscola. 15 p.

LOPEZ MARTINEZ, N; RUIZ BUSTOS, A. (1977): Descubrimiento de dos yacimientos del Pleistoceno medio en el karst de la Sierra de Alfaguara (Granada). Síntesis estratigráfica de este período en la región bética. *Est. Geol.* 33, 255-265.

PARES, J. M; PEREZ GONZALEZ, A. (1995): Paleomagnetic Age for Hominid Fossils at Atapuerca Archaeological Site, Spain. *Science*, vol. 269, 830-832.

RUIZ BUSTOS, A. (1978): Edad y estudio faunístico del yacimiento kárstico de Las Yedras (Sierra de Alfaguara, Granada). *Est. Geol.*, 34, 323-330.

RUIZ BUSTOS, A; MICHAUX, J. (1976): Le site préhistorique nouveau de Cúllar Baza (Granada). Etude préliminaire et analyse de la faune des rongeurs. *Geol. Med.* III, 173-182.

RUIZ BUSTOS, A; GARCIA SANCHEZ, M. (1977): Las condiciones ecológicas del Musteriense en las depresiones granadinas. La fauna de micromamíferos de la cueva de La Carigüela (Piñar, Granada). *C.P.Gr.* 7-16.

RUIZ BUSTOS, A; TORO MOYANO, I; MARTIN SUAREZ, E; ALMOHALLA GALLEGU, M. (1982): Procesos evolutivos durante el cuaternario medio y superior en las poblaciones de pequeños mamíferos del sur de la Península Ibérica. Condiciones climáticas que implican e importancia bioestratigráfica. *Cuad. Preh. Univ. Gran.*, nº 7, 9-35.

SESE, C; GIL, E. (1987): Los micromamíferos del Pleistoceno medio del complejo kárstico de Atapuerca (Burgos). *in: El hombre fósil de Ibeas y el Pleistoceno de la Sierra de Atapuerca*. I. E. Aguirre, E. Carbonell, J. M. Bermúdez de Castro, Eds. Junta de Castilla y León, Valladolid, 75-92.

TONI, I; MOLERO, G. (1990): Los roedores (Rodentia, Mammalia) del yacimiento cuaternario de Pinilla del Valle (Madrid). *Act. Pal.* 359-373

Original recibido: Febrero 1996.  
Original aceptado: Marzo 1996.

## La accidentalidad en el sector minero de la Región de Murcia.

Por I. GONZALEZ CASAL (\*) y R. SANCHEZ MEDRANO (\*)

#### R E S U M E N

En el presente trabajo, en base a la estadística, se analizan las causas de accidentes graves y mortales para los distintos sectores de la minería regional. Los resultados se comparan con el sector minero nacional y con otros sectores de la industria regional. Finalmente, se expone la problemática actual en cuanto a seguridad minera.

Los resultados obtenidos son un punto de partida para elaborar planes y programas de actuación en seguridad minera de ámbito regional.

*Palabras clave:* Accidentes, Seguridad Minera, Riesgos Laborales, Prevención, Región de Murcia.

#### A B S T R A C T

In this work, based on statistics, the causes of severe and mortal accidents causes are analysed for the several sectors in regional mining. The results are compared with the national mining sector and other sector of regional industry. Finally, the present problematic of mining safety are exposed.

The results obtained are a starting point to make up plans and programmes of action on mining safety of regional compass.

*Key words:* Accidents, Mining Safety, Labour Risk, Prevention, Region of Murcia.

#### 1. INTRODUCCION

Tradicionalmente, la actividad minera regional se ha desarrollado en torno a la minería metálica, merced a la importancia de los yacimientos de sulfuros de las comarcas de Cartagena y Mazarrón, y en menor medida a la explotación de menas ferríferas. Desde el año 1991, la minería metálica se encuentra inactiva, pero ha tomado el relevo la explotación de rocas ornamentales, que ha situado a la Región de Murcia entre las primeras del país en cuanto a producción de caliza marmórea.

Hasta la década de los años cincuenta, la explotación de las minas metálicas se realizó por métodos subterráneos. A partir de esa fecha, comienza en la Región la explotación a cielo abierto por medio de grandes cortas, si bien, la minería subterránea continuó hasta que a finales de los años ochenta se cerró el último pozo de extracción. Paralelamente a la actividad extractiva surgieron numerosos lavaderos de mineral y fundiciones, que actualmente han desaparecido o se encuentran cerradas, a excepción de la fundición de zinc de Cartagena.

Por otro lado, la explotación de rocas ornamentales y minerales industriales en la región ha experimentado un crecimiento notable en los últimos años, con un aumento considerable del número de explotaciones y fábricas de corte,

(\*) Servicio de Minas de la Dirección General de Industria, Energía y Minas. Comunidad Autónoma de la Región de Murcia.

sustituyendo progresivamente en actividad a la tradicional minería metálica, tanto en valor de la producción y pueblo minero como, por desgracia, en número de accidentes.

El presente trabajo tiene como objetivos principales, determinar las causas inmediatas y básicas de los accidentes en la minería de la Región, para conocer donde y cómo hay que incidir para conseguir una reducción de los riesgos a que están sometidos los trabajadores mineros en el desempeño de sus tareas, y consiguientemente una disminución de los accidentes. Sus resultados son una primera aproximación del estado actual del sector minero en cuanto a accidentalidad y sus causas y pueden constituir un punto de partida para la elaboración de planes y programas de seguridad minera de ámbito regional.

## 2. ESTADISTICA DE ACCIDENTES

Para este estudio se ha escogido el período que va de 1981 a 1995, por considerarlo suficientemente representativo. Comprende los accidentes mortales y graves o muy graves ocurridos, que han sido comunicados por los explotadores y empresarios o de los que se ha tenido conocimiento en la Dirección General de Industria, Energía y Minas y que han sido investigados por su personal inspector (1).

No se incluyen los accidentes leves por no disponer de esta información sobre un período tan amplio y por ser actualmente objeto de un estudio específico. Tampoco se han utilizado los índices de frecuencia y gravedad, al ser muy escasos los explotadores que elaboran y proporcionan esta información, sin embargo se han utilizado otro tipo de índices igualmente válidos para establecer la comparación con otros sectores productivos regionales.

En principio, de la observación de la evolución del número de accidentes ocurridos en el sector minero regional (Fig. 1) no puede deducirse que exista en los últimos quince años una tendencia clara al aumento o disminución del número total de accidentes, sino una alternancia de mayor o menor siniestralidad a lo largo de los años.

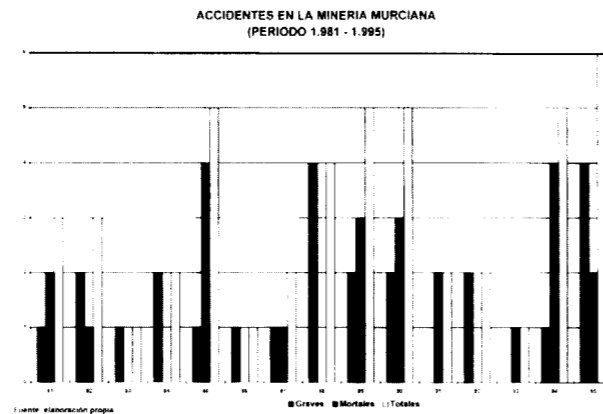


Figura 1

Entre los que presentan mayor número de accidentes destaca el período 1988 a 1990, posteriormente parece que existe una disminución en la tendencia, que desgraciadamente se recupera durante los dos últimos años considerados, si bien dos de los accidentes mortales ocurridos no fueron en explotaciones sino en labores mineras abandonadas, y no pueden considerarse como accidentes laborales, pues las víctimas no eran trabajadores mineros. En 1995 se alcanza el mayor número de accidentes, especialmente a causa de los ocurridos en el subsector de Establecimientos de Beneficio (talleres de elaboración de rocas ornamentales y plantas de machaqueo y clasificación de áridos).

En cuanto a la distribución por subsectores del número total de accidentes, se puede apreciar en la figura 2 que, en consonancia con la estructura del sector minero regional, la siniestralidad se reparte según la importancia relativa de los distintos subsectores durante este período.

Casi la mitad de los accidentes ocurridos corresponden al subsector de la Minería a Cielo Abierto (minería metálica, canteras y salinas), más de un tercio a los Establecimientos de Beneficio (entre los que se encuentran lavaderos de flotación y fundición de plomo, hoy día totalmente inactivos o desaparecidos, fundición de zinc, talleres de labrado de rocas ornamentales, plantas de trituración y fábricas de cerámica, cal, yeso y cemento), un 6,4% a los trabajos de Prospección y Explotación de aguas subterráneas (sondeos, pozos y galerías) que actualmente desarrollan gran actividad en la Región,

también un 6,4% ocurrió en labores mineras abandonadas (caídas al interior de antiguos accesos subterráneos), no propiamente en accidentes laborales pero sí como consecuencia directa de estas actividades y se han incluido por constituir una problemática especial en la Región de Murcia, y finalmente un 2% corresponde a la minería subterránea, que mantuvo escasa actividad en este período, cerrando el último pozo de extracción en el año 1989 (Fig. 2).

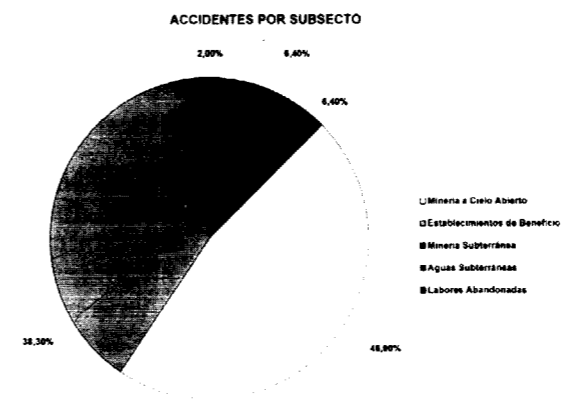


Figura 2

Entre los accidentes graves, que constituyen casi el 50% del total, se incluyen los que provocan incapacidades que han resultado ser generalmente permanentes. Destacan por su importancia los subsectores de minería a Cielo Abierto, con el 46,9% del total de accidentes ocurridos, y el de Establecimientos de Beneficio con más de un tercio del total de los sucesos, absorbiendo entre ambos subsectores más del 85% del total de accidentes.

Considerando solamente estos dos subsectores, los porcentajes de accidentes graves y mortales dentro de estas actividades difieren ligeramente, encontrándose que en Minería a Cielo Abierto los accidentes graves constituyen el 68% de este subsector, por un 32% los mortales. En Fábricas y Establecimientos de Beneficio, los accidentes mortales igualan en porcentaje al de graves, con el 50% del total de los accidentes estudiados.

Hay que destacar el hecho de que todos los accidentes investigados en relación con las labores abandonadas y los trabajos de Prospección y

Explotación de aguas subterráneas han resultado mortales en este período. Por otro lado, en los accidentes ocurridos, solamente han sufrido consecuencias graves o mortales una sola víctima, es decir, el número de accidentes se corresponde con el de accidentados.

## 3. ANALISIS DE LAS CAUSAS

A continuación se realiza un análisis de las causas inmediatas de accidentes graves y mortales en los dos subsectores de mayor relevancia en la Región de Murcia: la Minería a Cielo Abierto y los Establecimientos de Beneficio.

En la sistemática seguida en este análisis se han reducido las causas de los accidentes a dos: la existencia de condiciones peligrosas en el ambiente de trabajo o la realización de una acción peligrosa. Evidentemente no son excluyentes y en muchos casos ha resultado necesaria la concurrencia de toda una serie de factores. Sin embargo, para simplificar se ha considerado aquella que ha tenido mayor peso a la hora de desencadenarse el accidente.

### 3.1. Minería a cielo abierto

En las explotaciones mineras de la Comunidad de Murcia, figura como principal fuente de accidentes la maquinaria móvil (vuelcos, caídas con o desde máquinas), con un 36,4% del total de los ocurridos en el período de estudio (Figura nº 3). Seguidamente aparecen los aplastamientos

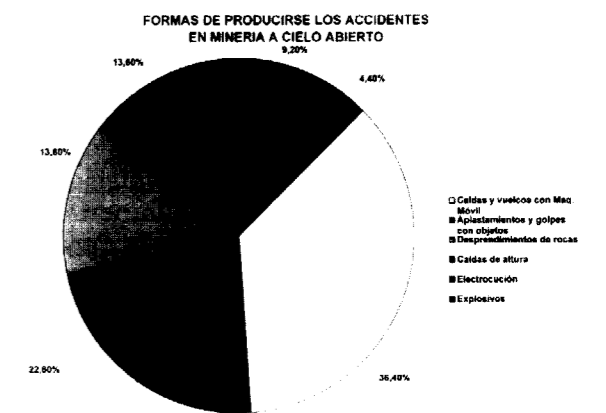


Figura 3

también un 6,4% ocurrió en labores mineras abandonadas (caídas al interior de antiguos accesos subterráneos), no propiamente en accidentes laborales pero sí como consecuencia directa de estas actividades y se han incluido por constituir una problemática especial en la Región de Murcia, y finalmente un 2% corresponde a la minería subterránea, que mantuvo escasa actividad en este período, cerrando el último pozo de extracción en el año 1989 (Fig. 2).

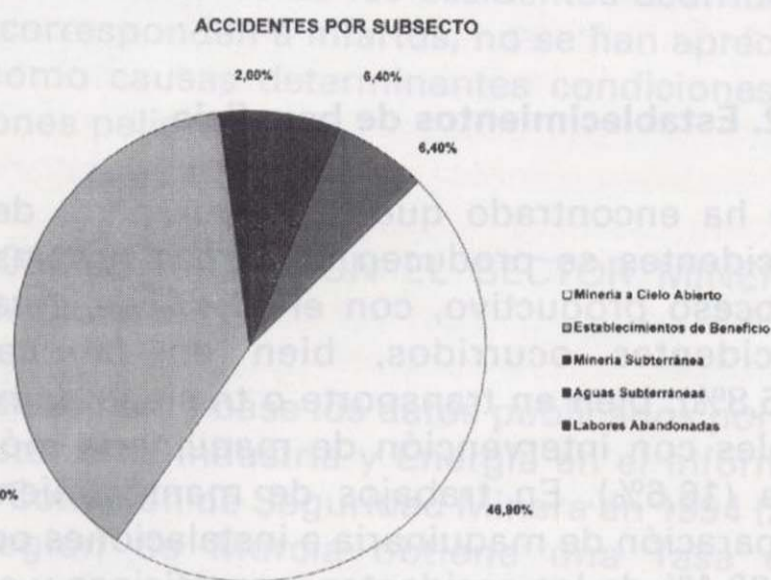


Figura 2

Entre los accidentes graves, que constituyen casi el 50% del total, se incluyen los que provocan incapacidades que han resultado ser generalmente permanentes. Destacan por su importancia los subsectores de minería a Cielo Abierto, con el 46,9% del total de accidentes ocurridos, y el de Establecimientos de Beneficio con más de un tercio del total de los sucesos, absorbiendo entre ambos subsectores más del 85% del total de accidentes.

Considerando solamente estos dos subsectores, los porcentajes de accidentes graves y mortales dentro de estas actividades difieren ligeramente, encontrándose que en Minería a Cielo Abierto los accidentes graves constituyen el 68% de este subsector, por un 32% los mortales. En Fábricas y Establecimientos de Beneficio, los accidentes mortales igualan en porcentaje al de graves, con el 50% del total de los accidentes estudiados.

Hay que destacar el hecho de que todos los accidentes investigados en relación con las labores abandonadas y los trabajos de Prospección y

Explotación de aguas subterráneas han resultado mortales en este período. Por otro lado, en los accidentes ocurridos, solamente han sufrido consecuencias graves o mortales una sola víctima, es decir, el número de accidentes se corresponde con el de accidentados.

### 3. ANALISIS DE LAS CAUSAS

A continuación se realiza un análisis de las causas inmediatas de accidentes graves y mortales en los dos subsectores de mayor relevancia en la Región de Murcia: la Minería a Cielo Abierto y los Establecimientos de Beneficio.

En la sistemática seguida en este análisis se han reducido las causas de los accidentes a dos: la existencia de condiciones peligrosas en el ambiente de trabajo o la realización de una acción peligrosa. Evidentemente no son excluyentes y en muchos casos ha resultado necesaria la concurrencia de toda una serie de factores. Sin embargo, para simplificar se ha considerado aquella que ha tenido mayor peso a la hora de desencadenarse el accidente.

#### 3.1. Minería a cielo abierto

En las explotaciones mineras de la Comunidad de Murcia, figura como principal fuente de accidentes la maquinaria móvil (vuelcos, caídas con o desde máquinas), con un 36,4% del total de los ocurridos en el período de estudio (Figura nº 3). Seguidamente aparecen los aplastamientos

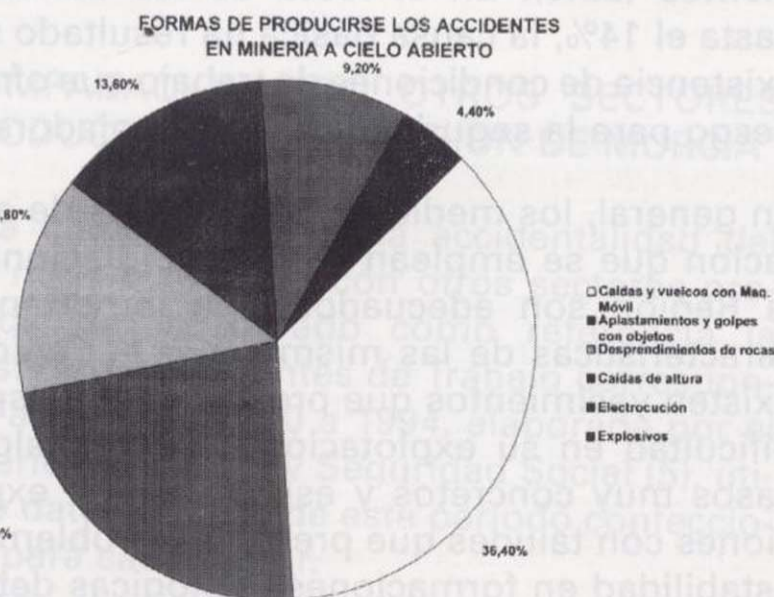


Figura 3

y golpes con máquinas u objetos con un 22,8% y los desprendimientos de rocas y las caídas de altura con un 13,6% cada una. Por último se encuentran la electrocución, con un 9,2% de los casos, seguido de los explosivos, con un 4,4%.

Por tipo de trabajos (Fig. 4), figuran en primer lugar los de carga, transporte y vertido que en conjunto suponen el 40,9% de los accidentes ocurridos, seguidos de los de arranque, por un lado, y mantenimiento y reparación de máquinas e instalaciones por otro, con el 36,4% y 22,7% respectivamente.

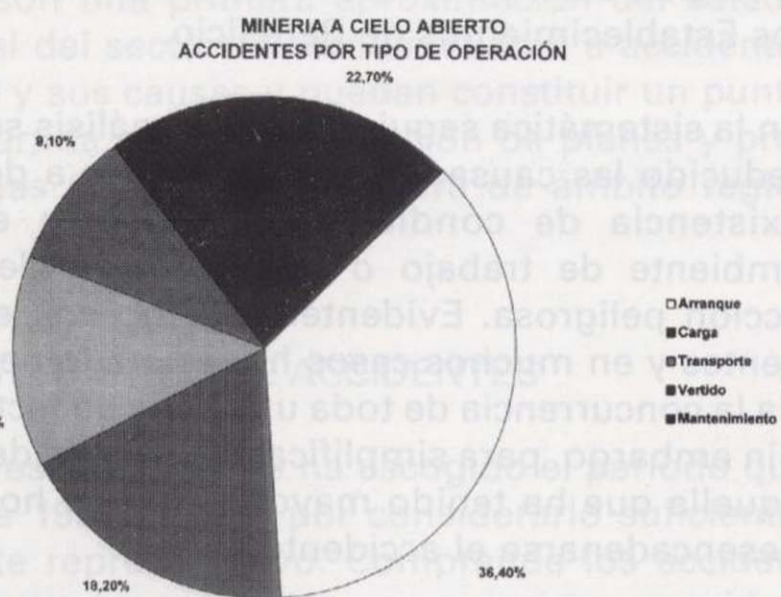


Figura 4

En este subsector, se ha encontrado que el 86% de los accidentes ha tenido como causa directa acciones peligrosas por parte de los operarios, bien por hábitos de trabajo que implicaban un desconocimiento del riesgo a que estaba sometido el trabajador (64%), bien debido a una conducta imprudente contraria a normas o reglamentos (22%). En el resto de los accidentes, hasta el 14%, la causa básica ha resultado ser la existencia de condiciones de trabajo que ofrecían riesgo para la seguridad de los trabajadores.

En general, los medios y los métodos de explotación que se emplean en las explotaciones de la Región son adecuados a la importancia y características de las mismas. En la Región no existen yacimientos que presenten una especial dificultad en su explotación, salvo en algunos casos muy concretos y específicos de explotaciones con taludes que presentan problemas de estabilidad en formaciones geológicas determinadas.

En los últimos años se advierte una mayor mecanización, fundamentalmente en las explotaciones de rocas ornamentales, que también ha llevado a un incremento en el número de accidentes mortales y graves en este tipo de explotaciones. De hecho la maquinaria móvil está presente hasta en un 65% de los casos de accidentes, sin embargo, no es el estado de la maquinaria el responsable de la mayoría de estos accidentes sino los fallos en el modo de operación.

### 3.2. Establecimientos de beneficio

Se ha encontrado que la mayor parte de los accidentes se producen en tareas propias del proceso productivo, con el 72,4% del total de accidentes ocurridos, bien en fabricación (55,8%), bien en transporte o trasiego de materiales con intervención de maquinaria móvil o fija (16,6%). En trabajos de mantenimiento y reparación de maquinaria e instalaciones ocurre el 22,1% de los accidentes y en oficinas y administración el 5,5% (Fig. 5).

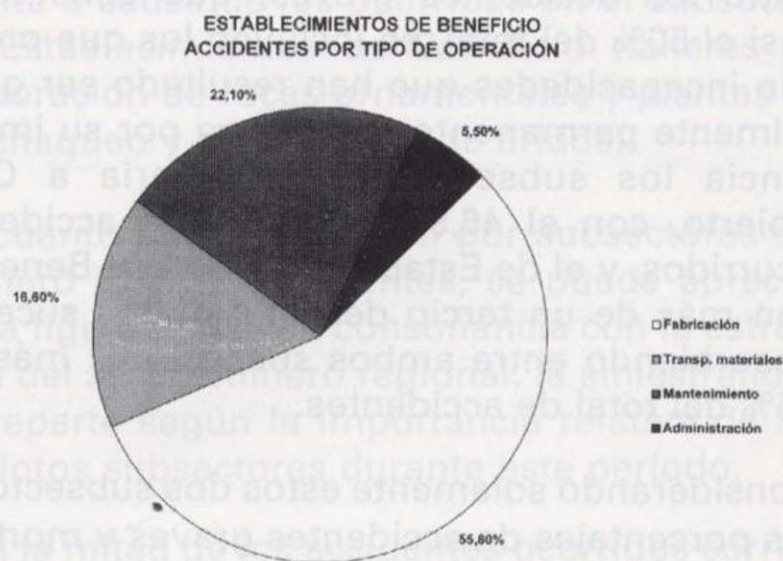


Figura 5

Por la forma de producirse, la mayor parte corresponde, por este orden, a caídas de alturas, seguido de atropellos por maquinaria móvil y de atrapamientos, aplastamientos y golpes por herramientas u objetos.

De la investigación de cada accidente, se ha encontrado en el origen de casi la mitad de los mismos un hábito inseguro en la forma de pro-

y golpes con máquinas u objetos con un 22,8% y los desprendimientos de rocas y las caídas de altura con un 13,6% cada una. Por último se encuentran la electrocución, con un 9,2% de los casos, seguido de los explosivos, con un 4,4%.

Por tipo de trabajos (Fig. 4), figuran en primer lugar los de carga, transporte y vertido que en conjunto suponen el 40,9% de los accidentes ocurridos, seguidos de los de arranque, por un lado, y mantenimiento y reparación de máquinas e instalaciones por otro, con el 36,4% y 22,7% respectivamente.

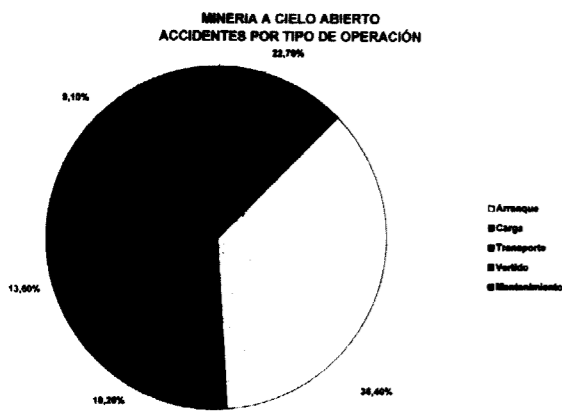


Figura 4

En este subsector, se ha encontrado que el 86% de los accidentes ha tenido como causa directa acciones peligrosas por parte de los operarios, bien por hábitos de trabajo que implicaban un desconocimiento del riesgo a que estaba sometido el trabajador (64%), bien debido a una conducta imprudente contraria a normas o reglamentos (22%). En el resto de los accidentes, hasta el 14%, la causa básica ha resultado ser la existencia de condiciones de trabajo que ofrecían riesgo para la seguridad de los trabajadores.

En general, los medios y los métodos de explotación que se emplean en las explotaciones de la Región son adecuados a la importancia y características de las mismas. En la Región no existen yacimientos que presenten una especial dificultad en su explotación, salvo en algunos casos muy concretos y específicos de explotaciones con taludes que presentan problemas de estabilidad en formaciones geológicas determinadas.

En los últimos años se advierte una mayor mecanización, fundamentalmente en las explotaciones de rocas ornamentales, que también ha llevado a un incremento en el número de accidentes mortales y graves en este tipo de explotaciones. De hecho la maquinaria móvil está presente hasta en un 65% de los casos de accidentes, sin embargo, no es el estado de la maquinaria el responsable de la mayoría de estos accidentes sino los fallos en el modo de operación.

### 3.2. Establecimientos de beneficio

Se ha encontrado que la mayor parte de los accidentes se producen en tareas propias del proceso productivo, con el 72,4% del total de accidentes ocurridos, bien en fabricación (55,8%), bien en transporte o trasiego de materiales con intervención de maquinaria móvil o fija (16,6%). En trabajos de mantenimiento y reparación de maquinaria e instalaciones ocurre el 22,1% de los accidentes y en oficinas y administración el 5,5% (Fig. 5).



Figura 5

Por la forma de producirse, la mayor parte corresponde, por este orden, a caídas de alturas, seguido de atropellos por maquinaria móvil y de atrapamientos, aplastamientos y golpes por herramientas u objetos.

De la investigación de cada accidente, se ha encontrado en el origen de casi la mitad de los mismos un hábito inseguro en la forma de pro-

ceder del trabajador y en casi una cuarta parte de ellos una conducta claramente imprudente, con infracción de normas o reglamentos por parte del operario. En conjunto, hasta el 71% de los accidentes investigados en este subsector muestran procedimientos de trabajo incorrectos desde el punto de vista de la seguridad. Por otro lado, en el 15% de los casos se sitúa en el origen de los accidentes la existencia de condiciones peligrosas o inseguras en el entorno de trabajo. En el 14% restante de los accidentes ocurridos, que corresponden a infartos, no se han apreciado como causas determinantes condiciones o acciones peligrosas.

### 4. COMPARACION CON EL SECTOR MINERO NACIONAL

Tomando como base los datos publicados por el Ministerio de Industria y Energía en el Informe de la Comisión de Seguridad Minera en 1994 (2), la Región de Murcia obtiene una Tasa de Frecuencia (relación entre el número de accidentes mortales por millón de horas trabajadas) en el período 1983 a 1993 de 0,41. Este valor coincide con la Tasa de Frecuencia media durante el mismo período en el sector minero nacional, excluido el carbón. Murcia se sitúa en el noveno lugar entre las Comunidades Autónomas españolas en cuanto a Tasa de Frecuencia (Fig. 6).

Considerando exclusivamente el subsector de canteras, que resulta ser el de mayor relevancia

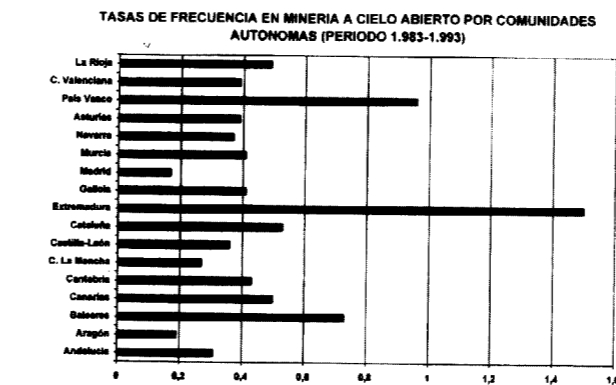


Figura 6

actual en la Región de Murcia, se tiene que la Tasa de Frecuencia media en el mismo período se sitúa en 0,31, por debajo de la media nacional que resultó ser de 0,52. La Comunidad Autónoma de Murcia es la tercera a nivel nacional con la Tasa más baja, detrás de la Comunidad de Madrid y de Castilla-La Mancha.

En cuanto a las formas de producirse los accidentes mortales, en base a los datos elaborados por el Instituto Tecnológico GeoMinero de España para el período 1987-1992 (3) y (4), encontramos que, a nivel nacional, la forma más frecuente de accidentes son las caídas desde o con maquinaria móvil, con un 36,3% de los accidentes mortales, cifra que resulta prácticamente idéntica a la obtenida en la Región de Murcia en el período 1981 a 1995 con un 36,4% del total de los accidentes ocurridos. También, con valores similares se encuentra como causa de accidentes los atropellos, golpes, atrapamientos o aprisionamientos con máquinas o herramientas con un 23,4% a nivel nacional y un 22,8% para la Región de Murcia.

Por debajo de la media nacional, como fuente de accidentes se encuentran los desprendimientos de rocas, (con un 13,6% frente a un 20,9%) y las caídas de altura, con un 13,6% en la Región de Murcia frente a un 20,2% a nivel del Estado. Por encima, aunque con órdenes de magnitud similares, se sitúan como fuente de accidentes la electricidad y los explosivos con un 9,2% en la minería murciana frente al 4,8% en el total nacional y un 4,4% frente al 1,6%, respectivamente.

### 5. COMPARACION CON OTROS SECTORES PRODUCTIVOS DE LA REGION DE MURCIA

Para la comparación de la accidentalidad del sector minero regional con otros sectores productivos se ha tomado como referencia la Estadística de Accidentes de Trabajo correspondiente a los años 1990 a 1994, elaborada por el Ministerio de Trabajo y Seguridad Social (5), utilizando datos medios de este período confeccionados para cada sector.

En la Comunidad de Murcia, el sector Industrial

es el que presenta el mayor porcentaje de accidentes respecto del total, seguido por el de servicios, que es el que ocupa a algo más de la mitad de la población trabajadora de la región, a continuación se sitúan la Construcción y la Agricultura. Dentro del sector industrial los accidentes en minería (extracción de minerales metálicos, no metálicos y canteras, metalurgia e industrias de producción de minerales no metálicos) en el período considerado, suponen un 10% de los ocurridos en la Industria regional.

El subsector de la industria donde ocurren mayor número de accidentes es en las industrias alimentarias seguido de las de Transformación y Fabricación de Productos Metálicos, Madera, Corcho y Muebles y Minería. Esta distribución, en principio está relacionada con la población ocupada en cada subsector industrial. Así, la industria de Alimentos, Bebidas y Tabaco ocupan a un tercio de la población industrial y consecuentemente se produce un mayor número de accidentes.

Para realizar un análisis comparativo de la accidentalidad entre subsectores industriales, utilizamos como índice la denominada Tasa de Incidencia, esto es, el número de accidentes (leves, graves y mortales) por cada mil trabajadores, excluyendo los accidentes in itinere. Los datos relativos a población media ocupada en cada subsector se han estimado en base al Censo de Población de la Región de Murcia de 1991 (6) y (7).

Considerando exclusivamente el sector Indus-

TASA DE INCIDENCIA POR SUBSECTORES INDUSTRIALES	
Construcción de maquinaria y equipos Eléctricos	220
Minería	185
Industria Química	65
Transformación y Fabricación de productos Metálicos	200
Alimentación, Bebida y Tabaco	115
Construcción de maquinaria y equipos Mecánicos	145
Cuero y Calzado	120
Madera Corcho y Muebles	100
Resto Industrias	105
Total Industria	110

Cuadro 1

trial, en el cuadro 1 se ha representado la Tasa de Incidencia media estimada para los distintos subsectores.

La minería, con 185, es el tercer subsector Industrial en Tasa más elevada, sólo superado por la industria de Fabricación de Material Eléctrico y Electrónico y la de Transformación de Productos Metálicos. La Tasa para el total de la población ocupada en el sector Industrial es de 110.

Pasamos ahora a analizar la gravedad de los accidentes por subsectores, considerando solamente los accidentes graves y mortales por cada mil trabajadores en el mismo período 1990 - 1994. El sector de la construcción, con 2,2 accidentes graves y mortales por cada mil trabajadores, es el que presenta mayor Tasa, seguido por la Industria. Agricultura y Servicios están por debajo de la media regional, que es de 1,2.

Por subsectores industriales encontramos en el cuadro 2 que la Minería, con 4,3 accidentes graves y mortales por cada mil trabajadores, ocupa el segundo lugar sólo superado por la Industria de Construcción de Maquinaria Eléctrica y Electrónica, siendo el promedio del sector industrial en conjunto de 2. De todo lo anterior se deduce que a nivel autonómico la actividad minera es uno de los sectores donde se producen, proporcionalmente al número de trabajadores empleados, más accidentes y de mayor gravedad en sus consecuencias que en el resto de los sectores productivos y subsectores industriales.

ACCIDENTES GRAVES Y MORTALES POR MIL TRABAJADORES EN SUBSECTORES INDUSTRIALES	
Construcción de maquinaria y equipos Eléctricos	5
Minería	4,3
Industria Química	1,8
Transformación y Fabricación de productos Metálicos	3,9
Alimentación, Bebida y Tabaco	1,5
Construcción de maquinaria y equipos Mecánicos	2,5
Cuero y Calzado	2,5
Madera Corcho y Muebles	2,3
Resto Industrias	0,9
Total Industria	2

Cuadro 2

## 6. DEFICIENCIAS ACTUALES EN MATERIA DE SEGURIDAD

Como se ha visto en los apartados precedentes, en el conjunto del sector minero regional el factor humano es el responsable de un elevado porcentaje de los accidentes investigados (alrededor del 75%, acciones peligrosas en la Fig. 7). Profundizando un poco más, se ha detectado que el 19% de los casos, han tenido como causa una conducta claramente imprudente por parte del trabajador, bien del propio accidentado bien de un compañero, que implicaba un insuficiente conocimiento del riesgo a que estaba sometido, una actitud de desprecio al mismo, o incluso un exceso de celo en el trabajo. En el origen de estos accidentes subyace una falta de información a los trabajadores, pero sobre todo ausencia de formación y motivación en materia de seguridad.

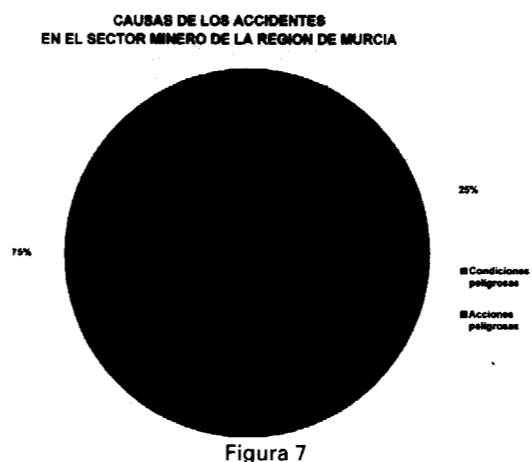


Figura 7

El trabajador debe conocer los riesgos a que está sometido durante el desempeño de sus tareas y debe estar motivado para adoptar una actitud vigilante frente a las situaciones imprevistas que con relativa frecuencia surgen en su trabajo. La formación debe iniciarse al ingresar en la empresa de manera que ningún trabajador se incorpore a un puesto sin recibir una instrucción suficiente de los riesgos del trabajo a que va a ser destinado y una formación profesional sobre la forma correcta de realizar su trabajo. Esta formación debe estar presente de

forma continuada a lo largo de toda su vida profesional.

Generalmente la ausencia de formación profesional, y desde luego en seguridad, es notoria en la minería murciana. Los trabajadores se incorporan a sus puestos sin ser informados ni formados adecuadamente y aprenden, en el mejor de los casos, de los trabajadores con más experiencia, con el gran valor que supone ésta, pero también con los vicios adquiridos en su vida profesional, ya que éstos a su vez no han sido instruidos sobre la forma de realizar su trabajo con seguridad.

Del estudio realizado, también se pone de manifiesto otro importante dato: hasta el 58% de los accidentes investigados tienen su origen en un hábito de trabajo incorrecto desde el punto de vista de la seguridad. En su mayor parte podrían haber sido evitados, o minimizadas sus consecuencias, de haber existido una norma interna y un procedimiento seguro de trabajo que garanticen la seguridad de las operaciones habituales, suficientemente estudiadas y programadas en las que se tuviesen en cuenta todos los riesgos más comunes del puesto de trabajo y que fuesen perfectamente conocidas y asumidas por el trabajador.

En este sentido hay que resaltar las posibilidades que ofrece el Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera a través de las Disposiciones Internas de Seguridad reguladas en su artículo 5º, por la importancia que les atribuye como herramienta para la prevención de riesgos en las distintas operaciones mineras.

Los Directores Facultativos pueden y deben ejercer un importante papel en cuanto a la organización de la seguridad en el tipo de explotaciones presentes en la Región de Murcia, ya que son los encargados de establecer las Disposiciones Internas de Seguridad y a través de ellas regular y adaptar circunstancias concretas y especiales que afectan a cada explotación, y que pueden diferir sensiblemente de unas a otras, por lo que deben ser cuidadosamente estudiadas previamente a su elaboración. En nuestra opinión, las Disposiciones Internas de

Seguridad más que enunciar principios generales sobre prevención, deben descender a los detalles concretos de operación y constituirse en auténticos procedimientos seguros de trabajo, conocidos y asumidos por todos los trabajadores.

Por otra parte, hasta en el 25% de los casos el accidente se ha debido a la existencia de condiciones peligrosas en el puesto de trabajo, ajenas al trabajador y a la forma de proceder en el mismo, y que ponen de manifiesto una insuficiente concienciación y motivación en seguridad por parte de los explotadores, al no crear los mecanismos y medios adecuados para detectar y eliminar o minimizar situaciones de riesgo potencial.

Entre las causas básicas que dan origen a estos accidentes, pueden citarse, la no subsanación de fallos ya detectados con anterioridad, un deficiente mantenimiento preventivo, la ausencia de adecuados y periódicos controles internos, la escasa o nula formación del personal, etc., en definitiva, todo lo que conlleva una correcta organización y gestión de la seguridad en el seno de las empresas.

Para la reducción de los accidentes que tienen su origen en estas causas, es importante la acción de la Administración a través de una continuada inspección y vigilancia de las explotaciones. Sin embargo, no puede dejarse exclusivamente a la Administración este papel, que debería ser sólo de supervisión.

En efecto, salvo en contadas excepciones, los empresarios mineros de la región sólo actúan en seguridad a requerimientos de la inspección o, una vez reiterados, tras la imposición de sanciones o, finalmente, después de ocurrido el accidente.

Pero incluso en estos casos, generalmente se acude a soluciones puntuales. Aún se considera el accidente como un suceso fortuito e impredecible y no se profundiza en el auténtico origen y causas de la existencia de condiciones y acciones peligrosas que producen el accidente. Una vez corregidas las causas inmediatas, con el paso del tiempo, la ausencia de una verdadera

planificación de prevención conduce a que se reproduzcan las situaciones de riesgo.

Hay todo un camino que recorrer para concienciar al empresario de que un trabajo bien hecho es el que se realiza con seguridad. La Administración por su parte está convencida de que la sanción o la aplicación de otras medidas más drásticas, no son el mejor camino para conseguir esta mentalización necesaria, ya que, una vez más, no se corrige el problema en su origen.

## 7. CONSIDERACIONES FINALES

Aunque la situación en cuanto a seguridad minera regional no es preocupante, se advierte en los dos últimos años una cierta tendencia al incremento de la siniestralidad, fundamentalmente en el subsector de Establecimientos de Beneficio. En relación con otros sectores productivos de la industria regional, la minería continúa siendo una de las actividades donde se produce un mayor número de accidentes y de consecuencias más graves, comparativamente al número de trabajadores empleados.

Comparando la situación con el sector minero nacional en el período 1983-1993, la Región de Murcia se encuentra en la media de las Comunidades Autónomas españolas en cuanto a Tasa de frecuencia de accidentes en minería a cielo abierto excluido el carbón. Considerando exclusivamente el subsector de minería de canteras, la Tasa es aún más baja en este período, situándose en el decimocuarto lugar.

Si en los últimos años se aprecia una mejora en las condiciones de los puestos de trabajo, debido a la puesta en vigor y a la exigencia de la normativa de seguridad en explotaciones a cielo abierto, también es cierto que el factor humano continúa siendo determinante en las causas de los accidentes. En este sentido, la motivación y la formación en seguridad, desde el empresario minero hasta el operario, es fundamental para conseguir a medio plazo una disminución de la accidentalidad minera regional.

Por ello, la Administración regional tiene previsto la realización de cursos de formación especí-

ficos en materia de seguridad a dos niveles, por un lado dirigidos a técnicos y directivos de empresas mineras y, por otro, a encargados de explotaciones y operarios, con la intención de concienciar a toda la cadena de mando de la necesidad de estar implicada en la seguridad como un objetivo más de la empresa, junto con la producción, la calidad o la protección al medio ambiente.

También, como ya existe en otro tipo de industrias, deben crearse especialidades de formación profesional en ciertas actividades del ámbito minero, donde tiene que estar presente una formación en seguridad. En concreto, por la importancia de este subsector en la Región de Murcia, debe promoverse la creación de Talleres o Escuelas de Formación Profesional en las actividades relacionadas con la industria de la piedra natural, desde la extracción a la elaboración.

Por otra parte, las Disposiciones Internas de Seguridad pueden constituir un instrumento muy eficaz para la prevención de riesgos en las explotaciones, siempre que se conciben y elaboran en base a una metodología que implique identificar, evaluar y eliminar o corregir los riesgos, descendiendo a detalles concretos de operación, y poniéndolas en práctica dentro de una adecuada organización de la seguridad en las explotaciones.

En este sentido, la reciente Ley de Prevención de Riesgos Laborales viene a consagrar los principios generales de la seguridad integrada en el

conjunto de actividades de la empresa. La identificación y evaluación de los riesgos de cada puesto de trabajo, los controles periódicos de las condiciones y acciones potencialmente peligrosas, la investigación de accidentes e incidentes, la información y formación de los trabajadores, etc., son todos ellos instrumentos para una eficaz organización y gestión de la seguridad en la empresa, que obligatoriamente deberán poner en práctica los empresarios mineros.

## REFERENCIAS

(1) CONSEJERIA DE INDUSTRIA, TRABAJO Y TURISMO. Memoria de Actividades de la Dirección General de Industria, Energía y Minas. Comunidad Autónoma de la Región de Murcia. Varios años.

(2) MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGIA. Informe de la Comisión de Seguridad Minera. 1994.

(3) INSTITUTO TECNOLOGICO GEOMINERO DE ESPAÑA - MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGIA. Manual de Seguridad en Explotaciones a Cielo Abierto. 1991.

(4) E.T.S. DE INGENIEROS DE MINAS DE MADRID - LOEMCO. Manual de Aridos. 1994.

(5) MINISTERIO DE TRABAJO Y SEGURIDAD SOCIAL. Estadística de Accidentes de Trabajo. Años 1990 a 1994.

(6) CONSEJERIA DE ECONOMIA. La Región de Murcia en cifras. Comunidad Autónoma de la Región de Murcia. 1990.

(7) CONSEJERIA DE FOMENTO Y TRABAJO. Censo de Población de la Región de Murcia 1991. Comunidad Autónoma de la Región de Murcia. 1994.

Original recibido: Febrero 1996.

Original aceptado: Marzo 1996.



## AGUAS SUBTERRANEAS

# Reordenación hidrológica de cuencas o subcuencas hidrográficas con intervención de sistemas acuíferos subterráneos.

Por G. LOPEZ ARECHAVALA (\*), J. A. LOPEZ GETA (\*\*) y J. M. MURILLO DIAZ (\*\*)

## RESUMEN

El uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas para satisfacer una misma demanda es una práctica escasa en nuestro País.

El Libro Blanco de las Aguas Subterráneas consciente de este hecho propone la realización de un programa concreto sobre esta temática que titula "INTEGRACION DE LAS UNIDADES HIDROGEOLOGICAS EN LOS SISTEMAS DE EXPLOTACION". Este programa está compuesto de estudios, proyectos y obras.

La Dirección General de Obras Hidráulicas y el Instituto Tecnológico Geominero de España (Diciembre 1994) consideraron que el desarrollo de dicho Programa precisaba abordar previamente la definición de las fórmulas concretas de integración de los recursos superficiales y subterráneos. Para lograr este objetivo establecieron la realización de un estudio específico de corta duración, que se efectuaría teniendo en cuenta las directrices y demás determinaciones de los Planes Hidrológicos. Los resultados obtenidos en dicho estudio han puesto de manifiesto que 71 unidades hidrogeológicas se podrían integrar, en principio, junto a 73 embalses y 16 grandes infraestructuras de conducción en 29 sistemas de aprovechamiento coordinado.

Estas conclusiones indican claramente que en los próximos años se producirá una importante demanda de información sobre conceptos, términos, metodología y trabajos relacionados con la utilización conjunta.

A este respecto, los autores del presente artículo han considerado que es muy interesante recuperar estudios no difundidos hasta la fecha sobre la temática anteriormente mencionada. Las ideas contenidas en el texto que se expone a continuación responden a esta filosofía y datan de finales del año 1992.

*Palabras clave:* Uso conjunto. Recarga artificial. Reordenación y gestión hidrológica. Embalses de regulación. Sistemas acuíferos. Sobreexplotación. Regulación de manantiales.

## ABSTRACT

The conjunctive use of surface and groundwater resources in order to satisfy the same demand is a short practice in our country.

The "Libro Blanco de las Aguas Subterráneas" (White book of groundwater), knowing this facts, proposes the realization of a concrete program called "HIDROGEOLOGICAL UNITS INTEGRATION INTO THE EXPLOITATION SYSTEMS". This program is composed by studies, projects and works.

The General Direction of Hydraulic Works and the Instituto Tecnológico Geominero de España (Dec. 1994) thought that in order to develop this program the previous definition of the concrete formula is necessary. In order to get this objective, according to the Hydrological Planning directrices and determinations, a short specific study was established and made. The obtained results have shown that 71 hidrogeological units could be integrated, at first, with 73 reservoirs and 16 great pipeline structures into 29 coordinated exploitation systems.

These conclusions are clearly indicating that during the next years an important information about concepts, terms, methodology and conjunctive use related works will be required.

According to this, the present article authors have considered that the recovery of until today non published studies about the mentioned subject is very interesting. The ideas contained in the text now exposed agree with this philosophy and are referred to the end of 1992.

*Key words:* Conjunctive use, artificial recharge, reordering and hidrological management, regulation reservoirs, aquifer systems, overexploitation, spring regulation.

(\*) IDRENA.

(\*\*) Instituto Tecnológico Geominero de España.

## 1. INTRODUCCION

La presente nota tiene por finalidad describir y justificar el contenido de un programa de trabajos para los estudios que, con el enfoque y el nivel de concreción propios de un anteproyecto, llevaría a cabo el **Instituto Tecnológico Geominero de España (ITGE)** en distintas cuencas y subcuencas hidrográficas de nuestro país con los tres siguientes objetivos:

- diseñar las actuaciones a aplicar y "preevaluar" los efectos de la reordenación hidrológica aplicable a sistemas acuíferos sobreexplotados existentes en tales cuencas o subcuencas;
- analizar y "preevaluar" las posibilidades y resultados que se derivarían de la intervención de los sistemas acuíferos subterráneos existentes en dichas cuencas o subcuencas, en la reordenación y optimización hidrológica de las mismas, es decir, en el logro de una superior regulación (\*) de sus aportaciones totales; y
- diseñar y valorar con precisión los subsiguientes proyectos de investigación hidrogeológica e hidrológica aplicada, necesarios para determinar las condiciones precisas reordenación hidrológica y de gestión coordinada, al nivel ya de "proyecto".

El programa de trabajos que seguidamente se

(\*) Conviene que ya desde el principio precisemos el concepto de *regulación*: adaptación o reordenación de los recursos hídricos disponibles en una cuenca hidrográfica a la **ley temporal relativa** de presentación de las demandas a atender, de acuerdo con un preestablecido criterio sobre garantía de dotación o suministro. En el caso de la escorrentía estrictamente subterránea (antes de que emerja), dicho objetivo es conseguible mediante simple bombeo de magnitud equivalente a la demanda a dotar. La forma más sencilla y "clásica" (pero no la única, como más adelante se indicará) de conseguir una cierta regulación de la escorrentía estrictamente superficial (la parte de la lluvia útil que no llega a infiltrarse) es alterando su régimen natural de circulación: embalsando aportaciones en épocas excedentarias, para desembalsarlas cuando las demandas superen a las aportaciones. La escorrentía superficial de origen subterráneo - la descarga de un manantial o el drenaje de un acuífero por un río - es regulable por medio de embalses (conjuntamente con la escorrentía estrictamente superficial) o por técnicas hidrogeológicas: bombeo en sondeos de emplazamiento adecuado, de acuerdo con ritmos adaptados a la demanda a atender, al hidrodinamismo del correspondiente acuífero y a su circulación subterránea.

describe ha sido elaborado partiendo de los siguientes principios básicos:

- 1.º Debe ser un **programa-marco compatible con los diversos contextos hidrológicos e hidrogeológicos encontrables** en las cuencas o subcuencas a las que vayan a estar referidos los mencionados estudios de anteproyecto, razón por la cual no es posible agotar la descripción del tratamiento a dar a las múltiples situaciones que se planteen en cada caso, ni efectuar una valoración económica precisa de los mismos.
- 2.º Tanto en el nivel aquí contemplado, de simple anteproyecto, como en la fase subsiguiente de mayor precisión hidrológica e hidrogeológica, constitutiva de auténticos proyectos valorados, los estudios planteados tendrían por única finalidad la integración óptima de nuestros principales sistemas acuíferos en los planes de gestión hidrológica de las cuencas hidrográficas españolas, para que la misma fuese llevada a cabo por los organismos de gestión correspondientes (confederaciones, juntas de aguas, servicios hidráulicos, etc.). Por consiguiente, por lo que respecta a las demandas de agua existentes y proyectadas, **se deben asumir los planes oficiales de dotación de las demandas futuras**, sin modificarlas en su cuantía, localización o distribución, **pero sí conviene revisar las valoraciones que en tales planes se haya hecho de las demandas actuales**, utilizando para ello todas las estimaciones existentes sobre las mismas.
- 3.º No podría añadirse más infraestructura de conducción que la de carácter secundario eventualmente necesaria para captar, explotar e incorporar sistemas acuíferos subterráneos a la red principal de distribución que se encuentre ya en funcionamiento o que esté incluida en la planificación hidrológica oficial.
- 4.º Los trabajos a realizar en los estudios de anteproyecto que son objeto de la presente propuesta serían fundamentalmente **trabajos de recopilación, análisis hidrogeológico e hidrodinámico crítico, tratamiento matemático y síntesis de la información hidrológica e hidrogeológica preexistente**, sin posibilidad de llevar a cabo trabajos complementarios sobre el terreno.

Con los objetivos y el enfoque expuestos, la presente nota define primeramente (apartado 2.) los criterios con los que deben ser identificadas las unidades de estudio, no necesariamente coincidentes con la totalidad de una de las doce cuencas hidrográficas oficiales, para describir después el contenido y planteamiento de los trabajos de gabinete a realizar en cuanto a recopilación, análisis, tratamiento, diseño y "preevaluación", de la información hidrológica e hidrogeológica de base (apartado 3.) y de las actuaciones de reordenación hidrológica y gestión coordinada a aplicar (apartado 4.).

## 2. DEFINICION DE LAS UNIDADES DE ESTUDIO

A diferencia de la mayor parte de los estudios hidrológicos o hidrogeológicos, que suelen realizarse para analizar, caracterizar, evaluar u optimizar la utilización de los recursos hídricos superficiales y/o subterráneos, y que en general están referidos a ámbitos geográficos claramente definidos - una cuenca hidrográfica, un sistema acuífero subterráneo, una unidad hidrogeológica, etc. -, los estudios contemplados en esta nota debieran tratar con lo que se podría denominar **unidades de reordenación y gestión hidrológica coordinada (URGHC)**, entendiendo por tales unas determinadas agrupaciones de los siguientes "elementos" interdependientes y susceptibles de coordinación y gestión optimizada para conseguir una mejor dotación de las demandas de agua localizadas en su ámbito de influencia:

- **Unidades de demanda.** Entre ellas deben incluirse las siguientes demandas, atendidas ya o atendibles en el futuro aprovechando la infraestructura de conducción y distribución existente y/o la proyectada, mediante algunas de las fuentes de recurso hídrico integradas en la **URGHC** de que se trate:
  - el abastecimiento público actual y futuro de un determinado conjunto de núcleos urbanos, cuya localización hidrográfica no constituye un factor limitante;
  - las necesidades de agua para el riego existente y previsto en zona dominada por la infraestructura integrada en la unidad, tanto la de carácter superficial (embalses, canales, acequias, etc.), como

la de explotación y conducción de aguas subterráneas;

- los usos industriales que deban ser dotados mediante la actual o proyectada red pública de distribución de agua;
  - las necesidades medioambientales y recreativas: esorrentía sanitaria, riego de parques y jardines, instalaciones lúdicas o turísticas, etc.; y
  - el apoyo a cuencas o subcuencas hidrográficas más o menos vecinas, mediante el trasvase a las mismas de aportaciones propias más o menos reguladas.
- **Fuentes de recurso.** Como tales deben ser considerados los siguientes orígenes de recursos hídricos que estén ya siendo aprovechados - o que podrían estarlo - en la dotación de las demandas anteriores, utilizando para ello sólo la infraestructura de distribución existente o la ya proyectada:
    - los embalses, aislados o constitutivos de sistemas de regulación (\*), construidos ya o en proyecto;
    - los sistemas acuíferos subterráneos independientes o que formen parte de unidades hidrogeológicas (aunque no necesariamente la totalidad de las mismas), que sean o puedan ser racionalmente utilizados en la dotación de las demandas incluidas en la coordinación;
    - los aportes, regulados o no, trasvasados desde otras cuencas hidrográficas o desde **URGHC** vecinas; y
    - los recursos hídricos de procedencias diversas, tales como las aguas residuales urbanas depuradas, el agua de mar desalinizada, las aguas superficiales o subterráneas de salinidad excesiva sometidas a desmineralización, etc.

(\*) Serán incluibles los embalses que tengan por misión la regulación de aportaciones superficiales para la dotación de demandas consuntivas, aunque deban cumplir además funciones tales como la producción eléctrica, la laminación de avenidas, etc.

- **Infraestructura principal de conducción y distribución.** Comprende los cauces naturales, los azudes de derivación, los canales, acequias y conducciones principales de distribución y las estaciones de elevación por bombeo que, en funcionamiento actual o en proyecto, conformen la red primaria de conducción y distribución del recurso hídrico, desde las salidas de las **fuentes de recurso** hasta las cabeceras de las **unidades de demanda**.

Integradas por una determinada combinación de los elementos descritos, las **URGHC** pueden corresponder, según los casos, a una parte de algunas de nuestras grandes cuencas hidrográficas, o a toda la extensión de otras, aunque la localización "interhidrográfica" de muchos de los sistemas acuíferos a integrar y la frecuente interconexión de demandas y recursos entre cuencas vecinas hará que con frecuencia se puedan ver implicadas más de una de las cuencas hidrográficas "oficiales", aunque en tales casos, por razones de simplificación y "operatividad" administrativa, habrá que tratarlas siempre de forma separada, recurriendo a trasvases desde o hacia otras unidades, ésto es, recursos o demandas exteriores, respectivamente.

Sin embargo, serán muchas las situaciones en que la definición de una **URGHC** en una determinada cuenca hidrográfica constituya en sí misma una opción de gestión concreta entre varias técnicamente posibles, razón por la cual convendrá analizar y calcular todas ellas de forma separada, sin introducir ningún tipo de prioridad. Quizá un buen ejemplo de esa situación sea la discusión tradicional sobre la dedicación a dar a las grandes unidades hidrogeológicas existentes en las cabeceras de casi todas nuestras cuencas hidrográficas mediterráneas, cuando las mismas sean susceptibles de optimización en el marco de una gestión coordinada con los recursos hídricos superficiales de las mismas: para apoyar el desarrollo de las zonas de cabecera, y/o para mejorar la siempre más rentable dotación de las demandas de las zonas bajas. El análisis y evaluación de esas opciones se debe resolver considerando alternativa o simultáneamente las demandas de cabecera y de la zona baja, es decir, definiendo dos o más **URGHC** mediante una diferente combinación de los "elementos" existentes, sin que en el análisis y evaluación resulte admisible introducir nin-

guna "preferencia" por razones de tipo hidrológico (eficacia en la regulación global conseguible), económico (rentabilidad monetaria de las actuaciones) o infraestructural (aprovechamiento de embalses, conducciones, elevaciones, etc.); la elección deberá ser hecha "a posteriori", con otros criterios (políticos y socioeconómicos) y en otras instancias.

## 3. TRABAJOS DE RECOPIACION, ANALISIS Y TRATAMIENTO DE LA INFORMACION DISPONIBLE, A REALIZAR EN CADA UNIDAD DE REORDENACION Y GESTION HIDROLOGICA COORDINADA (URGHC)

Para cada una de las **unidades de reordenación y gestión hidrológica coordinada (URGHC)** a considerar, la primera fase de trabajo que debe incluirse en los estudios de anteproyecto debe consistir en la recopilación y tratamiento de toda la información accesible sobre los "elementos" de las mismas existente en distintos organismos y entidades, con el contenido y enfoque que se describen en los tres próximos apartados.

### 3.1. Identificación, análisis y evaluación de las unidades de demanda a dotar

Los trabajos de análisis y evaluación de las demandas, imprescindibles para poder definir la utilidad de una gestión hidrológica coordinada, dependen no sólo de la naturaleza de las mismas, sino también de su localización relativa con respecto al emplazamiento de las fuentes de recurso (embalses, trasvases y sistemas acuíferos subterráneos); a ello se debe la agrupación que de las mismas se hace en los seis próximos apartados:

#### A. Demandas de agua para riego localizadas aguas arriba de embalses de regulación, dotadas mediante surgencias de agua subterránea y/o derivaciones de agua superficial, sin regulación superficial ni subterránea.

Situadas en las cabeceras de casi todas nuestras grandes cuencas, este tipo de demandas suele corresponder a una multiplicidad de pequeñas y

medianas áreas de regadío, de existencia más o menos tradicional y promoción generalmente privada, cuya dotación suele tener lugar mediante la descarga de manantiales y por tomas de agua superficial desde cauces públicos, con infraestructuras de captación, conducción y distribución poco importantes, funcionando en régimen natural en la mayor parte de los casos. En conjunto, este tipo de demandas detrae una parte generalmente minoritaria pero importante de las *aportaciones naturales* (\*) de la cuenca en la que están localizadas. Por su carácter privado y su localización dispersa en zonas situadas "aguas arriba" del control oficial, suelen ser demandas de agua apenas contempladas en las estadísticas de la planificación hidrológica o en los planes de ampliación de regadíos; sin embargo, **resulta imprescindible localizarlas con cierta precisión y estimar su magnitud absoluta anual y mensual en un año hidrológico medio**, complementada con cuanta información pueda localizarse sobre dotaciones efectivas, consumos, retorno de excedentes a la red hidrográfica, etc.

Las fuentes de información más accesibles sobre las demandas indicadas suelen estar en el IRYDA, organismos autonómicos a los que se transfirieron las antiguas competencias de dicho instituto, encuestas de las antiguas cámaras agrarias, mapas de cultivos (\*\*), fotografías aéreas correspondientes a vuelos efectuados en distintas épocas, etc.

#### **B. Demandas de agua para abastecimiento y riego localizadas aguas abajo de embalses de regulación, dotadas mediante las aportaciones reguladas por los mismos.**

Suelen estar situadas en los tramos medio y

(\*) Se suele entender por **aportación natural** en un punto cualquiera de una red hidrográfica la escorrentía superficial total - es decir, la suma de la escorrentía de origen subterráneo, más la estrictamente superficial (que nunca ha sido subterráneo)- que pasaría por dicho punto en ausencia de toda intervención humana (sin embalses, tomas ni vertidos aguas arriba).

(\*\*) Existen "mapas de cultivos y aprovechamientos" en forma de hojas a escala 1:50.000, editados por el Ministerio de Agricultura. Aunque su edición no sea siempre muy reciente, pueden ser de gran utilidad para evaluar la extensión y la demanda de los cultivos de regadío en muchas zonas de nuestro país.

bajo de nuestras grandes cuencas y corresponder a extensas zonas de regadío histórico, y/o de promoción pública relativamente reciente ("vegas", "zonas regables", "ampliaciones", etc., situadas en las proximidades de grandes ríos), y a los abastecimientos urbanos y de áreas industriales englobados en redes de cobertura comarcal o regional. La dotación de tales demandas depende de la regulación que puedan llevar a cabo los embalses situados aguas arriba de los mismos; su infraestructura de toma, conducción y distribución suele ser importante, compleja y heterogénea: presas, cauces naturales, azudes, elevaciones, canales y acequias (revestidas o no), etc.

En conjunto, este grupo de demandas consume la mayor parte de las *aportaciones naturales* reguladas superficialmente en las correspondientes cuencas, y constituye uno de los elementos principales de la planificación hidrológica oficial; por tanto **se debe determinar con cierta precisión la localización de estas grandes demandas, describir la infraestructura principal de toma, conducción y distribución existente para su dotación, y estimar su magnitud absoluta anual y mensual en un año hidrológico medio**, complementada con cuanta información pueda localizarse sobre criterios de prioridad aplicados, dotaciones efectivas, consumos, excedentes de riego, aguas residuales urbanas e industriales generadas, localización de las mismas, etc., durante los últimos años hidrológicos. Asimismo, **es preciso tomar también en consideración los planes oficiales de ampliación o mejora de dotación de regadíos y abastecimientos** mediante incremento de la regulación superficial (recrecimiento y/o construcción de embalses) de la propia cuenca o con trasvases desde otras más o menos vecinas, caracterizándolos en los aspectos antes indicados (localización, infraestructura y demanda de agua anual y mensual).

Por lo que respecta a las fuentes de información a consultar, es preciso partir de la "oficial" reflejada en los planes y proyectos hidrológicos del MOPT y de sus confederaciones, tanto los últimos elaborados con carácter global, como los de ámbito más local que se han ido realizando en los últimos 15 ó 20 años para demandas ya atendidas, y los correspondientes a los planes

de ampliación y mejora proyectados en firme. Asimismo, se debería recopilar, contrastar y analizar toda la información que se pueda obtener sobre las demandas de riego dotadas mediante regulación superficial, conseguible en el IRYDA, organismos autonómicos a los que se transfirieron las competencias de dicho instituto, mapas de cultivos, estadísticas de las antiguas cámaras agrarias provinciales, etc. En cuanto a las demandas de agua para abastecimiento público y para usos industriales, convendría consultar también la información existente en corporaciones, consorcios, mancomunidades, etc. que se ocupan de los grandes abastecimientos públicos, con aguas tanto superficiales reguladas, como subterráneas.

#### **C. Regadíos dotados con aguas subterráneas, localizados en grandes zonas de transformación de promoción pública y/o privada.**

Suelen estar situados en los tramos medio y bajo de nuestras grandes cuencas (las mediterráneas y suratlánticas, fundamentalmente) y corresponden a extensas zonas transformadas en regadío durante los años 60 y 70 por la iniciativa privada y, en menor medida, por la pública (INC e IRYDA principalmente). La dotación de tales demandas se viene efectuando mediante la explotación - para su utilización prácticamente "in situ"- de los recursos y, con alguna frecuencia, también las reservas de agua subterránea de sistemas acuíferos de mediana y gran extensión, sin apenas intervención de aportaciones superficiales reguladas mediante embalses.

En conjunto, estas zonas de riego, que han contribuido notablemente al desarrollo social y económico de las comarcas en que están situadas, consumen una parte apreciable - que en la práctica se debe considerar como regulada - de las aportaciones naturales de las correspondientes cuencas. El análisis y la evaluación de las demandas de los regadíos dotados mediante la explotación de sistemas acuíferos debe ser efectuado desde los siguientes enfoques:

- Su valor global constituye uno de los elementos principales a incluir en la planificación hidrológica de la correspondiente cuenca hidrográfica.

- Su localización, magnitud anual, distribución mensual y grado de dotación (superior, igual o inferior al 100 %, y variable según cultivos, meteorología, hidroquimismo, etc.) (\*) son datos a utilizar en el análisis del funcionamiento de los correspondientes sistemas acuíferos.

Por consiguiente, **resulta necesario determinar con cierta precisión la localización de los regadíos dotados con agua subterránea, identificar los sistemas acuíferos utilizados, estimar la magnitud absoluta anual y mensual de las demandas dotadas mediante cada uno de ellos en un año hidrológico medio, y situar y evaluar los retornos a la red hidrográfica de los excedentes de riego generados.**

En algunas cuencas hidrográficas existen planes de ampliación y/o mejora de regadíos con aguas subterráneas, aunque en muchas ocasiones sean presentadas como superficiales por el hecho de ser captadas en un cauce público. Se deberían analizar tales planes en los ya indicados aspectos de su localización y de la magnitud anual y mensual de sus demandas de agua.

Las fuentes de información, contraste y análisis de mayor interés sobre las demandas indicadas suelen estar en el IRYDA, organismos autonómicos a los que se transfirieron las competencias de dicho instituto, mapas de cultivos, encuestas de las antiguas cámaras agrarias, fotografías aéreas, etc. Los planes hidrológicos del MOPT suelen incluir una información de fiabilidad insuficiente sobre las demandas dotadas con aguas subterráneas, con sesgo diferente según que las mismas estén localizadas aguas arriba o abajo de los embalses de regulación de las cuencas respectivas.

(\*) En efecto, suelen darse tanto los casos de subdotación como los de dotación excesiva, aunque éstos sean menos frecuentes que en el riego con aguas superficiales hasta ahora más baratas. Por otro lado, el grado de dotación suele variar también en función del tipo de cultivo (en general, están más sobredotados los herbáceos regados por aspersión o "a manta", que los leñosos regables por goteo) y de las propias características del agua subterránea utilizada (cuando la salinidad de ésta es elevada, es frecuente que se aumenten las dotaciones para evitar la salinización del suelo).

#### D. Demandas de agua para abastecimientos públicos y usos industriales dotadas con aguas subterráneas, independientes de la regulación superficial.

Los abastecimientos urbanos y de áreas industriales de cierta entidad dotados con aguas subterráneas pueden estar situados en cualquiera de los tramos de las cuencas hidrográficas oficiales; su promoción suele ser tanto pública (confederaciones, ayuntamientos, corporaciones, mancomunidades, etc.) como privada (industrias que realizan sus propias captaciones). La dotación de tales demandas, que consume recursos y, en algún caso, reservas de agua subterránea de sistemas acuíferos de mediana y gran extensión, por medio de infraestructuras de conducción generalmente poco importantes, supone una reducción de las aportaciones naturales de las correspondientes cuencas, a incluir entre las aportaciones reguladas dentro de las mismas. El análisis y la evaluación de las demandas indicadas debe ser efectuado desde los siguientes enfoques:

- Su valor global constituye uno de los elementos a incluir en la planificación hidrológica de la correspondiente cuenca hidrográfica.
- Su localización, magnitud anual, distribución mensual y grado de dotación (generalmente total y variable según ciclos estacionales) son datos a utilizar en el análisis del funcionamiento de los correspondientes sistemas acuíferos.
- Sus excedentes deben ser tenidos en cuenta como posible fuente de recursos (los de carácter urbano, especialmente) y/o como foco de contaminación.

Por consiguiente, **resulta necesario determinar con cierta precisión la localización de las demandas de abastecimiento y usos industriales dotadas con agua subterránea, identificar los sistemas acuíferos utilizados y estimar la magnitud absoluta anual y mensual de demandas, consumos y excedentes en un año hidrológico representativo.**

En algunas cuencas hidrográficas pueden existir planes de promoción industrial a iniciativa de administraciones locales (ayuntamientos y

diputaciones) o autonómicas, no contemplados en la planificación hidrológica "oficial", que debieran ser analizados en los aspectos de su localización y de la magnitud anual y mensual de sus demandas de agua.

Las fuentes de información sobre las demandas de agua para abastecimientos públicos y usos industriales dotadas con aguas subterráneas, independientes de la regulación superficial, suelen ser muy dispersas y de fiabilidad muy irregular: ayuntamientos, diputaciones, servicios autonómicos de industria, política territorial y ordenación del territorio, cámaras de industria, confederaciones hidrográficas, etc.

#### E. Demandas de agua no consuntivas.

En este grupo hay que incluir las siguientes demandas de agua - actuales o previsibles -, que pueden estar localizadas en cualquier zona de una cuenca hidrográfica, y que generalmente son atendidas de forma incompleta mediante aportaciones superficiales parcialmente reguladas:

- Caudal "ecológico" a asegurar como mínimo en los distintos cauces de cada cuenca, que suele ser fijado como equivalente a un cierto porcentaje de la aportación natural media correspondiente.
- Desembalses para generación hidroeléctrica en presas situadas en los tramos alto y medio de cada cuenca.
- Refrigeración de centrales térmicas (convencionales o nucleares) localizadas generalmente en los tramos medio y bajo de cada cuenca.
- Sostenimiento de zonas húmedas.
- Diversos usos no consuntivos de carácter turístico o recreativo.

Las demandas indicadas deben ser identificadas, localizadas y evaluadas de forma estimativa, aunque es preciso tener en cuenta que, en mayor o menor grado, casi todas ellas - el caudal "ecológico" o el necesario para la refrigeración de centrales térmicas, por ejemplo - poseen el carácter de mínimos de la aportación circulante, cubiertos por las demandas consuntivas durante la mayor parte del año en gran parte del recorrido sobre los cauces.

Aunque las fuentes de información principal para la localización y la estimación de las demandas hídricas no consuntivas de cualquier cuenca hidrográfica son, evidentemente, la confederación correspondiente y el propio plan hidrológico de la misma, sería conveniente consultar también las agencias de medio ambiente de las comunidades autónomas implicadas, las compañías que exploten presas de generación hidroeléctrica o centrales térmicas a refrigerar con agua superficial, etc.

#### F. Trasvases hacia otras cuencas o subcuencas hidrográficas.

El apoyo a la dotación de demandas localizadas en cuencas más o menos vecinas de la considerada, mediante el trasvase hacia las mismas de aportaciones reguladas o no debe ser tratado como una demanda a incluir en los cálculos de la capacidad de regulación superficial propia. En este caso, la única información a considerar serán las previsiones del correspondiente plan hidrológico: punto en el que tendrá su origen del trasvase, régimen de derivaciones (\*), infraestructura de derivación y conducción, etc.

#### 3.2. Análisis y evaluación del funcionamiento actual y potencial de cada una de las fuentes de recurso integradas en la URGHC en estudio

En los cuatro próximos apartados se describe separadamente el tratamiento a dar a cada una de las *fuentes de recurso* integrables en el supuesto más general de reordenación hidrológica de una cuenca o subcuenca hidrográfica, con objeto de caracterizar el funcionamiento actual y el potencial de las mismas, paso previo al diseño y "preevaluación" de una gestión coordinada en dichas áreas o *unidades*.

(\*) En este sentido son muy variados los regímenes posibles: derivación de excedentes no regulados por un determinado embalse, realizable incluso en el interior de una misma cuenca hidrográfica para conseguir una mejor utilización de la capacidad de embalse existente en la misma; derivación de las aportaciones circulantes por un punto determinado en una red hidrográfica (generalmente situado en el tramo alto de la correspondiente cuenca) hasta un caudal máximo prefijado, derivación de aportaciones reguladas para ser trasvasadas; etc.

#### A. Embalses de regulación

Se debe partir, como base de referencia, de los resultados "oficiales" - los incluidos en los correspondientes planes hidrológicos - sobre la capacidad de regulación de cada uno y del conjunto de los embalses de regulación integrados en la URGHC de que se trate, que corresponden a una información igualmente "oficial" sobre:

- *aportaciones naturales* en los emplazamientos de los embalses;
- derivación de aportaciones realizadas aguas arriba de cada embalse, es decir, reducción de la escorrentía superficial o subterránea naturalmente vertiente hacia el mismo como consecuencia de tomas, bombeos, etc.;
- magnitud y distribución temporal relativa de las demandas a dotar mediante la regulación conseguible en cada embalse o en el conjunto de ellos, y prioridades de dotación de las mismas;
- criterio adoptado sobre la garantía de suministro; y
- características y funcionamiento de los embalses: criterios de explotación (regulación, laminación de avenidas o generación hidroeléctrica), capacidad útil, pérdidas por evaporación, fugas, etc.

Los trabajos a realizar en el marco de los estudios de anteproyecto sobre cada una de las URGHC, en relación con sus embalses, han de centrarse en el análisis crítico de los resultados "oficiales" sobre la capacidad de regulación de los mismos, que deben ser corregidos o relativizados - en forma de resultados alternativos o de intervalos de confianza - contrastando de la siguiente forma la representatividad hidrológica de los datos utilizados en su cálculo:

- Se analizarán las características de los históricos de *aportaciones naturales* utilizados en los cálculos oficiales: duración, representatividad hidrológica del periodo de referencia, estructura estadística y coherencia hidrológica de los valores de aportaciones, etc. Asimismo, se estimarán los resultados que habrían correspondido a la utilización de series de *aportaciones naturales* incluidas en

otros estudios hidrológicos realizados para el MOPT o sus confederaciones, de características suficientemente diferenciadas respecto de las empleadas en los cálculos "oficiales".

- Los valores de derivaciones utilizadas en los cálculos "oficiales", incluidos los trasvases previstos, deben también ser contrastados - para estimar su repercusión en los resultados - teniendo en cuenta la localización, magnitud y distribución temporal de las demandas de agua situadas aguas arriba de los embalses, que por sus consumos y retornos son causantes de la alteración que experimentan sus *aportaciones naturales*.
- Será necesario contrastar la distribución temporal y el régimen de prioridades de dotación de las demandas utilizadas en los cálculos, con los obtenidos mediante los trabajos descritos en el apartado 3.1., a fin de estimar la repercusión que sobre los resultados (capacidad de regulación calculada) pudieran tener posibles diferencias sustanciales entre unos y otros.
- Los criterios de garantía de suministro utilizados en el cálculo de una regulación hidrológica - diseñados en ocasiones a la medida del resultado que se desea encontrar (\*) - constituyen un dato de base de enorme repercusión sobre el valor a calcular para la capacidad de regulación. Por consiguiente, será preciso analizar la viabilidad agrícola y agronómica real de los criterios adoptados en los cálculos "oficiales".
- Finalmente, será preciso analizar y contrastar las características (capacidad útil actual,

fugas, pérdidas por evaporación, etc.) y el régimen supuesto de explotación de cada embalse, así como identificar y cuantificar aproximadamente los posibles problemas de calidad química en el agua superficial a regular por el mismo.

De acuerdo con el alcance que se debe asignar a un estudio de anteproyecto como el que se está describiendo, el análisis crítico y de contraste sobre la capacidad de regulación calculada "oficialmente" para los embalses ha de realizarse de forma razonablemente sencilla y relativamente esquemática, con el objetivo fundamental de identificar solamente resultados alternativos e intervalos de confianza ligados a datos o enfoques de funcionamiento que, siendo opcionales, repercutan notablemente en los cálculos de la capacidad de regulación superficial y condicionen el interés o la viabilidad de la intervención de las otras *fuentes de recurso*, como son los sistemas acuíferos. Por consiguiente, carecerá de sentido - salvo en casos especiales, de notable importancia - repetir con otros datos (los recopilados en el estudio de anteproyecto) los cálculos relativos a todos los embalses; para evitarlo, siempre que sea posible, es decir, suficientemente representativo, se tenderá a trabajar sobre años hidrológicos medios y se aplicarán preferentemente técnicas estadísticas sencillas: curvas acumulativas regulación-capacidad de embalse, regresiones minimocuadráticas, correlaciones por dobles masas, interpolaciones y extrapolaciones gráficas o analíticas, etc.

#### B. Sistemas acuíferos

Recopilada toda la información de interés sobre la hidrogeología y el hidrodinamismo de cada uno de los sistemas acuíferos integrables en la **URGHC** que se estudie, se deberán analizar, contrastar y evaluar los siguientes aspectos de su funcionamiento actual y potencial, condicionantes de sus posibilidades de intervención en una gestión coordinada con otras *fuentes de recurso*:

- localización relativa de cada sistema acuífero con respecto a las *unidades de demanda*, las restantes fuentes de recurso y la infraestructura de conducción y distribución (incluidos los cauces naturales utilizados por la regulación superficial);

- esquema del funcionamiento hidrodinámico de cada sistema acuífero, es decir, mecanismos y régimen de su recarga, flujo subterráneo y descarga;
- componentes de la recarga y descarga totales del sistema, en su situación actual y en su tendencia a medio y largo plazo;
- equilibrios y desequilibrios en la distribución espacial de las explotaciones existentes: tendencias, consecuencias actuales y previsibles, medidas de corrección aplicables (en su caso), etc.;
- magnitud y destino de los excedentes subterráneos (hacia el mar, la red hidrográfica, otros sistemas acuíferos, etc.) y mecanismos y consecuencias cuantitativas y cualitativas de una posible afección a los mismos;
- posibilidades de explotación estacional de sus reservas: efectos inducidos que ello provocaría (disminución de salidas, aumento de entradas, intrusión marina, afección a zonas húmedas, etc.);
- distribución espacial de la accesibilidad, explotabilidad, productividad e hidroquimismo del acuífero; y
- fiabilidad y suficiencia de la información hidrogeológica, hidrodinámica e hidroquímica disponible, determinando la necesidad, en su caso, de realizar trabajos complementarios y programándolos para una ulterior ejecución de los mismos (en la fase de proyecto).

El carácter de anteproyecto hace que el tratamiento de la información hidrogeológica e hidrodinámica recopilada presente en esencia un doble objetivo:

- Determinación preliminar de las posibilidades de integración de los sistemas acuíferos considerados, en alguno de los esquemas de gestión coordinada que más adelante se describirán, "prediseñando" las condiciones en que tal integración podría tener lugar, y estimando los resultados conseguibles en términos de regulación conjunta de las aportaciones naturales totales de la cuenca o subcuenca hidrográfica considerada.

- Diseño y programación detallada de los trabajos complementarios, de carácter hidrogeológico e hidrodinámico, a realizar, en su caso, en la subsiguiente fase de proyecto:

- en campo: cartografía y perfiles hidrogeológicos, inventarios, encuestas de explotación, controles piezométricos e hidrométricos, prospección mecánica o geofísica, piezometría espacial, caracterización hidroquímica extensiva y en evolución, ensayos de hidrodinámica subterránea, estudios de conexión río-acuífero, estado y evolución de la intrusión marina, etc.
- en gabinete: análisis y tratamiento de datos, reinterpretación de ensayos, revisión de esquemas de funcionamiento hidrodinámico (los también denominados "modelos conceptuales"), elaboración de modelos matemáticos de flujo o de migración, etc.

#### C. Aportes procedentes de otras cuencas o subcuencas hidrográficas

En este tipo de recurso hídrico habrá que asumir lo que al respecto prevean los planes hidrológicos de las cuencas implicadas: infraestructura de conducción, regulación y distribución, régimen de explotación del trasvase, caudal instantáneo máximo, aportaciones mensuales y anual medias, grado de regulación de las aportaciones recibidas, puntos de llegada, demandas a dotar, etc. Sin embargo, conviene no perder de vista - como sucede en muchos casos - que una aportación trasvasada desde otra cuenca supone algo más que un simple incremento de los recursos hídricos disponibles en la cuenca receptora: debe evaluarse también la disminución de la capacidad de regulación de las aportaciones propias de ésta como consecuencia de la ocupación de una parte de su capacidad de embalse, salvo en el supuesto, muy poco esperable, de que las aportaciones trasvasadas llegasen perfectamente reguladas de cara a las demandas que deben apoyar en la cuenca de destino, en cuyo caso se podría suponer que "pasasen de largo" por los embalses de ésta, sin "residir" en ellos.

#### D. Recursos hídricos diversos

En este grupo final hay que incluir los recursos

(\*) Son no pocos los estudios de viabilidad en que la "justificación técnica" de un determinado embalse se "impone" mediante la simple adopción de criterios de garantía de suministro irrealmente bajos - considerar, por ejemplo, como incumplimiento de suministro sólo la dotación de menos del 60 % de la demanda total anual, admitir déficits totales en 3 meses no consecutivos, etc. - e inaplicables para las demandas reales a dotar mediante tales "regulaciones". Por otro lado, es evidente que una demanda de abastecimiento no admitirá la misma relajación en el suministro que la dotación de regadío, del mismo modo que en este último caso, será necesario aplicar diferentes criterios según que los cultivos sean frutales o herbáceos, etc.

hídricos de procedencias diversas, tales como las aguas residuales urbanas depuradas, el agua de mar desalinizada, las aguas superficiales o subterráneas de salinidad excesiva sometidas a desmineralización, etc. La información a recabar sobre la situación actual y los planes de desarrollo previstos para este tipo de recursos comprende datos tales como localización, caudal instantáneo máximo, volumen anual, características químicas y microbiológicas del recurso, demandas a atender, etc.; las fuentes de esa información son el plan hidrológico de la cuenca, las consejerías de política territorial y medio ambiente de las comunidades autónomas implicadas, las entidades (consorcios, corporaciones, mancomunidades, etc.) dedicadas al abastecimiento público, los servicios municipales de depuración de aguas residuales urbanas, etc.

### 3.3. Infraestructura principal de conducción y distribución

Por una parte, los embalses de regulación existentes y en proyecto han sido ya contemplados como *fuentes de recurso* y no como infraestructura y, por otro lado, la capacidad de bombeo a instalar en los sistemas acuíferos integrados en la reordenación y coordinación hidrológicas y las conducciones necesarias para efectuar su "enganche" a la red principal de conducción y distribución constituyen resultados del diseño y no datos de partida para el mismo. Pero es preciso disponer de una descripción bastante precisa del trazado, interconexiones, capacidades de derivación, circulación y elevación de la red principal de cauces principales, canales, acequias, estaciones de bombeo, existencia de servidumbres, etc., ya que todo ello determinará las posibilidades y condiciones de puesta en práctica de una gestión coordinada de las fuentes de recurso integradas en la **URGHC** sin modificación sustancial en la citada infraestructura.

### 4. ESQUEMAS DE REORDENACION Y GESTION HIDROLOGICA COORDINADA APLICABLES: TRABAJOS DE ANALISIS Y ESTUDIO PRELIMINAR DE SU VIABILIDAD

Recopilada, tratada y sintetizada toda la información posible sobre los elementos que se haya decidido integrar en una determinada **URGHC**, la fase siguiente del estudio de anteproyecto

que ahora se plantea consistirá en analizar la viabilidad hidrológica e hidrogeológica de los distintos esquemas o "modelos" de reordenación y gestión hidrológica coordinada aplicables para, una vez identificado el/los más adecuados, "prediseñar" sus condiciones de aplicación y programar los estudios de proyecto necesarios para su evaluación y diseño más precisos. Antes de seguir adelante, es preciso plantear una primera separación esquemática por lo que respecta al funcionamiento y a las posibilidades de utilización de los sistemas acuíferos implicados:

1. Sistemas acuíferos con explotación total netamente superior a su recarga media hiperanual, en los que hayan desaparecido ya las salidas naturales hacia la red hidrográfica, o se esté yendo hacia ello, por lo que, si la gravedad de la situación y la importancia de los intereses en juego lo justifican, podrían ser objeto de una reordenación hidrológica de acuerdo con las ideas esbozadas en el apartado 4.1.
2. Sistemas acuíferos con excedentes descargándose hacia la red hidrográfica, en distintos supuestos de localización relativa respecto de la misma, de los embalses de regulación y de las *unidades de demanda*, en función de los cuales podrían ser integrados en una gestión coordinada conjuntamente con otras *fuentes de recurso* - embalses de regulación, principalmente-. A esta situación corresponden los esquemas de coordinación que se describen en el apartado 4.2.

#### 4.1. Reordenación hidrológica de sistemas acuíferos sobreexplotados

Es evidente la imposibilidad de describir la enorme diversidad de situaciones encontrables en cuanto a sistemas acuíferos cuyas reservas estén siendo agotadas y/o degradadas a un ritmo inaceptable, en el conjunto o, al menos, en un sector de los mismos, pero sí se pueden describir de forma sintética las actuaciones de reordenación o corrección aplicables a las mismas:

- Disminución global de las extracciones por bombeo mediante reducción y/o reconversión de cultivos, sustitución por otras *fuentes de recurso* alternativas: aguas superficiales reguladas, aguas residuales depuradas, aguas subterráneas o de mar desmineralizadas, etc.

- Redistribución de explotaciones, con desconcentración y alejamiento de las mismas respecto de los límites hidrogeológicos del sistema acuífero, especialmente cuando éstos supongan conexión con aguas superficiales (ríos y mar).
- Recarga artificial para atenuar el desequilibrio global y/o como apoyo en la contención de una intrusión marina, a efectuar con aportes hídricos de distinto tipo y origen:
  - escorrentía superficial sin regular generada en la misma cuenca o trasvasada desde otras más o menos vecinas, aplicando preferentemente sistemas extensivos de filtración (balsas, tramos cauces, etc.);
  - aportaciones de origen subterráneo bombeadas desde otros sistemas acuíferos, a inyectar mediante pozos y sondeos;
  - aportaciones superficiales desembalsadas en la propia cuenca o en otras vecinas, dependiendo del llenado del correspondiente embalse (\*); y
  - aguas residuales depuradas.
- Reordenación de regadíos:
  - optimización de técnicas y dotaciones (\*\*)
  - racionalización y flexibilización de la organización del riego (\*\*\*) e

(\*) Es ésta una estrategia que puede resultar particularmente indicada en embalses de regulación y/o laminación de avenidas cuando se alcancen niveles de llenado superiores a ciertos límites de seguridad (para la contención de riadas).

(\*\*) Todavía son frecuentes en las más deficitarias cuencas mediterráneas -Segura y Sur- sistemas de riego tradicional por inundación, con dotaciones reales de agua que superan en un 50 a 100 % a los valores teóricamente necesarios.

(\*\*\*) Es muy frecuente que la dotación del riego en muchas vegas tradicionales de las cuencas mediterráneas y suratlánticas tenga lugar con una clara prioridad de hecho para los cultivos situados más aguas arriba, en detrimento de los localizados más aguas abajo. La aplicación de dotaciones excesivas en las vegas altas y la reutilización de sus excedentes drenados hace que en las vegas bajas se disponga de aportaciones de mayor salinidad, lo que, a su vez para atenuar los riesgos de salinización del suelo, obliga a aplicar dotaciones mayores.

- impermeabilización de acequias, para evitar pérdidas, drenaje y reutilización de aguas de riego.

- Vigilancia y tarifas.

El análisis de viabilidad y la valoración de los resultados que se derivarían de la puesta en práctica de las medidas correctoras que se acaban de enunciar sólo podrán efectuarse con la debida fiabilidad si se dispone de un modelo matemático del flujo subterráneo, del transporte de solutos (si se plantean importantes problemas de calidad del agua) y de regulación superficial (cuando se contemple la intervención de aportaciones superficiales para corregir los desequilibrios hidrogeológicos). Ello hace que en la fase de anteproyecto a la que ahora nos estamos refiriendo, además de prediseñar las medidas correctoras que puedan parecer como más adecuadas para cada situación concreta, sea preciso definir y programar los trabajos complementarios de campo y gabinete necesarios para, en la fase de proyecto, elaborar los modelos mencionados.

#### 4.2. Esquemas aplicables en la gestión coordinada entre embalses de regulación y sistemas acuíferos excedentarios

Para facilitar el mejor entendimiento de las distintas modalidades de coordinación entre embalses de regulación y sistemas acuíferos subterráneos, comencemos por resumir el funcionamiento de los primeros:

- Como consecuencia de la acción reguladora de un embalse y de las derivaciones netas efectuadas aguas arriba del mismo, las *aportaciones naturales (AN)* de su cuenca vertiente a lo largo de la serie de valores mensuales disponible para el cálculo (\*) se descomponen entre:

**DER** derivaciones netas (saldo de las brutas y

(\*) La serie de *aportaciones naturales* sobre la que debe efectuarse el cálculo de una regulación suele corresponder a una reconstrucción basada en historiales foronómicos o a una serie sintética generada por técnicas estadísticas a partir de una serie histórica.

los retornos) efectuadas aguas arriba del embalse. Constituyen una serie aproximadamente repetitiva un año tras otro.

**AR** aportación regulada para dotar con la garantía establecida las demandas a atender. Se trata de una serie que se repite anualmente con diferencias sólo debidas a la distinta magnitud de los déficits condicionados, según el criterio de garantía adoptado: si la regulación fuese *estricta* (de garantía estadísticamente máxima), es decir, sin admitir ningún déficit en la dotación de las demandas, la serie de aportaciones reguladas constaría de 12 valores mensuales repetidos de año en año.

**EXC** excedentes de la regulación, equivalentes a las aportaciones que el embalse se ve obligado a verter por falta de capacidad. Constituyen una serie irregular de aportaciones, con valores nulos en algunos meses (\*)

**EV** pérdidas por evaporación, variables en función de la meteorología y del llenado del embalse.

$\pm \Delta R$  aumento o disminución de las reservas embalsadas entre el comienzo y el final del período de cálculo.

Los valores medios anuales de las magnitudes descritas tienen la siguiente relación:

$$AN = AR + EXC + DER + EV \pm \Delta R$$

El grado de regulación (**GR**) conseguido en un embalse se calcula mediante la expresión:

$$GR = [AR + DER]/AN$$

La intervención de sistemas acuíferos excedentarios en una gestión coordinada de los recursos hídricos globales de la **URGH** que esté en estudio puede tener lugar de acuerdo con alguno de los esquemas o "modelos" que se descri-

(\*) Si la serie de excedentes mensuales no presentase ningún valor nulo sería "regulable", es decir, podría ser descompuesta en una parte regulada y unos excedentes.

ben a continuación, cuyo objetivo no es otro que lograr un grado de regulación de las aportaciones naturales totales - suma de las estrictamente superficiales y las de origen subterráneo - superior al que puedan asegurar por sí solos los embalses de regulación:

#### A. Regulación hidrogeológica de manantiales, coordinada "en serie" con la explotación de embalses de regulación

En un primer supuesto, nos podemos encontrar con sistemas acuíferos que se estén descargando en régimen poco o nada influenciado mediante manantiales de suficiente importancia que, situados en la cuenca vertiente a embalses de regulación, son regulables hidrogeológicamente para dotar las mismas demandas. En una situación así, siempre será hidrológicamente interesante llevar a cabo una **coordinación "en serie" entre embalses superficiales y sistemas acuíferos subterráneos**.

Este procedimiento de regulación coordinada supone una cierta "especialización" en la gestión de los embalses, según que sean de tipo convencional (embalses "superficiales" dedicados en mayor medida a regular la escorrentía estrictamente superficial) o se trate de sistemas acuíferos ("embalses subterráneos" regulados hidrogeológicamente). En efecto, al conseguirse que una parte de la escorrentía subterránea que forma parte de la aportación propia de los embalses superficiales llegue a éstos ya regulada mediante técnicas y medios hidrogeológicos - bombeos adecuadamente programados, realizados en sondeos localizados oportunamente -, resultará posible una más eficaz dedicación de dichos embalses a regular la componente que sólo ellos pueden regular, como es la escorrentía estrictamente superficial. A efectos del cálculo, el hecho de que a un embalse llegase ya regulada una parte de sus aportaciones equivaldría, de hecho, a que la misma "pasase de largo", es decir, que no "residiese" en el embalse en cuestión.

Por otro lado, los vertidos o excedentes generados finalmente por los embalses en algunos meses con demanda de agua podrían ser aprovechados en una parte - aunque generalmente

modesta -, complementándolos con un incremento de bombeo en los sondeos de regulación hidrogeológica, según un esquema similar al de **regulación conjunta** que se describe más adelante (punto **C.** de este mismo apartado).

Las posibilidades e interés de aplicar una gestión coordinada entre sistemas acuíferos y embalses de regulación con el enfoque indicado dependen de factores tales como:

- utilización y grado de aprovechamiento actuales de los manantiales a regular hidrogeológicamente;
- condiciones hidrogeológicas e hidrodinámicas del sistema acuífero, que determinan las posibilidades y eficacia de la regulación hidrogeológica planteada para sus manantiales; y
- grado de regulación actual de la cuenca superficial y aleatoriedad de sus aportaciones naturales: cuanto mayor sea el primero y menos irregulares sean las aportaciones, menor será el interés de poner en ejecución la coordinación indicada.

#### B. Regulación hidrogeológica de manantiales coordinada "en paralelo" con la explotación de embalses de regulación

Cuando los manantiales a regular hidrogeológicamente estén situados fuera de la cuenca vertiente a los embalses de regulación, pero dominando las *unidades de demanda* atendidas por éstos, también podría plantearse su regulación hidrogeológica para apoyar a los embalses en la dotación de tales unidades. En este caso se trataría de llevar a cabo una **coordinación "en paralelo" entre embalses y sistemas acuíferos subterráneos**, con la posibilidad añadida - también en este caso - de que en la regulación hidrogeológica de los manantiales se aproveche una parte - normalmente modesta - de los excedentes superficiales no regulados por los embalses, con la consiguiente reducción de los mismos; para ello sería preciso efectuar un complemento de bombeo en los sondeos de regulación hidrogeológica.

Las posibilidades de aplicar una gestión coordinada entre sistemas acuíferos y embalses de

regulación con el enfoque indicado dependen también de la utilización actual de los manantiales a regular y de las condiciones hidrogeológicas e hidrodinámicas del sistema acuífero; sin embargo, su puesta en práctica tendría interés siempre, aunque el grado de regulación superficial en el/los embalses fuese muy elevado.

En la figura 1 se ha representado de forma esquemática la situación en la que podrían aplicarse los modelos **A.** y **B.** de coordinación hidrogeológica entre la explotación de embalses y la regulación hidrogeológica de manantiales.

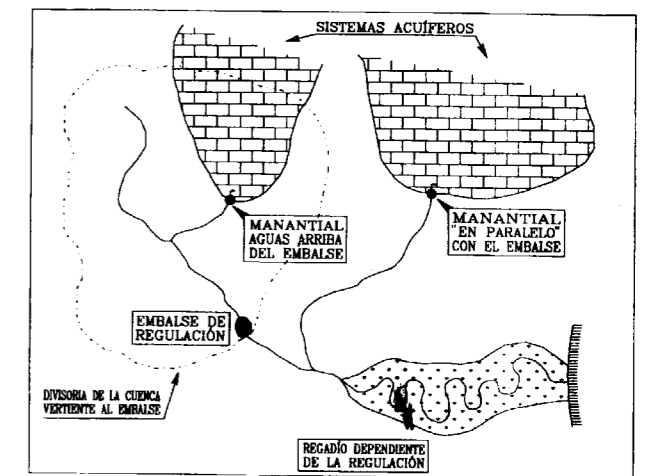


Figura 1

Los esquemas de **regulación coordinada** presentados en éste y en el anterior apartado suponen en esencia una gestión prácticamente independiente de los embalses y los sistemas acuíferos implicados: se explotan unos y otros de cara a los mismos objetivos - la dotación "solidaria" de iguales demandas -, pero sin apenas "complementación" entre desembalses y bombeos (salvo en el modesto aprovechamiento de los excedentes superficiales). Por otra parte, también es destacable que el tratamiento dado a los sistemas acuíferos, que se supone funcionan en régimen prácticamente no influenciado, es básicamente local, limitado al entorno de los manantiales a regular hidrogeológicamente, y ahí reside precisamente la gran ventaja de este enfoque: evitar la necesidad de dar un tratamiento extensivo a los sistemas acuíferos implicados, con la consiguiente modelización matemática de su flujo subterráneo.

### C. Regulación conjunta mediante embalses superficiales y sistemas acuíferos subterráneos

El último de los modelos aplicables a la coordinación hidrológica entre embalses de regulación y sistemas acuíferos excedentarios parte de la siguiente esquematización:

Desde un punto de vista puramente conceptual, un río regulado por un embalse hasta un cierto grado, a su paso por un punto cualquiera de su curso puede ser visto como la superposición de dos cauces ficticios distintos:

- por uno de ellos circularían únicamente sus aportaciones reguladas, es decir, todos los años una serie de doce volúmenes mensuales que sólo se diferenciaría de un año a otro en la magnitud de los déficits condicionados al criterio de garantía adoptado;
- por el otro cauce circularían los excedentes, es decir, una irregular serie de volúmenes de agua, a veces nulos, equivalentes a la parte de las aportaciones no evaporada en los embalses, que éstos, por falta de capacidad, no han podido retener y han debido verter, más todas o la mayor parte de las aportaciones vertientes al río aguas abajo del embalse.

Si al cauce de excedentes se le incorporasen en la cantidad y el momento oportunos aportaciones de otra procedencia (aguas subterráneas, residuales depuradas, etc.), dispondríamos en él de una nueva circulación conjunta susceptible de ser descompuesta en una nueva parte regulada (equivalente a la mejora de regulación conseguida) y una parte, menor que antes, que sigue estando sin regular. El planteamiento expuesto, ilustrado gráficamente en la figura 2, en la página siguiente, para el supuesto de una regulación que deba dotar una demanda constante, constituye, en esencia, el fundamento metodológico de la **regulación conjunta**: los desembalses superficiales parcialmente regulados son complementados con agua subterránea bombeada, para dar lugar, en conjunto, a una aportación regulada superior, sin que en ello juegue un papel sustancial la posición relativa de los sistemas acuíferos utilizados - aguas arriba o aguas abajo de los embalses -.

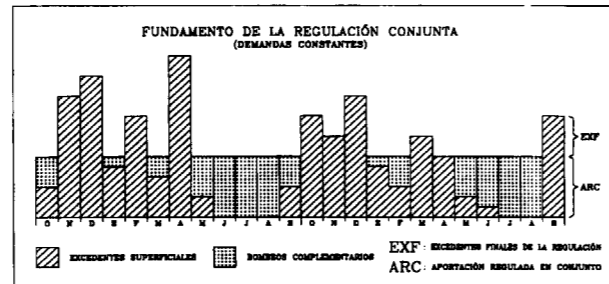


Figura 2

El cálculo de una regulación con el enfoque descrito debe realizarse de la siguiente forma:

1. Se comienza fijando el objetivo de regulación conjunta a conseguir, lo que implica determinar la magnitud de las aportaciones reguladas a suministrar como mínimo en cada mes y en cada año, de acuerdo con el criterio de garantía adoptado.
2. Es preciso también establecer los criterios de distribución del objetivo de regulación prefijado entre los embalses existentes - si hay más de uno implicado en la regulación conjunta -, y la política de desembalses que se haya de seguir, es decir, cuánto y cuándo se deberá desembalsar, respecto de lo cual son dos los criterios aplicables:
  - Quizá el proceso más sencillo e inmediato consista en comenzar dedicando - si necesarias fuesen - la totalidad de las aportaciones superficiales disponibles en los embalses (reservas existentes al final del mes anterior más las entradas netas del mes en curso) a cubrir el objetivo de regulación conjunta del mes, agotándolas en caso de que no sean suficientes, para complementarlas después, en caso necesario, mediante bombeo de agua subterránea realizado en el o los sistemas acuíferos implicados. Esta política de desembalses tiene la ventaja de disminuir los costes de bombeo - el mismo se efectúa sólo en caso estrictamente necesario -, pero supone un bombeo máximo mayor, es decir, una inversión en instalaciones (sondeos, bombas, líneas, transformadores, etc.) más elevadas.
  - Si, por el contrario, no se espera a agotar los embalses, sino que se inician los

bombes de aguas subterráneas cuando aquéllos alcancen un llenado relativo mínimo prefijado en función de las demandas del mes, se bombeará más frecuentemente - mayores gastos de energía - pero se podrá contar con una reserva de agua embalsada gracias a la cual las "puntas" del bombeo resultarán menores - menor inversión en instalaciones de captación y bombeo -. La solución económicamente óptima estará en un adecuado compromiso entre inversiones y costes de explotación.

3. Determinada la magnitud del aporte neto de aguas subterráneas necesario para complementar los desembalses superficiales, la obtención del mismo en cada uno de los sistemas acuíferos integrados en la regulación conjunta dependerá notablemente del tipo y grado de conexión que pueda existir entre ellos y la red hidrográfica afectada por la regulación. En este aspecto, son tres las situaciones encontrables:

a. *No existe ningún tipo de comunicación hidrodinámica natural y directa entre el sistema acuífero y la red hidrográfica (\*)*. En tal caso, los bombeos que se efectúen en el sistema acuífero no provocarán ningún tipo de afección o perjuicio a las aportaciones circulantes por los cauces superficiales de la cuenca objeto de la regulación conjunta, por lo que los aportes netos de origen subterráneo necesarios para la misma equivaldrán exactamente a los bombeos que se deban efectuar para obtenerlos.

b. *Las salidas naturales del sistema acuífero se vierten hacia la red hidrográfica en regulación, pero sin conexión hidrodinámica natural y directa con la misma*. En este supuesto, al que corresponden los dos sistemas acuíferos esquematizados en la figura 1, los bombeos de agua subterránea provocarán una disminución más o menos diferida de las aportaciones

(\*) Este supuesto significa que la descarga natural del sistema acuífero se efectúa hacia otra cuenca superficial, y que su recarga, caso de proceder en mayor o menor grado de la red hidrográfica afectada por la regulación, no varía aunque se bombee en el mismo.

circulantes por la red hidrográfica, reguladas o excedentes, y carecerá de importancia práctica que dicha afección llegue a la red hidrográfica aguas arriba o aguas abajo de los embalses de regulación, siempre, claro está, que el agua subterránea bombeada pueda enviarse a las *unidades de demanda* utilizando la infraestructura ya existente. Por consiguiente, el bombeo que se ha de realizar en un determinado mes no podrá ya ser igual al aporte neto de aguas subterráneas prefijado: deberá superarlo en la cuantía de la afección registrada en ese mismo mes como consecuencia de dicho bombeo y de los realizados en meses anteriores.

c. *Existe una conexión hidrodinámica directa río-acuífero a través de medio poroso saturado (\*)*. En este caso, al que corresponde la máxima intercomunicación entre aguas superficiales y subterráneas, los bombeos que se realicen en el sistema acuífero podrán no sólo disminuir las aportaciones de origen subterráneo que, en otro caso, llegarían a la red hidrográfica (la afección consistiría en "dejar de dar"), sino también de traer una parte de las aportaciones totales (de origen tanto subterráneo como estrictamente superficiales) circulantes por la misma (la afección consistiría en "quitar"). Y también en este supuesto resultará irrelevante que la conexión río-acuífero tenga lugar aguas arriba o abajo de un embalse de regulación, siempre que suceda antes de las tomas para dotación de demandas.

4. Los criterios que se hayan de aplicar para la localización de los sondeos de bombeo en el supuesto a. del punto anterior serán exclusivamente de adecuación o idoneidad hidrogeológica e hidrodinámica, sin que en ello intervengan consideraciones de hidrología superficial. Sin embargo, en los supuestos b. y c. debería tenerse en cuenta también el

(\*) Corresponde al caso típico de un acuífero, generalmente aluvial (aunque pueda darse con otros tipos), en el que de forma permanente o estacional el acuífero drena al río o es drenado por él, en una magnitud dependiente del sentido y valor de la diferencia que exista entre las altitudes de sus niveles respectivos.



régimen de circulación de las aportaciones reguladas y, en términos estadísticos, prever el de los excedentes sin regular. En efecto, dependiendo de las características hidrodinámicas del acuífero, de su grado de conexión con el río (\*) y "jugando" con la posición relativa de los puntos de bombeo, se podrán identificar los emplazamientos más adecuados para los sondeos de bombeo con vistas a conseguir que las afecciones generadas por los bombeos realizados en los mismos lleguen al río coincidiendo al mínimo posible con los meses en que son necesarios nuevos aportes de agua subterránea para la regulación conjunta, y al máximo cuando estadísticamente sean esperables excedentes sin regular.

En la figura 3 se han representado tres ejemplos de la ley de afección a las aportaciones circulantes por un río provocada por un bombeo "impulsional" (de 1 mes de duración, a caudal unitario), realizado durante el mes inicial en un acuífero conectado hidrodinámicamente a aquél (\*\*) la más inmediata

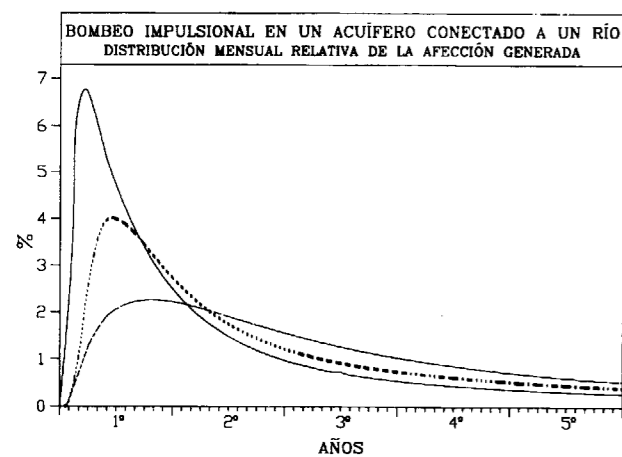


Figura 3

(\*) Dependiente de las dimensiones del cauce "mojado" así como de su colmatación.

(\*\*) Las leyes de afección representadas corresponden a tres emplazamientos de bombeo posibles en un acuífero real: el sistema acuífero carbonatado del sinclinal de Calasparra, conectado hidrodinámicamente al río Segura en el manantial de "El Gorgotón".

de las 3 respuestas representadas, correspondiente al emplazamiento de bombeo más próximo al río, se caracteriza por un máximo en el 3º mes, en el que se "afecta" al río en un 6,68 % del volumen total extraído del acuífero; la respuesta más diferida de las tres mostradas - además de la más "distribuida" en el tiempo - presenta un máximo muy poco acusado (2,265 %) en el mes 10º.

Ante cada situación hidrológica e hidrogeológica concreta, es decir, en el análisis preliminar - el estudio de anteproyecto - de la URGHC de que se trate, se deberá analizar la viabilidad de cada uno de los tres esquemas de gestión coordinada descritos - coordinación en serie, en paralelo y regulación conjunta -, y diseñar los estudios de campo y gabinete a realizar durante el estudio de proyecto para precisar las condiciones de aplicación de los mismos.

## 5. EJECUCION DE CADA ESTUDIO DE ANTEPROYECTO

En síntesis, la realización de un estudio de anteproyecto sobre la reordenación hidrológica y la gestión coordinada de los recursos hídricos en cada una de las 12 cuencas hidrográficas oficiales en que está dividida España comprendería las siguientes etapas:

1.<sup>a</sup> Definición de la o las **unidades de reordenación y gestión hidrológica coordinada (URGHC)** que hayan de ser estudiadas en cada cuenca, como resultado de las diferentes opciones planteables en cuanto a combinación o agrupación de las **unidades de demanda**, las **fuentes de recurso** y la **infraestructura de conducción y distribución** existentes o implicadas en la misma. Las URGHC definidas en una determinada cuenca podrán ser compatibles e independientes entre sí, o alternativas e incompatibles.

2.<sup>a</sup> Recopilación, análisis y tratamiento de la información de base - hidrológica, hidrogeológica, etc. - disponible sobre los "elementos" constitutivos de cada URGHC: **unidades de demanda** (riegos, abastecimiento, usos industriales, necesidades ecológicas, etc.), **fuentes de recurso** (embalses de regulación,

sistemas acuíferos, aguas residuales, etc.) e **infraestructura de conducción y distribución** (cauces, azudes, canales, acequias, elevaciones, etc.). El objetivo de esta fase del estudio de anteproyecto es caracterizar y analizar el funcionamiento actual y previsto de cada "elemento", como base necesaria para el diseño y evaluación preliminares de las posibilidades de reordenación y gestión hidrológica centradas en los sistemas acuíferos incluidos en la *unidad*.

3.<sup>a</sup> Análisis preliminar de las posibilidades de llevar a cabo una reordenación hidrológica en sistemas acuíferos en proceso o con riesgo de sobreexplotación, "prediseño" de las actuaciones y medidas de corrección aplicables y evaluación aproximada de los resultados conseguibles.

4.<sup>a</sup> Determinación preliminar de las posibilidades de aplicación de los esquemas o "modelos" de gestión coordinada descritos en el apartado 4.2., con "prediseño" de las condiciones de puesta en práctica de los mismos y estimación orientativa de los resultados - grado de regulación conjunta conseguible, demandas dotables, etc. - que se podrían alcanzar.

5.<sup>a</sup> Diseño, programación detallada y evaluación de los trabajos a realizar en el marco del estudio de detalle o proyecto mediante el que diseñar con suficiente precisión la reordenación y gestión hidrológica coordinada de la cuenca hidrográfica estudiada.

La enorme heterogeneidad hidrológica e hidrogeológica de las doce cuencas hidrográficas

definidas administrativamente en España hace que, con objeto de adquirir una experiencia suficiente sobre la cantidad, calidad y localización de la información a manejar y sobre el alcance de los estudios de anteproyecto propuestos, tal vez resultase más operativo y realista iniciar los mismos en sólo una de dichas cuencas - una de las mediterráneas, por ejemplo - antes de emprender el tratamiento de las restantes.

## REFERENCIAS

BARBA-ROMERO, J; BATLLE GARGALLO, A; LOPEZ ARECHAVALA, G; LOPEZ GETA, J. A.; LOPEZ VILCHES, L y NAVARRO ALVARGONZALEZ, A. (1991): "Determinismo y Estadística, Fiabilidad y Garantía en la Evaluación de los Recursos Hídricos". I Bienal Española de Ingeniería Geológica y Minera.

DGOH-ITGE (1996): Integración de los Acuíferos en los Sistemas de Explotación de Recursos Hídricos. Informe Interno.

ITGE (1989): Las Aguas Subterráneas en España. Estudio de Síntesis.

ITGE (1984): Estudio general de las posibilidades que ofrecen los grandes sistemas acuíferos en la regulación del potencial hídrico nacional mediante módulos de gestión simplificados. Informe Interno.

MINER-MOPTMA (1994): Libro Blanco de las Aguas Subterráneas.

SAHUQUILLO HERRAIZ, A y SANCHEZ GONZALEZ, A. (1983): Utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas. Boletín de Información y estudios N° 43. Servicio Geológico. MOPU.

SAHUQUILLO HERRAIZ, A: (1985). Criterios actuales para la gestión conjunta de aguas superficiales y subterráneas. Revista de Obras Públicas. Año CXXXII. Num. 3.235.

Original recibido: Enero 1996.

Original aceptado: Marzo 1996.

# INFORMACION

## Historia de la hidrogeología y de los sondeos de agua en España y en el Mundo, desde sus orígenes hasta finales del Siglo XIX

Por O. PUCHE RIART (\*)

### Los primeros tiempos. Apuntes para la configuración teórica del ciclo hidrológico.

Decía SAN ISIDORO DE SEVILLA en las **Etimologías** (XIII, 20, 1) que **"Abyssus es la insondable profundidad de las aguas ocultas en las cavernas, de las que proceden las fuentes y los ríos, o de las que fluyen ocultamente bajo tierra..."** (1). Abyssus, en español abismo, viene del griego abussos y significa sin fondo; los helenos pensaron que los mares no tenían fondo, así podían recibir el agua de los ríos manteniendo su nivel. La siguiente reflexión sería sobre la procedencia del agua en las fuentes; enseguida llegaron a la conclusión que esta retorna desde los abismos a través de las cavernas, ya que alguien podría haber observado como en las surgencias kársticas existían, en conexión con cuevas, importantes manantiales.

Para TALES DE MILETO (Siglo VII a.C.) el agua es el origen del Universo. Como diría SAN ISIDORO: **"Hay dos elementos fundamentales para la vida humana el fuego y el agua. Por eso se castiga duramente a quien se niega el fuego y el agua"** (2); es algo intuitivo que sin agua no hay vida. Asimismo, para TALES las aguas de las fuentes proceden de los océanos, siendo llevadas por el viento y el oleaje hacia el interior de las rocas. Esta idea del maestro, sobre el ciclo del agua, va a persistir durante veinticuatro siglos.

PLATON (Siglos V-IV a.C.) en **Fedón** señala que todos los manantiales se nutren de una gran caverna, situada bajo los campos Elíseos, **El Tártaro**,

que era alimentada por el agua oceánica. De igual forma, en el **Critias** señala que el agua de lluvia pasa a los ríos y estos van al mar, retornando posteriormente a tierra a través de las cavernas.

Para el discípulo de PLATON, ARISTOTELES (Siglo IV a.C.), el agua de las fuentes tiene tres posibles orígenes. Tenemos la ascensión del fluido por fisuras y cavernas, debido a que este sistema funciona como una esponja. Asimismo considera que el vapor de agua puede ascender desde el interior de la Tierra condensándose. Y, por último, señala que parte del agua que circula por las cavernas procede de la infiltración del agua de lluvia. Vemos así como la observación va dando mayor precisión a la definición del ciclo hidrológico.

El agua, convertida en una necesidad pública, cada vez suscitaba mayor interés, por eso no sólo se desarrolla su parte filosófica sino también la tecnológica. ANTIPASTER DE TSALONICA (siglo IX a.C.) narra como Ceres, la Diosa de la Abundancia, manda bailar a las mujeres que empujan la rueda del molino: **"había ordenado a las ninfas acuáticas que desempeñaran su dura tarea, haciendo girar las paletas del rodezno"** (3). Es una de las primeras descripciones sobre la existencia de la rueda hidráulica. Asimismo, HERODOTO nos cuenta como EULAPIOS DE MEGARA (siglo VI a.C.) excavó minas para traer aguas a Samos. Pero ya, hacia el 2500 a. C., en los Montes Elburtz, en Mesopotamia, drenaban los conos de deyección mediante kanats, galerías horizontales elaboradas para captar los caudales del subsuelo. Y, en la época de EULAPIOS, se regaban por este método cerca de 500.000 Ha, en

Egipto, al Oeste del Nilo. Asimismo, en el país de las pirámides se inventó el tornillo de Arquímedes, también llamado tornillo egipcio, coclea o caracol. Y, por último, indicar que se constata la existencia de pozos desde la más remota antigüedad, lo que se puede comprobar con la simple lectura de los libros más vetustos de **La Biblia**.

Recordemos el valor sagrado que el agua tenía para los helenos; todo río, arroyo, lago o manantial eran protegidos por las más beneficiosas de las criaturas: las ninfas y náyades, siempre jóvenes y bellas, siempre dispuestas a dar un buen consejo y a repartir salud a quien se lo pidiese. Las creniades eran las ninfas particulares de las fuentes. Asociada a estas creencias nace el mito de la **Fuente de la Eterna Juventud** y hubo quien pensaba que esta era la Fuente de Ninfeo, en Siracusa. Posteriormente, los romanos mantienen tales tradiciones y crean una diosa del agua, Conventina (Deae Conventinae), una de cuyas imágenes se puede contemplar todavía en el Museo de Antigüedades de Newcastle, Inglaterra (Fig.-1). Para PLINIO en toda fuente reside una divinidad y para SENECA la súbita aparición de un manantial importante merece la creación de un altar.

Los romanos mantuvieron, en líneas generales, las teorías de los pensadores helenos. MARCO VITRUBIO (86-22 a.C.), en los diez libros **De Architectura**, aporta diversas ideas sobre las aguas. Considera la infiltración producida por el deshielo de la nieve y la surgencia de caudales a menor cota. Estructura las aguas en función de su calidad, como de lluvia, termales y medicinales. Y, en los tres últimos capítulos, describe diversos aparatos hidráulicos: la co-

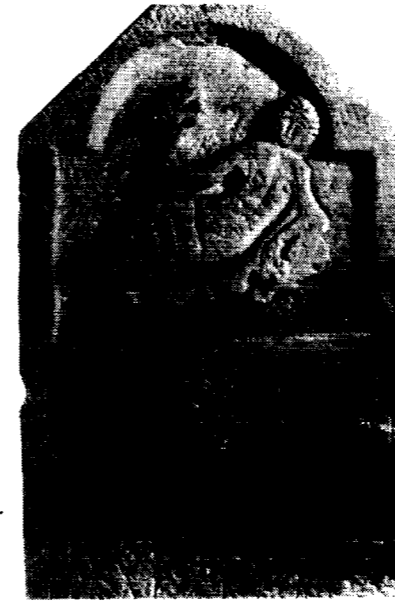


Figura 1. Diosa Conventina. Newcastle, Inglaterra.

clea, la bomba de Ctesibios, las norias o rotae y los rodeznos. Muchos de estos aparatos se emplearon en los desagües de la próspera minería hispánica. Tornillos hubo en Sotiel Coronada (Huelva), Posadas (Córdoba), Las Cuevas (Almadén, Ciudad Real) o en la Sierra de Cartagena (Murcia). En el Museo Arqueológico Nacional también se conserva una magnífica bomba de Ctesibio de Sotiel. Asimismo en Río-tinto (Huelva), en Santo Domingo (Portugal) y en otras minas ibéricas se emplearon sistemas de achique con varias ruedas hidráulicas, en paralelo, accionadas por esclavos.

Pero también con los romanos tuvo lugar algún cambio en el esquema de pensamiento, así LUCRECIO (Siglo I), en **De Rerum Natura**, mantiene que el agua de los manantiales muestra su origen en los océanos, pero la sal es filtrada a su paso por el interior de la Tierra. Asimismo, a veces aparecen netos retrocesos, tal es el caso de lo expuesto por LUCIO ANNEO SENECA (Siglo I), el cual mantiene las tesis aristotélicas, pero sostiene que el agua de lluvia es insuficiente para nutrir los manantiales. La conclusión procede de la observación, pero esta es incorrecta, ya que no considera la pluviometría en toda la cuenca de alimentación. Dicho error no fue desmentido hasta el siglo XVI.

Los colonizadores del Lacio llenaron el territorio hispano de grandes obras hidráulicas como las presas de Proserpina (en Mérida), Alcantarilla (cerca de Toledo), Cornalvo, Castuera y otras. En canales destacamos los de Toledo, con 50 Km, o los de las minas de oro de Las Médulas, con una red de mas de 200 km. Tenemos trasvases como el de Cella, en Teruel, de 14 km, que llevaba agua de la cuenca del Turia a la del Jiloca. Acueductos como los de Segovia, Mérida, Almuñécar, Chelva, Toledo o Tarragona. Y, por último, reseñar la construcción de baños y termas (Alange, Bagante, Caldas de Montbui), aljibes, fuentes (Muro de Agreda), pozos y conducciones.

También reseñar los cantos del poeta PETRARCA a la Fuente de Vaucluse (Vallis Clausa), Francia, donde un manantial, con una zona de alimentación de 100.000 Ha, vierte 20.000 l/s. hasta que se llena el sifón, pasando entonces a expulsar 150.000 l/s.

Los visigodos mantienen la tradición grecorromana sobre las aguas. Ya hemos descrito los textos de SAN ISIDORO en las **Etimologías**. Aparte de abismos y cavernas ISIDORO señala que las aguas: **"...se incorporan al aire cuando se evaporan, ascienden a las alturas y toman posesión del cielo..."** (4). Vemos pues, como se va completando el conocimiento del ciclo hidrológico. Por otro lado, en el libro XX, Cap. 15, **De instrumentis hortorum**, describe el empleo de norias, garruchas y cigüeñas, en su terminología hispánica (de ahí viene lo de cigoñal o cigüeñal), o pértigas articuladas de cuya parte fina colgaban sogas y cubo.

Los visigodos comprueban que el agua es un bien escaso y la ponen un precio; según AMABLE SANCHEZ (1991) SAN ISIDORO señala el establecimiento de redes de acequias y canales en las que se paga por horas de riego (5). Asimismo, en el **Fuero Juzgo** se establecen prioridades en las aguas para molinos, navegación y otros, penalizando los hurtos de agua.

SAN MARTIN DE BRAGA en **De correctione rusticorum** trata de eliminar, en Gallaecia, supersticiones paganas, tales como el culto a las aguas o las ninfas (6). Recordemos que entre los celtas hubo una gran veneración por las aguas, así en ríos, pozos y lagos es frecuente encontrar ofrendas votivas

hundidas. Estos lugares se consideran curativos, propiedades etéreas emanan de algunos manantiales **"a ciertas horas del día o momentos de la fase lunar"** (7) y siempre aparecen cuidados por un espíritu guardián. Generalmente se asocian con el útero de la Tierra y es frecuente en la cultura galo-céltica encontrar aquí a la diosa Matronae, la Madre, diosa de la fertilidad. Estas tradiciones sobre pozos sagrados aun han persistido hasta nuestros días y en algunos de ellos, sobre todo de Irlanda, Escocia o Gales, atan trozos de tela en los arbustos y árboles próximos.

Los árabes llenaron España de minas o túneles horizontales para la captación de recursos subterráneos, tal es el caso del abastecimiento al barrio alto de Jaén y el de Palma de Mallorca, o los riegos del Levante. En Madrid, hasta 1856, toda el agua consumida provenía de minas, por eso JUAN VERNET, en la **Historia de la Ciencia Española**, señala que: **"Existe la teoría que el nombre de la capital de España, procede del sistema de riego y de abastecimiento de aguas todavía hoy practicado en ciudades del Próximo Oriente, llamado mayrá, por lo que a la ciudad árabe se la llamó Mayrit"** (8).

En la capital, el agua se obtenía mediante la filtración a través de las paredes de pozos, con fábrica generalmente de ladrillo, y luego el agua salía por los viajes, o túneles casi horizontales.

En el reinado de ABD AL RAHMAN III, se construyó el acueducto de Medina Azahara, en Córdoba, única gran obra hidráulica de época musulmana que tengamos noticias. Por lo general, tenemos diversas construcciones como las aceñas y canales de riego de Granada o del Turia, así como azudas o norias o ñoras como las de Abarán y Alcantarilla (Murcia), Albarracín (Teruel), La Albolafia (Córdoba) o los palacios de Annaura (de la noria), en Toledo, donde se encontraba tal vez la mayor rueda hidráulica de las descritas en España. Son varios los poetas, como IBN TAMMAN AL HAYYMAN (Siglo XI) o ABU I HASAN ALI IBN MUSA que cantan los lamentos de la noria (dawlab). Los árabes también destacaron por la construcción de aljibes o depósitos subterráneos y baños.

Respecto a las aguas subterráneas señalar el nacimiento de la figura del prospector o zahorí, zahurí en árabe. La

(\*) E.T.S.I. de Minas de Madrid e I.N.H.I.G.E.O.



Figura 1. Diosa Conventina. Newcastle, Inglaterra.

clea, la bomba de Ctesibios, las norias o rotas y los rodeznos. Muchos de estos aparatos se emplearon en los desagües de la próspera minería hispana. Tornillos hubo en Sotiel Coronada (Huelva), Posadas (Córdoba), Las Cuevas (Almadén, Ciudad Real) o en la Sierra de Cartagena (Murcia). En el Museo Arqueológico Nacional también se conserva una magnífica bomba de Ctesibio de Sotiel. Asimismo en Rótinto (Huelva), en Santo Domingo (Portugal) y en otras minas ibéricas se emplearon sistemas de achique con varias ruedas hidráulicas, en paralelo, accionadas por esclavos.

Pero también con los romanos tuvo lugar algún cambio en el esquema de pensamiento, así LUCRECIO (Siglo I), en *De Rerum Natura*, mantiene que el agua de los manantiales muestra su origen en los océanos, pero la sal es filtrada a su paso por el interior de la Tierra. Asimismo, a veces aparecen netos retrocesos, tal es el caso de lo expuesto por LUCIO ANNEO SENECA (Siglo I), el cual mantiene las tesis aristotélicas, pero sostiene que el agua de lluvia es insuficiente para nutrir los manantiales. La conclusión procede de la observación, pero esta es incorrecta, ya que no considera la pluviometría en toda la cuenca de alimentación. Dicho error no fue desmentido hasta el siglo XVI.

Los colonizadores del Lacio llenaron el territorio hispano de grandes obras hidráulicas como las presas de Proserpina (en Mérida), Alcantarilla (cerca de Toledo), Cornalvo, Castuera y otras. En canales destacamos los de Toledo, con 50 Km, o los de las minas de oro de Las Médulas, con una red de más de 200 km. Tenemos trasvases como el de Cella, en Teruel, de 14 km, que llevaba agua de la cuenca del Turia a la del Jiloca. Acueductos como los de Segovia, Mérida, Almuñécar, Chelva, Toledo o Tarragona. Y, por último, reseñar la construcción de baños y termas (Alange, Bagante, Caldas de Montbui), aljibes, fuentes (Muro de Agreda), pozos y conducciones.

También reseñar los cantos del poeta PETRARCA a la Fuente de Vaucluse (Vallis Clausa), Francia, donde un manantial, con una zona de alimentación de 100.000 Ha, vierte 20.000 l/s. hasta que se llena el sifón, pasando entonces a expulsar 150.000 l/s.

Los visigodos mantienen la tradición grecorromana sobre las aguas. Ya hemos descrito los textos de SAN ISIDORO en las *Etimologías*. Aparte de abismos y cavernas ISIDORO señala que las aguas: "...se incorporan al aire cuando se evaporan, ascienden a las alturas y toman posesión del cielo..." (4). Vemos pues, como se va completando el conocimiento del ciclo hidrológico. Por otro lado, en el libro XX, Cap. 15, *De instrumentis hortorum*, describe el empleo de norias, garruchas y cigüeñas, en su terminología hispánica (de ahí viene lo de cigoñal o cigüeñal), o pértigas articuladas de cuya parte fina colgaban sogas y cubos.

Los visigodos comprueban que el agua es un bien escaso y la ponen un precio; según AMABLE SANCHEZ (1991) SAN ISIDORO señala el establecimiento de redes de acequias y canales en las que se paga por horas de riego (5). Asimismo, en el *Fuero Juzgo* se establecen prioridades en las aguas para molinos, navegación y otros, penalizando los hurtos de agua.

SAN MARTIN DE BRAGA en *De correctione rusticorum* trata de eliminar, en Gallaecia, supersticiones paganas, tales como el culto a las aguas o las ninfas (6). Recordemos que entre los celtas hubo una gran veneración por las aguas, así en ríos, pozos y lagos es frecuente encontrar ofrendas votivas

hundidas. Estos lugares se consideran curativos, propiedades etéreas emanadas de algunos manantiales "a ciertas horas del día o momentos de la fase lunar" (7) y siempre aparecen cuidados por un espíritu guardián. Generalmente se asocian con el útero de la Tierra y es frecuente en la cultura galo-céltica encontrar aquí a la diosa Matronae, la Madre, diosa de la fertilidad. Estas tradiciones sobre pozos sagrados aun han persistido hasta nuestros días y en algunos de ellos, sobre todo de Irlanda, Escocia o Gales, atan trozos de tela en los arbustos y árboles próximos.

Los árabes llenaron España de minas o túneles horizontales para la captación de recursos subterráneos, tal es el caso del abastecimiento al barrio alto de Jaén y el de Palma de Mallorca, o los riegos del Levante. En Madrid, hasta 1856, toda el agua consumida provenía de minas, por eso JUAN VERNET, en la *Historia de la Ciencia Española*, señala que: "Existe la teoría que el nombre de la capital de España, procede del sistema de riego y de abastecimiento de aguas todavía hoy practicado en ciudades del Próximo Oriente, llamado mayrá, por lo que a la ciudad árabe se la llamó Mayrit" (8).

En la capital, el agua se obtenía mediante la filtración a través de las paredes de pozos, con fábrica generalmente de ladrillo, y luego el agua salía por los viajes, o túneles casi horizontales.

En el reinado de ABD AL RAHMAN III, se construyó el acueducto de Medina Azahara, en Córdoba, única gran obra hidráulica de época musulmana que tengamos noticias. Por lo general, tenemos diversas construcciones como las aceñas y canales de riego de Granada o del Turia, así como azudas o norias o ñoras como las de Abarán y Alcantarilla (Murcia), Albarracín (Teruel), La Albolafia (Córdoba) o los palacios de Annaura (de la noria), en Toledo, donde se encontraba tal vez la mayor rueda hidráulica de las descritas en España. Son varios los poetas, como IBN TAMMAN AL HAYYMAN (Siglo XI) o ABU I HASAN ALI IBN MUSA que cantan los lamentos de la noria (dawlab). Los árabes también destacaron por la construcción de aljibes o depósitos subterráneos y baños.

Respecto a las aguas subterráneas señalar el nacimiento de la figura del prospector o zahorí, zahurí en árabe. La

emblemática varita de olivo, tiene un funcionamiento similar a los modernos magnetómetros de torsión o del gravímetro de Nörsgaard (9). Desde entonces España tiene una amplia tradición de zahorís, uno de ellos SAN ISIDRO, el patrón de Madrid (10), que inició su andadura profesional buscando agua y construyendo pozos, antes de hacerse labrador.

A nivel científico sólo destacar las explicaciones que sobre la evaporación nos da AL BURUNDI (Siglo X-XI); se conocían ya todos los componentes del ciclo hidrológico, pero todavía hacía falta que alguien hiciera el balance de la distribución de los caudales. Y, a nivel técnico, reseñar que en una imagen del **Libro de los métodos neumáticos y mecánicos**, escrito hacia el 1200, por IBN AL-RAZZAZ AL-GAZARI, observamos el diseño de engranajes que transmiten el movimiento según eje vertical (dado por fuerza animal) a movimiento según eje horizontal, de accionamiento de una noria de cangilones y una rueda hidráulica con cazos.

En los reinos cristianos de Europa destacamos el nacimiento de los pozos artesianos. El más antiguo de ellos se hizo, en 1126, en la cartuja de Lillers (Artois). Esta región se llamaba antiguamente Artesa, de ahí viene lo de artesiano. Se supone que los construyeron perforando mediante el **método chino de percusión**, hasta llegar con la sonda al acuífero de la creta fracturada, situado a varios cientos de metros de profundidad. Poco después en Módena, al Norte de Italia, se perforaron algunos pozos de este tipo (aunque algunos autores indican que estos se hicieron hacia el siglo VIII o IX, ya que la ciudad ostentaba en su escudo de armas dos barrenas de fontanero, con el lema **Avia pervia**). De todas formas, según JUAN VILANOVA, ya en el siglo VI, OLIMPIODORO DE ALEJANDRIA describe unos pozos surgentes construidos en un oasis. En estos pozos, el agua ascendía por los principios de la hidrostática, pero al estar frecuentemente a una cierta temperatura algunos autores como AYAIIS pensaron que la elevación se debía al calor.

En líneas generales los autores de la época siguen las pautas aristotélicas. SANTO TOMAS (Siglo XIII) indica que los astros influyen en el ascenso del agua hasta las montañas y SAN ALBERTO MAGNO (Siglo XIII) señala

que los manantiales se nutren de las cavidades subterráneas, almacenes del agua.

El año 1220, se pone en marcha el pantano de Cardete y el canal de Tauste y asimismo, en 1384, se construye la presa de Almansa. Hay una preocupación legislativa por los regadíos, así como por los caudales destinados a la industria (molinos y ferrerías) o los de los ríos navegables. En cuanto a las aguas subterráneas en **Las siete partidas** (1256-1265), de ALFONSO X EL SABIO, se recoge la primera ley hispana, según sabemos, que hace referencia a estos recursos. Nadie puede negar a un vecino que haga pozo o fuente, a no ser que este lo hiciera con malicia, por dañar al otro, con la intención de destajar las venas por donde viene el agua a su pozo o fuente (Part. III, Tít. XXXII, Ley XIX, **Como puede ome facer un nuevo pozo en su heredad**) (11). En definitiva, vemos como el propietario de las aguas subterráneas es el dueño del terreno.

#### **La observación, fundamento de una nueva etapa.**

En el Renacimiento la observación se convierte en la base del conocimiento y se llega a importantes aportaciones en

el campo de las Ciencias Naturales. BERNARD PALISSY (Siglo XVI) en el **Discours admirable de la nature des eaux et des fontaines** (Fig.-2), señala que: **"Nunca he tenido otros libros que el cielo y la tierra cuyas páginas están abiertas para todos"**. El libro está planteado como un combate dialéctico entre dos personajes: Teoría y Práctica. Al final Práctica vence a Teoría, desbancando los argumentos de los clásicos y llegando a la conclusión que las fuentes son engendradas por el agua de lluvia. Los aportes pluviométricos se infiltran en el suelo hasta llegar a un nivel impermeable, entonces el agua circula hacia sus fuentes y manantiales. Según LINO PEÑUELAS (1851) PALISSY también fue el primero que habló de la teoría y práctica de la sonda (12).

Surgen nuevas ideas; así, RENE DESCARTES, en **Principia Philosophiae** (1642) describe la existencia de grandes alambiques subterráneos en el interior de la Tierra que transforman el agua salada de los mares en el agua dulce de las fuentes. Por otro lado, para el jesuita ANASTASIUS KIRCHER, en **Mundus Subterraneus** (1655), la Tierra era un gran animal que bebía agua de mar y como resultado de su metabolismo expulsaba agua dulce por los manantiales. En los remolinos de Maelström, frente a las costas de



Palissy

Bernard Palissy (1510-1590)

## DISCOVRS ADMIRABLES, DE LA NATURE DES EAVX ET FONTAINES, TANT NATVRELLES QV'ARTIFICIELLES, des metaux, des fels & salines, des pierres, des terres, du feu & des emaux.

AVEC PLSIEVRS AVTRES EXCELLENS secrets des choses naturelles.

PLVS VNTRAITE' DE LA MARNE, FORT vtile & necessaire, pour ceux qui se mellent de l'agriculture.

LE TVT DRESSE' PAR DIALOGVES, ES- quels sont introduits la theorique & la pratique.

Par M. BERNARD PALISSY, inventeur des rustiques figulines du Roy, & de la Royne, sa mere.

A TRESHAVT, ET TRESPVISSANT sieur le sire Anthoine de Ponts, Cheualier des ordres du Roy, Capitaine des cents gentils-hommes, & conseiller tresfidele de sa maiesté.

A PARIS,

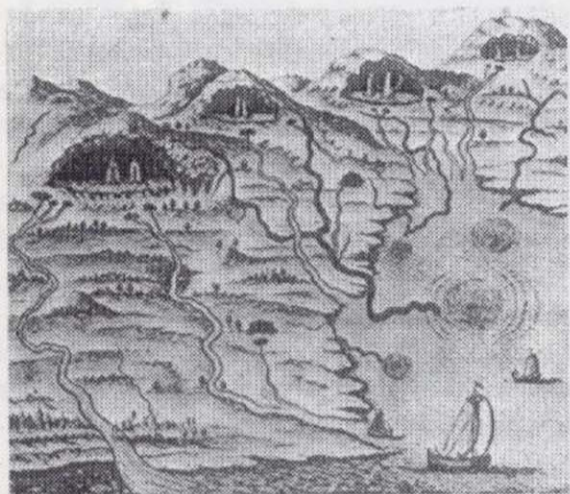
Chez Martin le Jeune, à l'enseigne du Serpent, deuant le college de Cambray.

1580.

AVEC PRIVILEGE DV ROY.

Figura 2. Bernard Palissy y su obra "Discours admirable des eaux et des fontaines".

Noruega, este autor quiere reconocer las bocas por las que se alimentaban las cavernas. A partir de grandes cavidades un conjunto de hidrofilacios o canales subterráneos comunicaría con ríos, mares y fuentes (Fig.-3). Este autor influiría mucho en el pensamiento de la época, tal y como se aprecia en la obra del salmantino TORRES VILLARROEL (siglo XVIII).



Remolinos de Maelström.

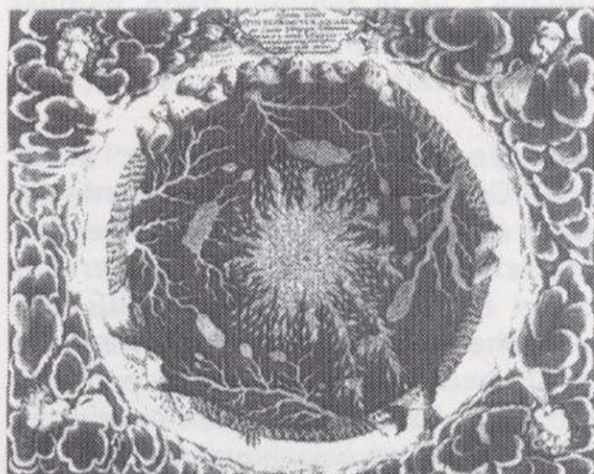


Figura 3. Esquema de los hidrofilacios según ANASTASIUS KIRCHER (1655).

Vemos pues que salva la aproximación científica de Palissy, por lo general, hay una persistencia de las teorías aristotélicas. En España ocurre lo mismo, tal es el caso de JUANELO TURRIANO (1511-1558) que escribe, a finales del XVI, integrado en un Códice que se encuentra en la Biblioteca Nacional, bajo la denominación de **Los Veinte y un Libros de los Ingenios y Máquinas**, un libro titulado **De las Calidades de las Aguas, y de sus Propiedades, y de su Generación o Nacimiento**. En el folio cinco dice: "los jheologos dicen, que toda agua viene del mar, porque dicen para esto que la mar entra muy escondidamente, por las concavidades y

cavernas escondidas, dentro de la tierra y va después derramándose por todas las venas de la tierra", en este texto LOPEZ AZCONA quiso encontrar el primer empleo del término geólogo (13). Asimismo, LEON PINELO, en **El Paraíso en el Nuevo Mundo. Comentario Apologético. Historia Natural y Peregrina de las Indias Occidentales, Islas y Tierra Firme del Mar Océano** (1656) indica que: "en la Creación se descubrió más la Tierra, retirándose el agua a sus Cabernas, y a su abismo y Centro" (14). Aun se sigue hablando de los abismos, y vemos, en el corte del Globo de JOHN WOODWARD, en **New Theory of the Earth** (1696), como el autor sitúa **le gran Abyme** en el Núcleo de la Tierra, el cual aparece unido por canales a los mares y a la Superficie.

Los autores españoles de la época trabajaron también en la desalación del agua marina. ANDRES DE LAGUNA (1556) propone depurar agua de mar por desalación. MIGUEL MARTINEZ DE LEYVA (1597) señala haber encontrado un método de desalación sin describirlo. Y, los miembros de la expedición de FERNANDO DE QUIROS (1605-1606), en su viaje por el océano Pacífico, logran sobrevivir mediante el consumo de agua del mar a la que quitaban la sal. A nivel técnico, destacar también los intentos del MARQUES DE ZENETE (1526) por abastecer de agua a Toledo, mediante bombas alemanas de pistón accionado por rueda hidráulica, las cuales explotaron ante una columna hídrica de 90 m. El 23 de febrero de 1563, JUANELO TURRIANO, puso en marcha su famoso ingenio en la Ciudad Imperial, tenía dos tramos, el primero consistía en una rueda hidráulica que subía el agua hasta 14 m, el segundo estaba formado por un sistema de torres escalonadas: "...que protegían las cucharas movidas por bielas que transmitían el impulso de otra rueda hidráulica situada sobre el río. Este tipo de ingenio de cucharas, venía en realidad de la tradición hispánica y está descrito ya por AL YAZIM" (15).

En aquellos tiempos la religión impregna la literatura científica. Las lecturas literales de **La Biblia**, sin comprender los estilos literarios ni el contexto histórico en que se elaboraron, indujeron a errores. Por ejemplo JUAN BAUTISTA VAN HELMONT, en **Initia Phisicae Inaudita** (1665), de acuerdo con el texto de **El Génesis** que narra: "había una fuente que subía del interior de la

Tierra para regarla, pues el Señor no había hecho llover aun sobre la Tierra", llega a la conclusión que las aguas subterráneas se deben a la existencia de un mina de agua, en forma de **arena vivificante**, inextinguible.

En España, ALFONSO LIMON MONTERO, en **Espejo cristalino de las aguas de España, Hermoseado y Guarnecido, con el Marco de variedad de Fuentes y Baños, cvyas Virtudes, Excelencias y Propiedades se Examinan, Disputan y acomodan a la salud, provecho y conveniencias de la vida humana** (1697), obra reeditada recientemente por el ITGE, trata sobre el origen de las fuentes según los criterios clásicos. En esta obra se describen numerosas fuentes, ríos, lagos y baños.

Otra obra a destacar es **Fluencia de la Tierra y curso subterráneo de las aguas** (1724), de THEODORO ARDEMANS (1664-1726), Veedor de las conducciones de aguas de Madrid y Maestro Mayor de Fuentes (Recordemos que en 1617 se había creado, en Madrid, la Junta de Fuentes, para controlar cualquier viaje de agua). Gracias a MAFFEI, E. y RUA DE FIGUEROA, A. (1871) conocemos los contenidos de esta obra, de 22 capítulos. Estos son: Del agua del mar. Del nacimiento de las aguas. Del modo de buscar las aguas. Del modo de degollarlas. De la calidad de las aguas. De la aplicación de las aguas que pasan por los minerales y medios minerales. De como se han de abrir las minas. De la conducción de las aguas. De los aljibes y cisternas. De la medida de las aguas. De los pozos y del empedrado de fábrica. De las norias, fuentes, estanques y acequias (16). Etc. Como vemos, estamos ante el primer tratado hidrológico hispano completo.

Tres años después, en 1727, JUAN CLAUDIO AZNAR DE POLANCO escribe **Arithmética y Geometría práctica...de los nacimientos de las aguas dulces y gordas de la villa de Madrid**.

En 1729, JERONIMO FEIJOO, en el **Theatro Crítico Universal**, Tomo III, Discurso V, reprueba el uso de la vara adivinatoria y a los zahorís, ya que no se fundamentan en ningún principio filosófico. Dice de ellos que son unos embaucadores y pactadores con el diablo. No es el primer autor que critica a dicho gremio, AGRICOLA ya los había ridiculizado en el Libro II **De Re Metallica** (1556), obra en la que aparecen

dibujados varios de ellos. Este último autor también describe, en su obra, numerosas bombas de émbolo para el desagüe de las minas.

Entre 1764 y 1765, el Dr. PEDRO GOMEZ DE BEDOYA realiza la publicación de cinco de los seis volúmenes (el tercero no llegó a publicarse) de la **Historia universal de las fuentes minerales de España, sitios en que se hallan, principios de que constan, analyses, y virtudes de las aguas, modo de administrarlas, y de ocurrir a los accidentes que suelen nacer de su abuso; todo deducido de la observación, y experiencia; descripción de los lugares de su situación, con una buena parte de la Historia natural del término de cada Pueblo, y explicación de las curiosidades que contiene** (Fig.-4). Esta obra puede considerarse la primera enciclopedia hidrográfica-mineral hispana. En ella se inventarían las fuentes ordenadas alfabéticamente, con sus relatos histórico-descriptivos, análisis cualitativos, etc. En total 214 citas, entre fuentes, pozos, ríos y lagunas.

## HISTORIA UNIVERSAL

DE LAS FUENTES MINERALES DE ESPAÑA. Sitios en que se hallan, principios de que constan, analyses, y virtudes de sus aguas, modo de administrarlas, y de ocurrir a los accidentes que suelen nacer de su abuso; todo deducido de la observación, y experiencia; descripción de los lugares de su situación, con una buena parte de la Historia natural del término de cada Pueblo, y explicación de las curiosidades que contiene.

### TOMO PRIMERO QUE COMPREHENDE LAS LETRAS A, Y B.

SU AUTOR

D. PEDRO GOMEZ DE BEDOYA PAREDES, Doctor en Medicina, Médico de número de Familia de el Rey nuestro Señor, Proprietario de sus Reales Hospitales General, y Pafion de la Corte, Ex-Banquero de el Real Proto-Medicato, Director, Secretario perpetuo, y primitivo Fundador de la Sociedad Médica de la Real Congregación de nuestra Señora de la Esperanza, y el primero primer Médico del Ilmo. Señor Dean, y Cabildo de la Santa Metropolitana Iglesia de Señor Santiago, y Catedrático de Cirugía, y Anatomía de su Infante Universidad, &c.

CON LAS LICENCIAS NECESSARIAS  
En Santiago: en la Imprenta de Ignacio Aguayo.

Figura 4. Historia Universal de las fuentes minerales de España, del Dr. GOMEZ DE BEDOYA (1764-1765).

El desarrollo de la minería, en la época del Imperio, hizo que los hispanos se preocupasen de las aguas subterráneas que tantos problemas causaban al laboreo. La descarga de caudales, cuando era posible, se hacía por socavón, pero también fue frecuente el empleo de norias, malacates y bombas de Ctsibio, éstas últimas fueron introducidas por MIGUEL DE VIDANA y LUCAS PERES, en 1630, en las minas de Pachuca. Como ha demostrado NICOLAS GARCIA TAPIA (1989), el español JERONIMO DE AYANZ había inventado, en 1606, la primera máquina de vapor, pensando en el desagüe de las minas (17). Esta máquina se anticipó un siglo a la creada por SAVERY, en Inglaterra.

Otro minero, FRANCISCO JAVIER GAMBOA, en los **Comentarios a las ordenanzas de minas dedicadas al católico Rey, Nuestro Señor D. Carlos III (que Dios guarde), siempre magnánimo, siempre feliz, siempre augusto** (1761), recoge las diversas teorías, en boga, sobre el origen de las fuentes: 1.- Las aguas llegan a las montañas debido a los movimientos y tempestades del océano, como las contracciones del corazón hacen subir a la sangre. 2.- La Tierra es como una esponja seca que chupa las aguas del mar. 3.- Los cilindros o columnas que forman las aguas del mar, introducidos por los canales de la Tierra fuerzan el ascenso del agua. 4.- La causa es el calor subterráneo. Al hervir el agua en un alambique, las partes más ligeras se separan de las más densas y suben, al condensarse las gotas se introducen en grietas y cavidades, descendiendo por gravedad, así se forman ríos, fuentes y manantiales. 5.- Modernamente se admite que se deben a las lluvias. Asimismo el agua de evaporación se condensa en las montañas. Con estos aportes se nutren manantiales y fuentes. En GAMBOA se observa ese tránsito entre las ideas clásicas y las ideas modernas.

#### La experimentación. Cuantificación de los parámetros del ciclo hidrológico.

Si se lograba demostrar la idea, vertida por PALISSY, que el agua de lluvia es suficiente para aportar los caudales de las fuentes, se derrumbarían las tesis clásicas. De esto se encargarían PERRAULT, MARIOTTE, DAUSSE y otros.

A finales del XVII, entre 1668 y 1670, PIERRE PERRAULT evalúa la precipitación anual en la cuenca alta del Sena, comprobando que las aportaciones pluviométricas superaban en seis veces a los caudales de escorrentía. Asimismo, estudia la ascensión capilar, demostrando que no se puede formar un manto de agua por encima del nivel freático. Estos datos son recogidos en la obra **De l'origine des fontaines** (en la Escuela de Minas tenemos un ejemplar, edición de 1674) (Fig.-5). Este importante libro consta de dos partes y termina con una carta donde escribe a HUYGUENS sus experiencias, con fecha último de julio de 1672. En la primera parte hace una revisión crítica, a través de 146 páginas, de las teorías de PLATON, ARISTOTELES, VITRUBIO, SENECA, SANTO TOMAS y los filósofos de Connimbre, IVLES SCAGLIER, el médico CARDANO, W. DOBRZENK de Bohemia, VAN HELMONT, el académico inglés LYDIAT, PIERRE DAVITY, DESCARTES, NICOLAS PAPIN GASSENDI, JEAN DU HAMEL, el jesuita GASPARD SCOTTO, JACQUES ROHAULT, el padre JEAN FRANÇOIS y BERNARD PALISSY. En la segunda parte, páginas 147-324, expone sus teorías, confrontándolas a las de los clásicos (18).

También, por aquellas fechas, EDME MARIOTTE, en **Du mouvement des eaux** (1690), publicado dos años después de su muerte, aporta una serie de datos en línea con PERRAULT. Este autor había comprobado la infiltración del agua de lluvia, en el Observatorio de París, los días de precipitaciones. También, afora los caudales del Sena, por medio del método del flotador, y llega a la conclusión siguiente: "Es evidente que si la tercera parte de los caudales se evapora sobre la superficie de la Tierra, queda todavía un volumen de agua suficiente para mantener el caudal conjunto de los ríos y pozos de la cuenca".

Asimismo, el astrónomo británico EDMUND HALLEY (1656-1742) estudiaría la evaporación en la zona del Mediterráneo. A partir de entonces estaba justificado el equilibrio en el nivel de las aguas del mar, los caudales aportados por los ríos ya no debían perderse en los abismos.

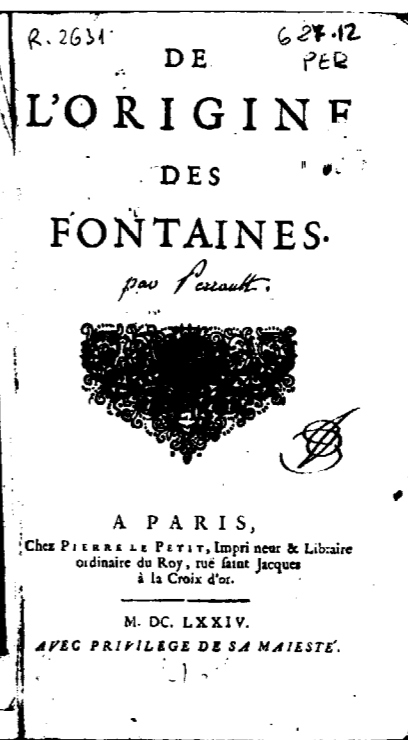
Se estaban cuantificando todos los parámetros del ciclo hidrológico, pero existía un cierto desorden. Según SILVINO THOS y CODINA (1878): " Ber-



Figura 5. De l'origine des fontaines de PIERRE PERRAULT (1674).

nard Palissy lo afirma terminantemente en su obra...; Perrault se hace de él propagandista acérrimo, incurriendo no obstante al explicarlo en errores lamentables; Mariotte y el padre Francisco de Palissy lo exponen con acierto, pero con excesiva falta de detalles; Pluche... en su Espectáculo de la Naturaleza, se concreta a una comarca determinada...; por fin Desmarest, en la Enciclopedia metódica de D'Alambert (1754) resumió todos estos trabajos é hizo una historia completa de la cuestión" (19).

A finales del siglo XVII, se había inventado la bomba de vapor de SAVERY y, a comienzos del XVIII, se idearía la de NEWCOMEN. La mayor aplicación de estas máquinas inglesas se daría en las minas de cobre de Cornwall; así, entre 1710 y 1714, se instala una en la mina de Wheal Vor, de dicho distrito, bajo este último sistema. En tal contexto, WATT, en 1756, convierte el movimiento circular en rectilíneo, gracias al mecanismo biela-manivela, que aplicaría a su máquina de vapor. Las bombas de WATT empezaron a drenar las minas de Cornwall en 1778. Los estudiantes de la Academia de Minas de Almadén



recibían importantes lecciones de hidráulica; un alumno de la primera promoción, ANDRES MANUEL DEL RIO, a finales del XIX, diseña una potente máquina de columna de agua para drenar las minas de Morán, en México, tal y como se hacía en Sajonia (20). Para HUMBOLDT es la primera de este tipo que se instala en el continente americano. Sin embargo, hasta 1797, no se monta la primera máquina de WATT en España, esto lo hizo JORGE JUAN en el dique de carenar de la dársena de Cartagena. Poco después, se instala una de estas bombas en el pozo de San Teodoro, de Almadén. Otro alumno, de la primera promoción de la Academia de Minas de Almadén, llamado FRANCISCO DE LA GARZA, sustituiría el combustible vegetal, la retama, de la "bomba de fuego", por el carbón de piedra, lo que dio origen al descubrimiento de la zona carbonífera del Norte de Córdoba.

Pese a dichos adelantos, a finales del XVIII, las profundidades de los sondeos no habían superado los trescientos metros, salvo en alguno realizado antiguamente en la remota China. Además, señalar que no comentamos, asimismo

por extensión del artículo, las obras hidráulicas de superficie, ya con gran desarrollo.

El siglo XIX se caracteriza por los avances en la Geología, lo que permitiría el conocimiento de la morfología de las cuencas acuíferas (o aguíferas, como se decía entonces). De igual forma, hay que considerar el desarrollo de los sondeos y el conocimiento de las leyes que regulan la circulación de las aguas subterráneas. Como señala LINO PEÑUELAS (1851): "a la geología debe nuestro siglo la gloria de haber arrebatado la sonda de manos del empírico operario de Artois para colocarla en las de hábiles Ingenieros" (21).

Los pozos artesianos están de plena actualidad, es una consecuencia del desarrollo agrícola que demanda la nueva sociedad industrial. La Real Sociedad de Agricultura de Francia había previsto, en 1818, un premio a la obra desarrollada para la producción de pozos profundos y GARNIER, F., 1819, se llevó con su libro el laurel. En 1822, se publica esta obra, el **Traité sur les puits artesiens et sur les differents especes de terrains**. Su éxito fue tal que se sacó una segunda edición, en 1826. GARNIER, acabaría de Ingeniero Jefe del Real Cuerpo de Minas, publicando otra importante obra de Hidrogeología aplicada, **De l'art du Fontanier-Sondeur**.

En 1827, WILLIAM SMITH, realiza el primer reconocimiento geológico para el abastecimiento de aguas a una ciudad, se trata de Scarborough, en Inglaterra. De todas formas hay antecedentes de estudios geológicos en relación con las aguas subterráneas, son los trabajos de ANTONIO VALLISNIERI que, en 1615, realizó cortes geológicos de los pozos surgentes del Norte de Italia.

En 1826, el **Mercurio de España** dedica varios artículos a los **Pozos artesianos ó fuentes de barrena** (22). En 1829, el aragonés CRISTOBAL BORDIU (+1872) fue enviado a Francia e Inglaterra para visitar pozos artesianos y aprender como se hacían. También, debería pedir permiso a GARNIER para editar el tratado de los pozos artesianos en español. En la traducción, BORDIU hizo algunas modificaciones, saliendo a la luz ese mismo año, con el título **Tratado de las fuentes ascendentes o de las varias especies de terrenos en que pueden buscarse las aguas subterráneas**.



Figura 5. De l'origine des fontaines de PIERRE PERRAULT (1674).

nard Palissy lo afirma terminantemente en su obra...; Perrault se hace de él propagandista acérrimo, incurriendo no obstante al explicarlo en errores lamentables; Mariotte y el padre Francisco de Palissy lo exponen con acierto, pero con excesiva falta de detalles; Pluche... en su *Espectáculo de la Naturaleza*, se concreta a una comarca determinada...; por fin Desmarest, en la *Enciclopedia metódica de D'Alambert* (1754) resumió todos estos trabajos é hizo una historia completa de la cuestión" (19).

A finales del siglo XVII, se había inventado la bomba de vapor de SAVERY y, a comienzos del XVIII, se idearía la de NEWCOMEN. La mayor aplicación de estas máquinas inglesas se daría en las minas de cobre de Cornwall; así, entre 1710 y 1714, se instala una en la mina de Wheal Vor, de dicho distrito, bajo este último sistema. En tal contexto, WATT, en 1756, convierte el movimiento circular en rectilíneo, gracias al mecanismo biela-manivela, que aplicaría a su máquina de vapor. Las bombas de WATT empezaron a drenar las minas de Cornwall en 1778. Los estudiantes de la Academia de Minas de Almadén

recibían importantes lecciones de hidráulica; un alumno de la primera promoción, ANDRES MANUEL DEL RIO, a finales del XIX, diseña una potente máquina de columna de agua para drenar las minas de Morán, en México, tal y como se hacía en Sajonia (20). Para HUMBOLDT es la primera de este tipo que se instala en el continente americano. Sin embargo, hasta 1797, no se monta la primera máquina de WATT en España, esto lo hizo JORGE JUAN en el dique de carenar de la dársena de Cartagena. Poco después, se instala una de estas bombas en el pozo de San Teodoro, de Almadén. Otro alumno, de la primera promoción de la Academia de Minas de Almadén, llamado FRANCISCO DE LA GARZA, sustituiría el combustible vegetal, la retama, de la "bomba de fuego", por el carbón de piedra, lo que dio origen al descubrimiento de la zona carbonífera del Norte de Córdoba.

Pese a dichos adelantos, a finales del XVIII, las profundidades de los sondeos no habían superado los trescientos metros, salvo en alguno realizado antiguamente en la remota China. Además, señalar que no comentamos, asimismo

por extensión del artículo, las obras hidráulicas de superficie, ya con gran desarrollo.

El siglo XIX se caracteriza por los avances en la Geología, lo que permitiría el conocimiento de la morfología de las cuencas acuíferas (o aguíferas, como se decía entonces). De igual forma, hay que considerar el desarrollo de los sondeos y el conocimiento de las leyes que regulan la circulación de las aguas subterráneas. Como señala LINO PEÑUELAS (1851): "a la geología debe nuestro siglo la gloria de haber arrebatado la sonda de manos del empírico operario de Artois para colocarla en las de hábiles Ingenieros" (21).

Los pozos artesianos están de plena actualidad, es una consecuencia del desarrollo agrícola que demanda la nueva sociedad industrial. La Real Sociedad de Agricultura de Francia había previsto, en 1818, un premio a la obra desarrollada para la producción de pozos profundos y GARNIER, F., 1819, se llevó con su libro el laurel. En 1822, se publica esta obra, el *Traité sur les puits artesiens et sur les diferents especes de terrains*. Su éxito fue tal que se sacó una segunda edición, en 1826. GARNIER, acabaría de Ingeniero Jefe del Real Cuerpo de Minas, publicando otra importante obra de Hidrogeología aplicada, *De l'art du Fontanier-Sondeur*.

En 1827, WILLIAM SMITH, realiza el primer reconocimiento geológico para el abastecimiento de aguas a una ciudad, se trata de Scarborough, en Inglaterra. De todas formas hay antecedentes de estudios geológicos en relación con las aguas subterráneas, son los trabajos de ANTONIO VALLISNIERI que, en 1615, realizó cortes geológicos de los pozos surgentes del Norte de Italia.

En 1826, el *Mercurio de España* dedica varios artículos a los **Pozos artesianos ò fuentes de barrena** (22). En 1829, el aragonés CRISTOBAL BORDIU (+1872) fue enviado a Francia e Inglaterra para visitar pozos artesianos y aprender como se hacían. También, debería pedir permiso a GARNIER para editar el tratado de los pozos artesianos en español. En la traducción, BORDIU hizo algunas modificaciones, saliendo a la luz ese mismo año, con el título *Tratado de las fuentes ascendentes o de las varias especies de terrenos en que pueden buscarse las aguas subterráneas*.

En la advertencia del traductor, indica que el hecho de conocer como, en 1825, un particular de la zona de Alicante trató de traer a un sondista, desde Inglaterra, le llevó a considerar el tema y adquirir la obra de GARNIER.

Por aquellas fechas, RAFAEL GARRETA inicia una infructuosa tentativa de dotar a Madrid de agua mediante pozos artesianos, perforando en el Campo del Moro e inmediaciones de la Plaza de Toros hasta más de 60 m de profundidad. CRISTOBAL BORDIU pronosticó la falta de éxito en tales operaciones, en artículo inserto en la **Gaceta de Madrid**, de 1 de mayo de 1830, aunque reconoce el interés patriótico del trabajo de GARRETA.

Un alumno de la Academia de Almadén, ISIDRO SAINZ DE BARANDA, que había estado pensionado en la Escuela de Minas de Freiberg, en el curso de 1829, fue comisionado, a su regreso a España, junto a GREGORIO DE BORJAS TARRIUS, para que estudiase las comarcas donde podrían abrirse pozos artesianos, especialmente en Extremadura.

En 1833, JOSE MARIANO VALLEJO (1779-1846), alumno de PROUST y de HERRGEN, escribe los tres tomos del **Tratado sobre el movimiento y aplicación de las aguas; en el cual se manifiesta por métodos sencillos, claros y exactos, cuanto pertenece a su conducción, distribución y elevación, según los diferentes objetos a que se destinen, para satisfacer las necesidades de los pueblos, y las de la Agricultura, Industria y Comercio...** Este autor cuantifica los parámetros del ciclo hidrológico, considerando que en España el 30% del agua de lluvia llega al mar. Asimismo, en el tercer libro, trata de los pozos artesianos, señalando las zonas favorables de España para su perforación.

Poco después, en 1834, desde el **Diario de la Administración** (de 16 de junio) se insta a la construcción de pozos artesianos para cubrir las necesidades de agua de Madrid, pese a los fracasos anteriores. Ese mismo año, se intenta realizar un pozo artesiano en Barcelona que tuvo que interrumpirse ante las dificultades de perforación. Hay un trabajo del eminente geólogo LLOBET sobre este pozo.

A principios de 1835, el Secretario de Estado y Gobernación elevó a S.M. la

Reina Gobernadora una exposición, donde manifestaba: **"...que no se han aprovechado las aguas subterráneas como conviene, que son de gran utilidad en las localidades que no pueden contar con otras, y cuando su alumbramiento y beneficio se proporciona en general a menos costo que el necesario para la dirección y aprovechamiento de las corrientes superficiales"**. Tras este y otros argumentos se proponía el nombramiento de dos brigadas de ingenieros de minas para demarcar en las dos Castillas las zonas favorables para la ejecución de pozos artesianos. Esto fue adelante y por Real Orden, dada en abril y en 21 mayo, comisionan al ingeniero JOAQUIN EZQUERRA DEL BAYO, para realizar el estudio geognóstico de los terrenos de Castilla La Vieja y Extremadura, para ubicar la perforación de pozos artesianos (23). Recordemos que EZQUERRA había trabajado, en 1829 (R.O. de 29 de noviembre), con el Comisario de Caminos y Canales, FRANCISCO XAVIER BARRA, en el proyecto de abastecer agua a Madrid desde el Guadalix y desde el Lozoya.

París se abastecía de pozos particulares de poca profundidad y de agua del Sena que captaban mediante ingenios, tal es el caso de la famosa Bomba Samaritana (1715-1813), construida por ENRIQUE IV. Pero los estudios geológicos del Ingeniero de Minas LEONCE ELIE DE BEAUMONT permitieron el conocimiento de la disposición de las capas del terreno de su subsuelo, además se iban contaminando las aguas del río, apareciendo una epidemia de cólera en 1832. Durante siete años, 1833-1841, el empresario MULOT, estuvo perforando con una sonda (similar a la descrita por DEGOUSEE, en magnífico grabado) en la Grenelle, hasta los 548 m (Fig.-6). GERARDS en el libro **Paris souterrain** escribe: **"El 26 de febrero de 1841, a eso de las dos de la tarde, la sonda por su propio peso, se hundió varios metros en las arenas verdes acuíferas. Brotó una potente columna de agua, impetuosa..."**, 4.000 metros cúbicos en 24 horas (Fig.-7) (24). El pozo había sido contratado por el Ayuntamiento de París, presidido por el astrónomo ARAGO, gran amante de la Geología, recordemos su encargo a TULIA MEULIN para que tradujese los **Principios de Geología** de LYELL. En este sondeo se acumularon las dificultades, el entubado era de cobre y cuando el pozo estaba a punto de terminar-

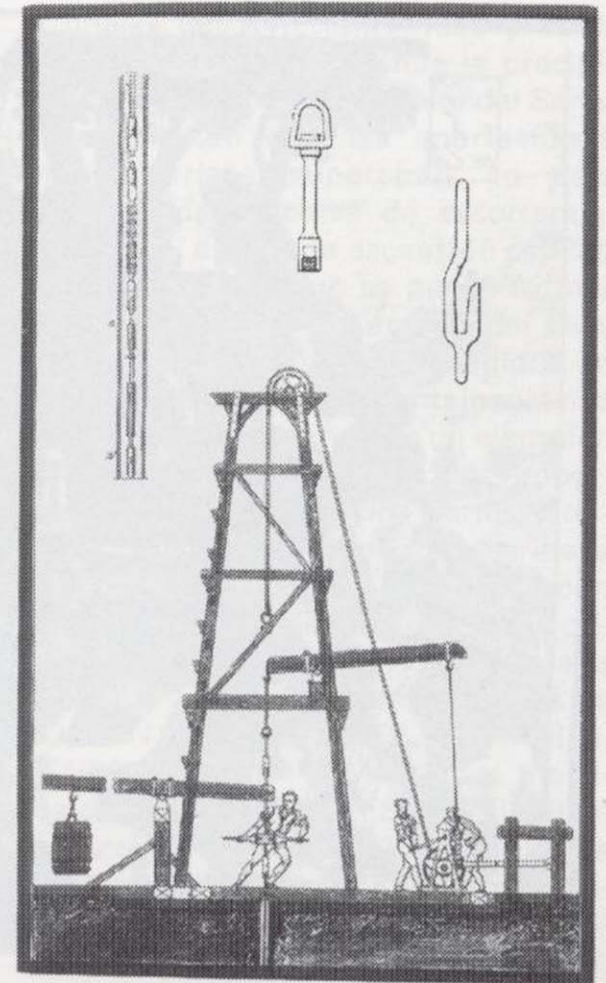


Figura 6. Aparato de sondeo, empleado por Mr. DEGOUSEE a mediados del Siglo XIX.

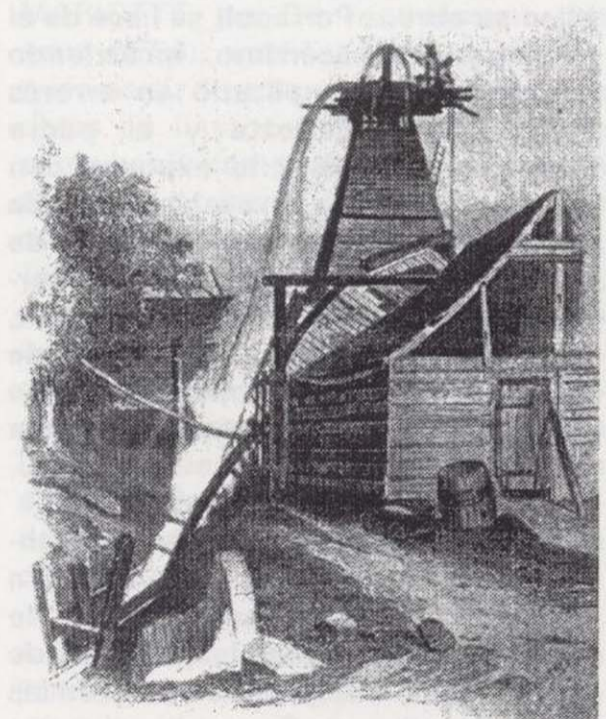


Figura 7. Sondeo de la Grenelle, París (primer pozo artesiano profundo del mundo).

se: **"al bajar la sonda por dentro de estos tubos... se apercibieron que estaban aplastados por efecto de la presión exterior..., y finalmente reventaron"**



En la advertencia del traductor, indica que el hecho de conocer como, en 1825, un particular de la zona de Alicante trató de traer a un sondista, desde Inglaterra, le llevó a considerar el tema y adquirir la obra de GARNIER.

Por aquellas fechas, RAFAEL GARRETA inicia una infructuosa tentativa de dotar a Madrid de agua mediante pozos artesianos, perforando en el Campo del Moro e inmediaciones de la Plaza de Toros hasta más de 60 m de profundidad. CRISTOBAL BORDIU pronosticó la falta de éxito en tales operaciones, en artículo inserto en la *Gaceta de Madrid*, de 1 de mayo de 1830, aunque reconoce el interés patriótico del trabajo de GARRETA.

Un alumno de la Academia de Almadén, ISIDRO SAINZ DE BARANDA, que había estado pensionado en la Escuela de Minas de Freiberg, en el curso de 1829, fue comisionado, a su regreso a España, junto a GREGORIO DE BORJAS TARRIUS, para que estudiase las comarcas donde podrían abrirse pozos artesianos, especialmente en Extremadura.

En 1833, JOSE MARIANO VALLEJO (1779-1846), alumno de PROUST y de HERRGEN, escribe los tres tomos del *Tratado sobre el movimiento y aplicación de las aguas; en el cual se manifiesta por métodos sencillos, claros y exactos, cuanto pertenece a su conducción, distribución y elevación, según los diferentes objetos a que se destinen, para satisfacer las necesidades de los pueblos, y las de la Agricultura, Industria y Comercio...* Este autor cuantifica los parámetros del ciclo hidrológico, considerando que en España el 30% del agua de lluvia llega al mar. Asimismo, en el tercer libro, trata de los pozos artesianos, señalando las zonas favorables de España para su perforación.

Poco después, en 1834, desde el *Diario de la Administración* (de 16 de junio) se insta a la construcción de pozos artesianos para cubrir las necesidades de agua de Madrid, pese a los fracasos anteriores. Ese mismo año, se intenta realizar un pozo artesiano en Barcelona que tuvo que interrumpirse ante las dificultades de perforación. Hay un trabajo del eminente geólogo LLOBET sobre este pozo.

A principios de 1835, el Secretario de Estado y Gobernación elevó a S.M. la

Reina Gobernadora una exposición, donde manifestaba: "...que no se han aprovechado las aguas subterráneas como conviene, que son de gran utilidad en las localidades que no pueden contar con otras, y cuando su alumbramiento y beneficio se proporciona en general a menos costo que el necesario para la dirección y aprovechamiento de las corrientes superficiales". Tras este y otros argumentos se proponía el nombramiento de dos brigadas de ingenieros de minas para demarcar en las dos Castillas las zonas favorables para la ejecución de pozos artesianos. Esto fue adelante y por Real Orden, dada en abril y en 21 mayo, comisionan al ingeniero JOAQUIN EZQUERRA DEL BAYO, para realizar el estudio geognóstico de los terrenos de Castilla La Vieja y Extremadura, para ubicar la perforación de pozos artesianos (23). Recordemos que EZQUERRA había trabajado, en 1829 (R.O. de 29 de noviembre), con el Comisario de Caminos y Canales, FRANCISCO XAVIER BARRA, en el proyecto de abastecer agua a Madrid desde el Guadalix y desde el Lozoya.

París se abastecía de pozos particulares de poca profundidad y de agua del Sena que captaban mediante ingenios, tal es el caso de la famosa Bomba Samaritana (1715-1813), construida por ENRIQUE IV. Pero los estudios geológicos del Ingeniero de Minas LEONCE ELIE DE BEAUMONT permitieron el conocimiento de la disposición de las capas del terreno de su subsuelo, además se iban contaminando las aguas del río, apareciendo una epidemia de cólera en 1832. Durante siete años, 1833-1841, el empresario MULOT, estuvo perforando con una sonda (similar a la descrita por DEGOUSEE, en magnífico grabado) en la Grenelle, hasta los 548 m (Fig.-6). GERARDS en el libro *Paris souterrain* escribe: "El 26 de febrero de 1841, a eso de las dos de la tarde, la sonda por su propio peso, se hundió varios metros en las arenas verdes acuíferas. Brotó una potente columna de agua, impetuosa...", 4.000 metros cúbicos en 24 horas (Fig.-7) (24). El pozo había sido contratado por el Ayuntamiento de París, presidido por el astrónomo ARAGO, gran amante de la Geología, recordemos su encargo a TULIA MEULIN para que tradujese los *Principios de Geología* de LYELL. En este sondeo se acumularon las dificultades, el entubado era de cobre y cuando el pozo estaba a punto de terminar-

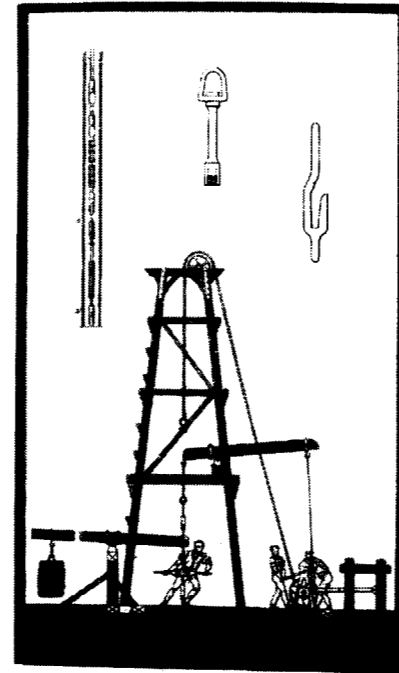


Figura 6. Aparato de sondeo, empleado por Mr. DEGOUSEE a mediados del Siglo XIX.



Figura 7. Sondeo de la Grenelle, París (primer pozo artesiano profundo del mundo).

se: "al bajar la sonda por dentro de estos tubos... se apercibieron que estaban aplastados por efecto de la presión exterior... y finalmente reventaron"

(25). La comisión formada por ARAGO, BROGNIART, ELIE DE BEAUMONT y el general PONCELET Y MARY, tuvo que estudiar el tema optando por que estos tubos fuesen sustituidos por otros contruidos con chapa de hierro galvanizado. Este material tendría más resistencia que el cobre, costaría menos y sería menos contaminante. A partir de aquí, no sólo se desarrollarían las técnicas de sondeo, sino también las de fabricación de tuberías, tanto en el caso de protección de los sondeos como en el de distribución de los caudales captados.

#### *Estado de la Hidrogeología tras la construcción del pozo de la Grenelle.*

Al poco de construirse el pozo de la Grenelle se realizaron nuevas captaciones. Entre 1841 y 1843, se hicieron los pozos de Hamburgo, en Alemania. En 1844, se taladra con sonda en los jardines del palacio del rey de Nápoles, atravesando más de cien metros de tobas volcánicas. En 1846, se hace otro pozo en Venecia, pretendiendo llegar hasta terrenos del Terciario Superior a 300 m de profundidad. Europa, en general, y Francia, en particular, se fueron llenando de pozos artesianos profundos.

Los primeros tratados de Geología hispanos, dedican capítulos o partes de ellos a los pozos artesianos. En las *Lecciones de Geología* (1841) del general D. FRANCISCO DE LUXAN, que en 1850 presidiría la Comisión del Mapa Geológico, se dice que: "Si suponemos que un terreno formado por capas y en un valle o cuenca de modo que se prolonguen hasta las cimas de las alturas que lo limiten, y que estas capas son permeables, de arenisca, cal, cascajo, y otras impermeables de arcilla, y abrimos en la parte superior de las alturas un pozo, es evidente que este recogerá únicamente el agua que caiga en aquel local; pero si el taladro o pozo se hace en el punto mas bajo del valle, o en cualquiera de sus pendientes, el agua filtrada de las alturas que se acumulará en las capas permeables, saltará y subirá en el pozo hasta equilibrarse con el peso de la columna de los dos flancos por la ley de los tubos comunicantes". Asimismo, el médico JULIAN LOPEZ DE NOVELLA, en el *Curso completo de Geología para el uso de los jóvenes que se dedican al estudio de la Naturaleza* (1848), consigna un aparta-

do, del capítulo XIX, a los pozos artesianos. En Europa, asimismo, empezaron a publicarse numerosas obras hidrogeológicas, tal es el caso del *Etude hydrologique de la partie supérieure du bassin de la Seine* (1846), de BELGRAND, la *Guide du sondeur* (1847), de DEGOUSEE o *L'art de découvrir les sources* (1856), del abad PARAMELLE. Según este autor: "Un pozo artesiano que dé una gran cantidad de agua brotante y de buena calidad es lo más selecto que se puede desear tratándose de fuentes; cuando surte de agua a una población, su valor es inestimable" (26). Se ve pues el interés que despertaban estos pozos.

La traída de aguas a París no sólo se citó en la literatura científica sino que fue decisiva para el desarrollo de las captaciones de aguas ascendentes. Según LUCAS FERNANDEZ NAVARRO (1909) y otros autores, en 1847, había varios pozos surgentes en Villabertrán, cerca de Figueras, en la comarca del Ampurdán, Gerona, de 120 a 140 m de profundidad (27), aunque en realidad se quedaron cerca de los 100 metros. Estos sondeos, practicados por el cerrajero francés CLAUDIO SALAJICH, serían los primeros pozos artesianos medianamente profundos contruidos en España con éxito.

En 1849, La Dirección General de Industria y Comercio encarga al ingeniero de minas FELIPE NARANJO que hiciese un reconocimiento geológico de la cuenca del Guadiana. Esto queda recogido en el primer número de *Revista Minera* (1850): "Habiéndoseme encargado... el examen geológico del terreno que baña el Guadiana, para averiguar entre otras cosas, si en algún punto de aquel, podrían intentarse con buen éxito la perforación de pozos artesianos". Después de señalar como zonas favorables el Campo de Montiel y el Terciario lacustre del entorno de Ciudad Real, sobre todo en la zona de Piedrabuena, propone, entre otras cosas, que: "podrían establecerse pozos absorbentes para la desecación de pantanos, que hacen insalubres a varios pueblos, como el de Miguelturra y otros de la provincia" (28). Ese mismo año, por R.O. de 11 de julio, se crea la Comisión del Mapa Geológico Provincial de Madrid y General del Reino, señalándose en los razonamientos para su creación que: "...en los países donde escasean las aguas pueden abrirse pozos artesianos con probabili-

dad de buen éxito, dirigiéndose en esta fácil operación por las indicaciones de la ciencia, en vez de hacerlo a la ventura, malgastando acaso la fortuna pública o privada".

En 1850, CRISTOBAL BORDIU publica un artículo en la naciente *Revista Mensual de Agricultura* (Tomo 1, pág. 221) *Observaciones sobre la posibilidad de obtener aguas ascendentes en la provincia de Toledo*. Y, ese mismo año, el médico PEDRO MARIA RUBIO, escribe *Clasificación de las aguas minerales de España por razón de su temperatura*. Tres años más tarde, este último autor, publica el *Tratado completo de las fuentes minerales de España*, donde se dan datos de 724 manantiales. Recordemos que, desde el siglo XVI, los médicos tenían jurisdicción sobre los manantiales de aguas potables. En 1816, se convocaron oposiciones a Médicos Directores de Baños, creándose por fin Cuerpo Facultativo, en 1836. Por eso, no es de extrañar la frecuente aparición de médicos en la literatura sobre las aguas e incluso en tratados geológicos. La complejidad en su captación y distribución hizo que, en el XIX, se asignasen las aguas superficiales al Cuerpo de Caminos y las subterráneas al de Minas.

En 1851, LINO PEÑUELAS, en el tomo II de *Revista Minera*, en un artículo titulado *Sobre los pozos artesianos de la provincia de Murcia*, señala que Mr. CRAVES estaba realizando dos pozos de estas características en Lorca, empleando el método alemán. Poco tiempo atrás, CRAVES había conseguido abastecer de agua a Málaga con un pozo artesiano. Asimismo considera, a propósito para investigaciones con la sonda, dos grandes cuencas, una ocupada en gran parte de las huertas de Murcia y Orihuela, otra la del Campo de Cartagena, estudiada por los ingenieros MONASTERIO y COLLETTE (29). De igual forma, ese mismo año, el médico JOSE DE ECHEGARAY Y LA COSTA (1805-1869) escribe la *Memoria sobre las causas de la sequía de las provincias de Almería y Murcia, y de los medios de atenuar sus efectos*; esta obra fue premiada por la Real Academia de Ciencias. El autor señala que unos de los grandes recursos de la provincia de Murcia serán los pozos artesianos: "Después de los conocimientos geológicos que se necesitan para la perforación...una gran dificul-

tad encuentro yo para que pongan en planta estos medios de riego, y es que a expensas del propietario jamás se podrán hacer, por el gran coste y la incertidumbre en el éxito...pero dése la iniciativa por el Gobierno ó por una compañía y si los resultados son felices, bien pronto se poblarán de pozos artesianos...porque son de una aplicación mas general que el canal de Huescar y no de tanto precio" (30). Tendrían que pasar veinte años para que tomasen en Murcia estas medidas.

En ese mismo año, un autor sin relación con la Geología como es JUSTINO RICO Y SINOBAS, en la **Memoria sobre las inundaciones de las provincias de Levante**, lanza la idea de la construcción de pantanos o depósitos subterráneos, donde se evitan las pérdidas por evaporación y se frenan las avenidas. En esta obra también pide al Gobierno algún pozo artesiano.

Entre 1851 y 1854, se perforó en Cádiz, buscando aguas artesianas, sin éxito. Se aprecia un resultado negativo en muchos de estos primeros y costosos intentos. Esto tal vez se deba a que en los libros científicos se asimilaban los valles a sinclinales cuando son frecuentes los relieves invertidos. Había pocos datos geológicos, pero un país seco urgía de caudales hídricos para regar los campos o abastecer a las ciudades.

Por aquellos tiempos, CASIANO DE PRADO era el Presidente de la Sección de Geología de la Comisión del Mapa Geológico y fue designado por el Ministro BRAVO MURILLO para que estudiara la ubicación del embalse del Pontón de la Oliva, obra de los ingenieros RAFO y RIBERA. La contestación de PRADO, en 1852, fue la no recomendación del lugar para una presa, por las posibles fugas de agua hacia el acuífero del subsuelo: **"El Lozoya en la faja también cretácea del Pontón de la Oliva, puede perderla y la pierde, según he visto"** (31).

No sólo Madrid, sino buena parte del resto de las ciudades españolas se plantearon el abastecimiento de aguas, como parte de su desarrollo. En 1852 NICOLAS GROUSELLE, constructor mecánico, con taller en la calle San Vicente, de Madrid, presenta al Ayuntamiento de Toledo un plan para subir agua desde el Tajo hasta el Alcázar, aprovechando los restos del artificio de Juanelo. GROUSELLE estimaba bombear 75.000 metros cúbicos

diarios. Este técnico, era el inventor de una noria con cadena, construida, en parte, de hierro forjado y fundido, lo que la convertía en mucho más sólida que las históricas ruedas de madera que tanto abundaban en la Península (32). Los intentos de dotar de caudales hídricos a Toledo prosiguieron, así, en 1859, el ingeniero LUIS DE LA ESCOSURA, que fue Director de la Escuela de Minas de Madrid, ofrece sus servicios al Ayuntamiento, el cual le encargó el proyecto en 1861. El autor pensaba dotar a la ciudad con 8 litros por habitante y día, ya que Madrid recibía, por el Canal de Isabel II, la cantidad de 9 litros, mucho menos que París y Londres cuyos consumos se situaban entre 75 y 300; según ESCOSURA: **"para cubrir las necesidades de un pueblo que no tiene los hábitos de otros países"** (33).

El segundo sondeo importante de París se hizo entre 1855 y 1857, se trata del de Passy, y como vemos fue mucho más rápido que el de la Grenelle. Inicialmente se empleaba el sistema llamado chino, donde el trépano quedaba sostenido por una cuerda, siendo movido por el balancín accionado manualmente. Este método dio paso al **sistema alemán** (también llamado inglés), donde la cuerda se sustituyó por varillas rígidas de hierro. En Passy, el ingeniero sondista, KIND, empleó una variante de este método, trabajando con máquina de vapor y elemento perforante unido a elásticos vástagos de abeto. Es posible ver un dibujo de esta máquina en **Le Monde Illustré**, 2, de abril de 1857 (Fig.-8). Luego vinieron

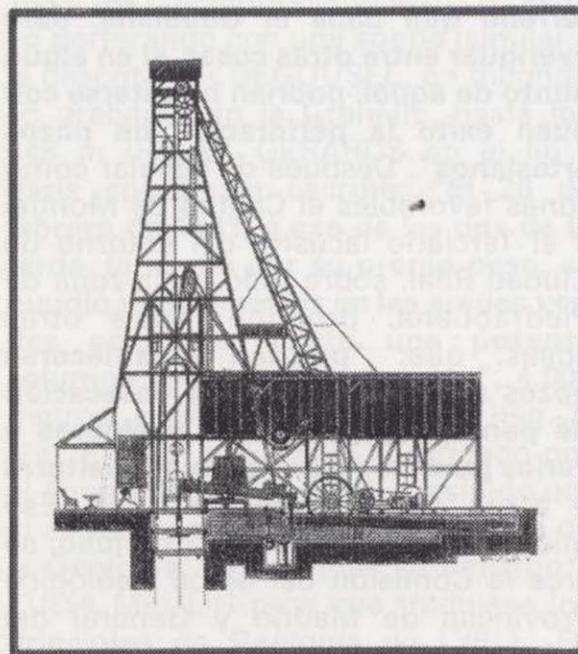


Figura 8. Máquina de sondeo empleada por KIND en Passy (1855-1857).

otros pozos como el del Boulevard de la Gare (1869), encargado a SAINT JUST DRU, para cubrir las necesidades de la refinería del Sr. SAY, La Chapelle (1887), Butte-aux-Cailles (1898) y otros. Los métodos de perforación también mejoraron; a mediados del XIX, KIND introduce el torno de vapor (1840) y el trépano de caída libre (en 1846, aunque en realidad el sistema de corredera lo inventa, en 1834, el ingeniero prusiano OYNHAUSEN); por la misma época que OYNHAUSEN puso en marcha su equipo, FAUVELLE idea el empleo de varillas huecas, extrayendo los detritus del fondo, mediante bombeo, con brillante éxito, según informaría ARAGO a la Academia de Ciencias de París; de igual forma, en los años setenta, ALFONSO RICHARD patenta un trépano de rotación automática y caída libre; y, en 1887, el relojero suizo LESCHOT inventa la sonda de diamante, que se propaga y perfecciona en Estados Unidos, a finales del XIX; estamos ante un método de perforación a rotación, es la base del **rotary** (Fig.-9), que permitiría trabajar con rapidez en terrenos duros.

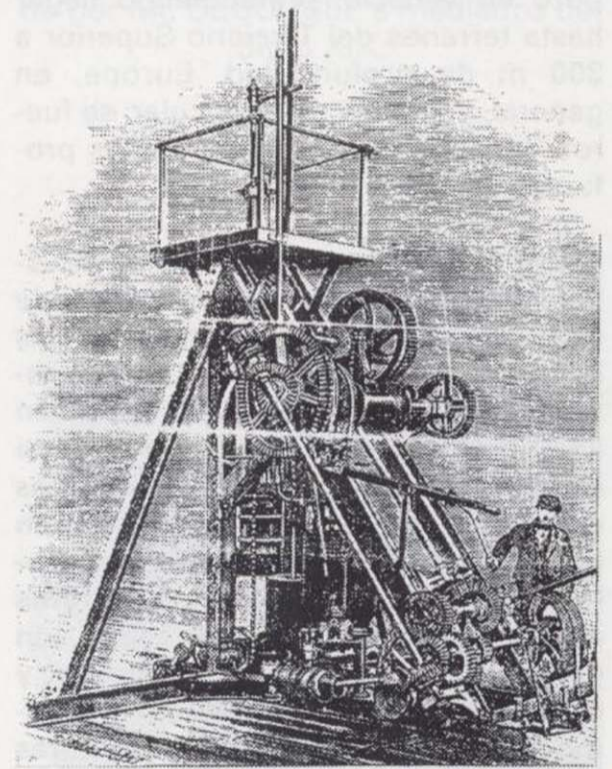


Figura 9. Sonda de diamante (finales del XIX).

En España se sigue, en general, empleando una tecnología obsoleta y a veces sin considerar la Geología. Así, en 1856, el Sr. MATHEU realiza un sondeo de 195 m, cerca de la calle Espoz y Mina, sin llegar a lograr encontrar agua. Pero, enseguida vinieron los empresarios e ingenieros franceses a captar caudales en la seca Península. En 1859, CHARLES LAURENT publica

**tad encuentro yo para que pongan en planta estos medios de riego, y es que a expensas del propietario jamás se podrán hacer, por el gran coste y la incertidumbre en el éxito...pero dése la iniciativa por el Gobierno ó por una compañía y si los resultados son felices, bien pronto se poblarán de pozos artesianos...porque son de una aplicación mas general que el canal de Huescar y no de tanto precio" (30).** Tendrían que pasar veinte años para que tomasen en Murcia estas medidas.

En ese mismo año, un autor sin relación con la Geología como es JUSTINO RICO Y SINOBAS, en la **Memoria sobre las inundaciones de las provincias de Levante**, lanza la idea de la construcción de pantanos o depósitos subterráneos, donde se evitan las pérdidas por evaporación y se frenan las avenidas. En esta obra también pide al Gobierno algún pozo artesiano.

Entre 1851 y 1854, se perforó en Cádiz, buscando aguas artesianas, sin éxito. Se aprecia un resultado negativo en muchos de estos primeros y costosos intentos. Esto tal vez se deba a que en los libros científicos se asimilaban los valles a sinclinales cuando son frecuentes los relieves invertidos. Había pocos datos geológicos, pero un país seco urgía de caudales hídricos para regar los campos o abastecer a las ciudades.

Por aquellos tiempos, CASIANO DE PRADO era el Presidente de la Sección de Geología de la Comisión del Mapa Geológico y fue designado por el Ministro BRAVO MURILLO para que estudiara la ubicación del embalse del Pontón de la Oliva, obra de los ingenieros RAFO Y RIBERA. La contestación de PRADO, en 1852, fue la no recomendación del lugar para una presa, por las posibles fugas de agua hacia el acuífero del subsuelo: **"El Lozoya en la faja también cretácea del Pontón de la Oliva, puede perderla y la pierde, según he visto" (31).**

No sólo Madrid, sino buena parte del resto de las ciudades españolas se plantearon el abastecimiento de aguas, como parte de su desarrollo. En 1852 NICOLAS GROUSELLE, constructor mecánico, con taller en la calle San Vicente, de Madrid, presenta al Ayuntamiento de Toledo un plan para subir agua desde el Tajo hasta el Alcázar, aprovechando los restos del artificio de Juanelo. GROUSELLE estimaba bombear 75.000 metros cúbicos

diarios. Este técnico, era el inventor de una noria con cadena, construida, en parte, de hierro forjado y fundido, lo que la convertía en mucho más sólida que las históricas ruedas de madera que tanto abundaban en la Península (32). Los intentos de dotar de caudales hídricos a Toledo prosiguieron, así, en 1859, el ingeniero LUIS DE LA ESCOSURA, que fue Director de la Escuela de Minas de Madrid, ofrece sus servicios al Ayuntamiento, el cual le encargó el proyecto en 1861. El autor pensaba dotar a la ciudad con 8 litros por habitante y día, ya que Madrid recibía, por el Canal de Isabel II, la cantidad de 9 litros, mucho menos que París y Londres cuyos consumos se situaban entre 75 y 300; según ESCOSURA: **"para cubrir las necesidades de un pueblo que no tiene los hábitos de otros países" (33).**

El segundo sondeo importante de París se hizo entre 1855 y 1857, se trata del de Passy, y como vemos fue mucho más rápido que el de la Grenelle. Inicialmente se empleaba el sistema llamado chino, donde el trépano quedaba sostenido por una cuerda, siendo movido por el balancín accionado manualmente. Este método dio paso al **sistema alemán** (también llamado inglés), donde la cuerda se sustituyó por varillas rígidas de hierro. En Passy, el ingeniero sondista, KIND, empleó una variante de este método, trabajando con máquina de vapor y elemento perforante unido a elásticos vástagos de abeto. Es posible ver un dibujo de esta máquina en **Le Monde Illustré**, 2, de abril de 1857 (Fig.-8). Luego vinieron

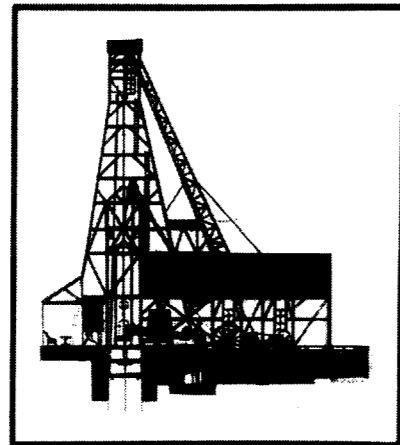


Figura 8. Máquina de sondeo empleada por KIND en Passy (1855-1857).

otros pozos como el del Boulevard de la Gare (1869), encargado a SAINT JUST DRU, para cubrir las necesidades de la refinería del Sr. SAY, La Chapelle (1887), Butte-aux-Cailles (1898) y otros. Los métodos de perforación también mejoraron; a mediados del XIX, KIND introduce el torno de vapor (1840) y el trépano de caída libre (en 1846, aunque en realidad el sistema de corredera lo inventa, en 1834, el ingeniero prusiano OYNHAUSEN); por la misma época que OYNHAUSEN puso en marcha su equipo, FAUVELLE idea el empleo de varillas huecas, extrayendo los detritus del fondo, mediante bombeo, con brillante éxito, según informaría ARAGO a la Academia de Ciencias de París; de igual forma, en los años setenta, ALFONSO RICHARD patenta un trépano de rotación automática y caída libre; y, en 1887, el relojero suizo LESCHOT inventa la sonda de diamante, que se propaga y perfecciona en Estados Unidos, a finales del XIX; estamos ante un método de perforación a rotación, es la base del **rotary** (Fig.-9), que permitiría trabajar con rapidez en terrenos duros.

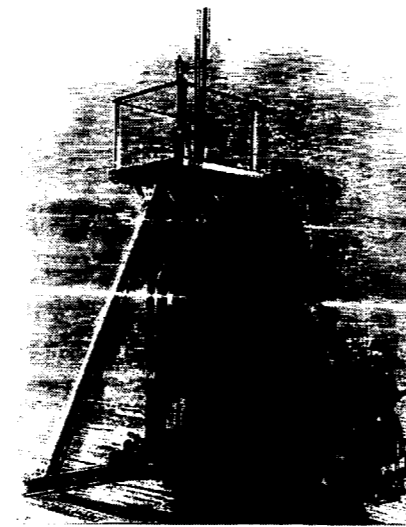


Figura 9. Sonda de diamante (finales del XIX).

En España se sigue, en general, empleando una tecnología obsoleta y a veces sin considerar la Geología. Así, en 1856, el Sr. MATHEU realiza un sondeo de 195 m, cerca de la calle Espoz y Mina, sin llegar a lograr encontrar agua. Pero, enseguida vinieron los empresarios e ingenieros franceses a captar caudales en la seca Península. En 1859, CHARLES LAURENT publica

en el **Bulletin de la S.G.F.**, 16, 548, un artículo sobre el sondeo de Albacete. La Compañía de ferrocarriles del Mediodía encontraría una capa con agua ascendente a 53 m y otra a 86. Más tarde la misma Compañía tuvo menos suerte en la estación de Alicante, donde tuvo que abandonar un sondeo a 140 m. Ese mismo año, en Málaga se perfora un pozo absorbente para evacuar unas aguas estancadas, encontrándose una capa artesiana a los 44 m.

Por aquellas fechas, en Albacete también se hizo otro pozo, a ocho kilómetros de la capital, en la finca del MARQUES DE SALAMANCA ubicada en Los Llanos. Parece ser que no hubo estudio geológico y se llegó a los 187 m., atravesando varias capas acuíferas con aguas ascendentes, aunque ninguna llevó el agua hasta la superficie.

#### **Descubrimiento de las primeras leyes hidrogeológicas.**

En 1856, HENRY DARCY (1803-1858) publica **Les fontaines publiques de la ville de Dijón**. Estudiando el abastecimiento urbano de esta población, según indican DAVIS, S. y DE WIEST, R. (1966): **"Fue la primera persona que estableció la ley matemática que gobierna el flujo del agua subterránea"** (conocida por Ley de Darcy,  $v=ki$ ,  $v=$  velocidad,  $i=$  gradiente hidráulico y  $k=$  permeabilidad) (34).

Los ferrocarriles, estimulados a menudo por la actividad minera, estaban transformando el sistema de comunicaciones de la Península. Necesitaban bastante agua y activaron el desarrollo de los sondeos. Al igual que habían hecho en Albacete, Alicante y otros lugares, en 1859, la Compañía del ferrocarril realiza un sondeo en Alcázar de San Juan, de 105 m, sin encontrar aguas ascendentes.

El médico JUAN VILANOVA I PIERA, primer Catedrático de Geología de la Universidad Central, presenta en 1860, a un concurso de la Real Academia de Ciencias de Madrid, la obra titulada **Manual de geología aplicada a la agricultura y a las artes industriales**, con la que gana el primer premio, siendo publicada en 1861. VILANOVA emplea el término Hidrografía Subterránea, ya que el de Hidrogeología aun no se usaba. Este autor no sólo conoce la obra de PARAMELLE, sino otras de

escritores franceses, tales como las de DUMAS, BELGRAND o DEGOURSEE, que suponemos habría descubierto en su época de alumno pensionado en París. Expone con claridad el ciclo hidrológico y señala que las aguas subterráneas se encuentran en terrenos permeables, confinados por otros impermeables (de todas formas, en el corte geológico que muestra la obra, el acuífero más parece un imaginario río subterráneo que un manto saturado). Divide a los pozos en artesianos e inversos o absorbentes. Y también señalar, que habla del gradiente geotérmico, con otras palabras, para justificar la surgencia de aguas calientes en algunos pozos artesianos. Anteriormente este autor había escrito la **Memoria geognóstica-agrícola de la provincia de Castellón** (1858), donde se dedica un capítulo al tema **Fuentes y pozos artesianos**, donde se inventarían 93 manantiales de la provincia.

En 1861, el Ministerio de Fomento pasó una Circular a los Ingenieros de Minas, Jefes de Distrito, para que informasen sobre las posibilidades de encontrar aguas artesianas en sus circunscripciones. La recopilación de datos duró al menos hasta 1863.

En 1862, la entrada al pozo artesiano de Passy fue cerrada al público. Habían añadido un tubo de 20 m al antiguo encubado de madera, que no se levantaba del suelo más de 1 m., y el caudal pasó de 17.000 metros cúbicos diarios a 3.000. Este incidente se complicó con movimientos de las arenas verdes en la base del pozo, con lo que hubo que quitar el tubo y dar algunos golpes con el trépano para limpiar el agujero, recuperándose los caudales.

Siete años después de aparecer la ley de Darcy, DUPUIT descubre una fórmula para el estudio de la circulación del agua hacia el interior de los pozos, según publica en **Etudes théoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux découverts et a travers les terrains perméables** (1863). Algo después, en 1870, el alemán ADOLF THIEM modificó la fórmula de DUPUIT, realizando el bombeo en un pozo y observando los efectos generados en los pozos vecinos.

En 1864, CASIANO DE PRADO publica la **Descripción Física y Geológica de la Provincia de Madrid**, donde observamos que existe un capítulo dedicado a

las aguas artesianas, donde señala: **"Que bueno fuera lograr con la sonda un chorro de agua, aunque no fuese tan fuerte como el de Passy o el de Grenelle en París, a 2 o 4 kilómetros al N. de Madrid"** (35). El autor indica además que la complicada constitución geológica de la Península no favorece la construcción de pozos artesianos.

En el transcurso del año de 1865, en Henarejos, Cuenca, CHARLES LAURENT (según indica DELESSE, en **Révue de Géologie**, 3, 56) hizo un sondeo minero para investigar las capas de carbón subyacentes, encontrándose de forma casual, en un acuífero de areniscas, aguas ascendentes a 140 m de profundidad.

Ese mismo año, con fecha 15 de febrero, se forma en Madrid, por Orden Ministerial, una Comisión Permanente de Ingenieros de Minas, para la formación de mapas geológicos provinciales. Estas cartografías debían hacerse con: **"inmediata aplicación a la agricultura, a la minería, a la industria, a las construcciones y a la investigación de aguas artesianas y minerales"**. Tal vez, el fruto de esta filosofía aparezca en el trabajo de FEDERICO BOTELLA Y HORRONS, en concreto en la **Descripción geológica de las provincias de Murcia y Albacete** (1868). En esta obra, con concienzudos estudios geológicos, puso en evidencia la posibilidad de realizar pozos artesianos en las cercanías de Murcia. La sequía ayudó a que se escuchasen los consejos del ingeniero de minas y, en 1870, el catalán JOSE ROCA, presidente de la Sección de Agricultura de la Sociedad Económica de Amigos del País, perforó un pozo de 29 m., 7 km al E. de la capital, obteniendo caudales ascendentes. Poco después ROCA perforó otro, de 30 m, junto al viejo camino de Murcia a Orihuela, con una **barrena en espiral**, procedente del arsenal de Cartagena. Este éxito hizo que apareciesen enseguida numerosos pequeños pozos: el de BURGUEROLA, 8 km. al N. de la capital, el de la alquería de ALEJO MOLINA, el de la plaza de la Catedral, que superó los 50 m y otros. El ejemplo de Murcia estimuló la construcción de pozos en todo Levante. De esta forma, el día 1º de octubre, de 1876, el Sr. NOLLA, dueño de una fábrica de mosaicos, en Valencia, y para dotar del caudal necesario a la misma, realiza un sondeo de casi 50 m, con éxito, obteniendo 190 litros por minuto. Poco des-

pués, en 1877, se haría otro pozo en esta provincia, esto ocurre junto al Puig, al Sur de Sagunto, en la finca de los Sres. MIRANDA.

El 31 de mayo de 1866 se inicia en el Asilo de Locos de Saint Louis, en EEUU, el pozo artesiano más hondo del mundo, según señala el **American Artisan**. El 9 de agosto de 1869 se llega a los 960 m de profundidad, sin encontrar la capa acuífera.

En 1869, el Profesor de la Escuela de Caminos, ROGELIO INCHAURRANDIETA Y PAEZ, escribe **Aplicaciones de la Geología a la práctica del ingeniero**. Dedicar parte del libro a la Hidrografía Subterránea, haciendo diversas consideraciones sobre la investigación de las aguas subterráneas, dando numerosos ejemplos de pozos artesianos en España, París y el Sáhara. Parece ser que a instancias de INCHAURRANDIETA el municipio de Cartagena, donde escaseaba el agua potable y abundaban los aljibes, se decide a costear los gastos de un pozo artesiano, que se abriría en la plaza del Rey. El sondeo dirigido por BALDASANO daría caudales ascendentes, pero salobres, a los 30 m de profundidad. El ingeniero de caminos, señala una contaminación del agua ascensional con las marinas que comunican con las capas superiores, indicando la necesidad de hacer pozos más profundos, entubando. Tras este éxito relativo, el Sr. SPOTORNO encomienda a BARTOLOME CARCELES la ejecución de un sondeo en este municipio, llegándose a 142 m sin encontrar aguas ascendentes. De este último pozo se conservaría la columna litológica completa, cosa poco frecuente en aquella época.

El Ministerio de Fomento, por Real Decreto, de 28 de abril de 1870, crea una Comisión de Ingenieros de Minas para la formación del **Mapa Geológico de España**. Esta normativa sería comentada, en artículo firmado por S. (SALAZAR ?), en **Revista Minera**, XXI (1879). El autor señala que: **"Deseamos ver ligado este trabajo con el hidrológico que se está practicando desde hace algunos años con inexplicable abstención del estudio de los terrenos en que tienen lugar los alumbramientos"** (36). Esta Comisión se reestructura, en 1873, y en Instrucción dada para mejorar el orden de los trabajos, se dispone se dedique atención al: **"estudio de los manantiales de aguas potables y mine-**

**rales, y descripción de las cuencas hidro-geológicas para la perforación de pozos artesianos..."**. Llama la atención el empleo del término hidro-geológico, el cual tardaría aun muchos años en imponerse en España.

En abril de 1871, JUAN VILANOVA imparte una serie de conferencias sobre los pozos artesianos, en la Sociedad de Amigos del País de Valencia, que fueron recogidas, en parte, por el periódico **Las Provincias**, donde se cuenta la experiencia murciana. Las ideas vertidas por HERICART DE THURY, en **Considerations sur les puits forés** (1829), cuando señala que la supresión de los bosques evita la infiltración y hace extinguir no pocos manantiales, tal vez influyen en VILANOVA en sus soluciones para Murcia: **"un repueble inteligente de los montes, no varíe en lo porvenir las condiciones climatológicas de este país, recoger desde luego sin pérdida alguna, las aguas que bajan por los ríos, ramblas y manantiales y fomentar a la vez perforación de pozos artesianos"** (37). En 1876, en **La Creación**, en concreto en el Tomo VIII, **Tratado de Geología**, nos vuelve a hablar de la Hidrografía Subterránea, instando a la construcción de pozos artesianos. Algo más tarde, en septiembre de 1877, JUAN VILANOVA se decide a perforar, con un trépano de caída libre de la casa LIPMANN, un sondeo en la patria de su ancestro, Alcalá de Chisvert, Castellón de la Plana (38). Según RICHARD (1880) tuvo que abandonarlo por el lento procedimiento que empleaba (39). En cambio, esta noticia es contradicha por otra de **Revista Minera**, donde leemos textualmente: **"Según dice El Imparcial se ha inaugurado en Alcalá de Chisvert el pozo artesiano abierto a expensas del geólogo Don Juan Vilanova"** (40). Poco después, VILANOVA es contratado para dirigir varios pozos artesianos en dicha provincia. En 1880, el propio VILANOVA confirma la parada del sondeo de Alcalá: **"pero habiendo alcanzado 132 m y mediando circunstancias particulares, que no hay porque relatar, se suspendió la obra, aunque estoy resuelto a llevarla a cabo en el momento en que brote el agua en pozo Nuño de Alcoy** (dirigido por el ingeniero industrial VILLAPLANA), **cuya Sociedad Neptuno, de la que formo parte, se sirve hoy del aparato..."** (41), el cual, parece ser, ya no se reanudaría nunca por falta de recursos del propietario.

En 1875, DANIEL CORTAZAR, en la

**Descripción física y geológica de la provincia de Cuenca**, como es frecuente ver en las Memorias de la Comisión del Mapa Geológico, dedica un capítulo a las aguas subterráneas y otro a las artesianas. Señala como único pozo de aguas ascendentes, en la provincia, el de Henarejos, del que da la columna estratigráfica del sondeo. Asimismo se atreve a sugerir la existencia de zonas favorables para la perforación de pozos artesianos: Campichuelo de Ribatejada, cercanías de Belmonte, San Clemente, al O. de Motilla del Palancar, en Los Hinojosos, cerca de Mota del Cuervo y en otros lugares. Los sondeos debían ser profundos, atravesando el Terciario, hasta llegar a las areniscas del Cretáceo.

También hacia 1875, en tiempo de guerras carlistas, LUCAS MALLADA, que prestaba sus servicios como ingeniero en la Comisión del Mapa Geológico, fue enviado en una expedición al Norte, con objeto de estudiar el terreno para la investigación de aguas subterráneas, según recogemos del Tomo XXVI de **Revista Minera**.

Ese mismo año, LUIS DE LA ESCOSURA realiza un **Informe sobre las obras ejecutadas por la Compañía Concesionaria del Abastecimiento de Aguas Potables a Cádiz**. ESCOSURA propuso una captación mediante mina situada en el Valle de la Piedad, en zona próxima a donde se tomaba el agua para El Puerto de Santa María, pero hubo que modificar algo la propuesta inicial, por dificultades y dilaciones habidas con la expropiación de los terrenos. El autor supone una traída de 38 litros por habitante y día, para una población de 60000 personas. En la provincia sigue el interés por la captación de aguas y, así, al año siguiente, en terminología de la época, se perforó un taladro en San Fernando, con éxito negativo.

En 1876, el ingeniero de minas DANIEL CORTAZAR, en **Anales de la Industria y de la Construcción**, 4 y 5, publica un artículo titulado **Pozos artesianos para la industria**. En la misma época FELIPE SOLIS estudia la geología de la Tierra de Barros, para conocer la probabilidad de encontrar aguas y calcular el coste de los alumbramientos con pozos artesianos. Asimismo, en el **Boletín de la Comisión del Mapa Geológico**, III, MADRID DAVILA da noticia del pozo artesiano abierto en la plaza Vitoria de

Málaga, de 125 m de profundidad sin resultados positivos.

Entre 1876 y 1877, el médico J. GARCÉS estudia las variaciones de caudal y temperaturas, en relación con la climatología, del manantial de Cella, en la provincia de Teruel, que había sido abierto en 1729, 100 m al Norte del pueblo. Observa que el agua deja de brotar tras largas sequías y entra en funcionamiento a los 50 o 60 días de llover con abundancia en los alrededores (42). En definitiva, se está comprobando el carácter transmisivo del terreno, antes que en España empiece a formularse el concepto de permeabilidad, desde la ley de Darcy.

Los temas de la búsqueda y captación de las aguas subterráneas y el de los análisis químicos de suelos, así como la conexión de estos recursos con la Geología, junto a la estructura que se daba a las **Memorias de la Comisión del Mapa Geológico**, donde se buscaba el desarrollo agrícola, llevaría a que muchos ingenieros de minas participasen en diversas Conferencias y Comisiones Agrícolas. De esta forma, por poner algún ejemplo, LINO PEÑUELAS escribe **El aire, el agua y las plantas** (1873). Por otro lado, entre 1876 y 1877, hubo una serie de **Conferencias Agrícolas**, en el Paraninfo Viejo de la Universidad de Madrid, bajo el patrocinio de la Escuela de Agrónomos, en las que participaron los ingenieros de minas PELLICO, SANCHEZ TIRADO y MAFFEL. El tema elegido por este último fue el de: **Las aguas de la provincia de Madrid. Trabajos necesarios para su uso y aprovechamiento, así en los cursos naturales de agua como de las subterráneas. Estadística de aprovechamientos y cálculo de utilidades de las aguas derivadas y de las elevadas**; en él se relacionan los conocimientos e informaciones existentes sobre pozos y aguas artesianas en Madrid, a nuestro juicio sin ningún aporte novedoso. Las tres conferencias fueron publicadas en **Revista Minera** (1877). Asimismo, el 23 de diciembre de 1877, LUIS MARIANO VIDAL imparte, en Barcelona, una conferencia titulada: **Orígenes del suelo**. En ella señalaría que el conocimiento de las aguas subterráneas: **"se adquiere por la Hidrogeología, ciencia derivada de la Geología"**, posteriormente entraría a exponer los principios de esta materia (43). Estamos, ante la primera utilización explícita del término

Hidrogeología hecha en el Mundo, que conozcamos; recordemos que DAVIS, S. y DE WIEST, R. (1966) atribuyen su definición a MEAD (1919). Por último, señalar la conferencia dada por SILVINO THOS Y CODINA, el 4 de junio de 1878, en los locales del Instituto Agrícola San Isidro de Cataluña, sobre el tema **Investigación de manantiales**, apoyándose en su disertación con diversos dibujos de cortes geológicos y contando casos particulares, como Montjuic.

Ese mismo año, DANIEL CORTAZAR escribe la **Descripción geológica y física de la provincia de Valladolid**. Este autor, que tiene muy claro los conceptos de acuífero libre y confinado, aunque no emplea estos términos, dedica varias partes de su obra a la Hidrogeología. Un capítulo se refiere a las aguas de pozo, ya que a través de estos se abastecían la mayor parte de los pueblos de la provincia. Otro apartado, lo centra en las aguas subterráneas, describiendo técnicas sencillas de sondeo. Y, por último, en nuevo capítulo hace referencia a los pozos artesianos, señalando que por sus estudios geológicos, en la zona, puede deducirse que: **"no es probable la existencia de aguas ascendentes, más no es esto negar rotundamente la posibilidad de obtener resultados satisfactorios porque ignoramos la verdadera disposición de las capas"** (44).

Ya se tenían ciertas nociones geológicas, pero fallaba la tecnología de perforación, por eso nos invadieron los sondistas foráneos. Asimismo, las compañías extranjeras de abastecimiento de aguas, empezaron a entrar con fuerza en España, a mediados del XIX. En 1867, se forma en Lieja, Bélgica, la Compañía de Aguas de Barcelona, que en 1871 pasaría a llamarse Aguas Subterráneas del Llobregat. En 1872, Zaragoza otorga su abastecimiento a dos empresas, una franco-belga y otra franco-inglesa, aunque no duraron mucho. En 1876, llega a Barcelona el abad RICHARD (no confundir con ALFONSO RICHARD), invitado por la Compañía Dos Rius y encuentra, en aquella provincia, abundantes manantiales y **"corrientes subterráneas de aguas"** (45). El abad, vicario general de la Rochelle, era un religioso particular, ya que usaba bigote y no llevaba hábito ni tonsura, siendo conocido como el **profeta del agua**. En 1878, acudiría a Tafalla, en Navarra, para buscar ma-

nantiales por cuenta del municipio. A finales de 1879, encargan al Ingeniero de Minas belga HENRI SIRET el abastecimiento de aguas a Cuevas de Almazora. En 1880, una compañía inglesa se hace con el abastecimiento de aguas a La Coruña. Asimismo, en 1882, la Sociedad belga, de Barcelona, fue absorbida por una francesa, de igual nombre. Ese mismo año, el Ayuntamiento de Sevilla cede su abastecimiento de agua, por 99 años, a The Seville Waterworks Company Limited. Según JOSE LUIS PRATS VILA: **"La causa fundamental de esta concurrencia internacional en la gestión del agua, debió ser la modernización de las fábricas de tuberías de fundición y la consiguiente necesidad de dar salida a sus productos. La gestión de los abastecimientos urbanos suponía un mercado cautivo con expansión asegurada"** (46). Muchas de estas concesiones acabaron municipalizándose.

Según leemos en **Revista Minera**, de 1877, se hizo un pozo artesiano, de 50 m, en la Glorieta, Cartagena, que daba mejores aguas que las de la Plaza del Rey. Ese mismo año, también se da noticia sobre la ejecución de un pozo artesiano en Durango, para su abastecimiento, otro en Huelva (realizado con éxito por la Compañía de Riotinto), en las inmediaciones del muelle de hierro por donde salía la producción minera, y otros en la provincia de Badajoz. Los pozos artesianos solucionaban el problema del bombeo, de por sí costoso y con equipos poco eficaces; la novedad, expresada en las publicaciones técnicas de la época, eran las bombas sistemas GREINDL, construidas por L. POILLON, que bombeaban aguas desde más de 100 m de profundidad.

SILVINO THOS Y CODINA, ingeniero de minas catalán, en su presentación en la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona, en 1877, aporta una Memoria, de la que leería parte, titulada **El agua en la Tierra**, que al año siguiente sería publicada en formato libro. El capítulo octavo lo dedica a las **Fuentes y manantiales**, donde a través de 26 páginas, nos expone el trabajo más profundo realizado por un español, hasta la fecha, en el tema de las aguas subterráneas. Evalúa las distintas partes del ciclo; describe, de acuerdo con PARAMELLE, los experimentos para cuantificar la evaporación realizados por DALTON, DICKINSON y CHARNOCK, así como los cálculos de infiltra-

ción en diversas cuencas francesas efectuados por PERRAULT, MARIOTTE, MINARD, BAUMGARTEN y DAUSSE, así como por de THOMASSY en América, considerando el caso particular del Besós donde se infiltraba todo lo que no se evaporaba, pese a su gran cuenca de recepción. Considera el retraso en la velocidad de circulación de las aguas subterráneas debido al rozamiento. Asimismo, enuncia la teoría de los pozos artesianos, pero no explica nada de la ejecución de sondeos, ya que según él la obra tenía un enfoque sólo científico: "no es objeto descender en este trabajo a las aplicaciones prácticas" (47). Pero tampoco aporta las leyes de circulación de las aguas subterráneas dadas por DARCY, DUPUIT o THIEM.

Por aquellas fechas, el Ingeniero Jefe de Montes y Profesor de la Escuela del ramo, sita por entonces en El Escorial, ANDRES LLAURADO, publica el *Tratado de Aguas y Riegos*, donde se busca la explotación racional del conjunto de recursos hídricos en cada una de nuestras cuencas hidrográficas. Esta obra tiene el mérito de haber sido traducida en varios idiomas foráneos. Con un título parecido al anterior, *Manual de aguas y riegos*, se edita, ese mismo año, en la serie de Manuales de la Biblioteca Popular Ilustrada, una obra de RAFAEL LAGUNA. Trata de las aguas y su dinámica, los pozos artesianos, así como de canales, pantanos y regadíos. Asimismo, en *Anales de la Construcción y de la Industria*, 23, de 10 de diciembre de 1878, DANIEL CORTAZAR escribe un artículo sobre el *Empleo de sustancias tintóreas para los estudios hidrológicos*. Como vemos, en estas fechas, tenemos una amplia producción literaria sobre aguas subterráneas.

Ese mismo año los fabricantes ingleses de material de sondeo GRAND y SUTCLIFF, solicitan privilegio de invención, para España y Ultramar, del sistema de perforación de *pozos instantáneos*, también llamados abisinios. En el procedimiento tradicional se realizaban tres operaciones: perforación, limpieza del sondeo y entubado posterior; aquí se reducía a una: en terrenos no muy competentes se hincaba un tubo a golpe de martinete; este estaba lleno de pequeños agujeros para el paso del agua. En el escrito presentado, indicaban que se pediría permiso al Ayuntamiento de Madrid para perforar uno de estos pozos en el Retiro, en presen-

cia de las Comisiones ministeriales y científicas pertinentes. También es conveniente reseñar la aparición en España de los *pulsómetros*, para bombear aguas lodosas.

**Los primeros pozos profundos de la Península Ibérica. Aportaciones españolas a la Hidrogeología y a los sondeos.**

El ingeniero civil y sondista francés ALFONSO RICHARD es invitado, por el banquero MODESTO IBARROLA, para que estudie la Hidrografía Subterránea del país, y con él se han de iniciar los dos primeros sondeos realmente profundos de la Península: Vitoria y Alicante. El sondeo de Vitoria fue concertado por el Sr. LOPIDANA con el Ayuntamiento, comprometiéndose a cubrir los gastos de perforación si le pagaban un canon por litro de agua brotante. LOPIDANA contrata la ejecución del sondeo a RICHARD (En *Revista Minera*, XXX, se habla de FRANCISCO ZUBELDIA, como contratista, y de RICHARD, como Director de Obra). Este tras diversos problemas en la importación y traída de los materiales inició la obra, el 22 de noviembre de 1877, buscando agua brotante entre 550-650 m de profundidad: "Inútil sería contaros los disgustos y sinsabores que he tenido que sufrir, por motivo de esta obra tan admirable conducida por mi personal y con mi material, para el cual he conseguido el cuatro de abril último, por Real Decreto, el privilegio exclusivo" (48). Los estudios geológicos que tuvo que hacer con tal motivo fueron publicados en los *Anales de la Sociedad Agrícola de la Gironde* (1878), artículo traducido por la *Gaceta Agrícola*, del Ministerio de Fomento, y otros periódicos españoles. Estos estudios fueron confirmados por el Profesor RAULIN, de la Universidad de Burdeos.

En aquellas fechas, los Sres. ZSIGMONDY, estaban perforando el pozo artésiano de Buda-Pesth, Hungría, que a los 951 m dio caudal abundante, 79.000 litros diarios de agua caliente, convirtiéndose en el más profundo, en funcionamiento, del Mundo.

RICHARD iba adquiriendo cierta fama, no sabemos si por la profundidad de su pozo o si influiría en ello el monumento alegórico dedicado a S.M., que construiría en Vitoria con materiales del sondeo. En febrero de 1878, JUAN

VILANOVA imparte tres conferencias sucesivas, en el Ateneo de Madrid, en honor a RICHARD. Asimismo, este es invitado por el Ayuntamiento de Huesca y tras visitar la cuenca del río Humesi, acompañado por COSTA, ORUS y dos concejales, presenta un informe al municipio, donde señala la posibilidad de surtirlo con aguas potables superficiales y artesianas. El 20 de octubre, el Rey ALFONSO XII visita el sondeo de Vitoria, condecorando a su autor. Asimismo, VILANOVA y otros fundaron una Sociedad para la prospección de aguas subterráneas, cuyos Estatutos fueron publicados en la *Gaceta de Madrid*, de 26 de febrero de 1879; RICHARD suscribiría una décima parte del capital. El 15 de abril, nuestro autor, inicia el sondeo de Los Angeles, a 3 km de Alicante, en la propiedad de IBARROLA, con la pretensión de llegar a los 400 m de profundidad, con un diámetro de 70 cm. Por otro lado, la Comunidad de Regantes de la Huerta de Alicante, en Junta General de 27 de Junio de 1879, decide la captación de caudales subterráneos. Se encargaría a JUAN VILANOVA el estudio geológico, encontrando en Muchamiel, Valle del Busot, las condiciones idóneas para ello. Tras ganar la licitación de obra, fue construido por el banquero de Alicante FAES, que nombra a RICHARD Director Facultativo de la obra, ya que pensaban llegar, con gran diámetro, a 800 m de profundidad. Pero las mieles no duraron mucho para el sondista francés; según JUAN VILANOVA, en 1880, RICHARD había abandonado el sondeo de Vitoria, por diferencias con LOPIDANA, cuando se habían superado los 600 m. (49). Los trabajos fueron continuados por el ingeniero mecánico LUIS ANITUA. También en Muchamiel se detuvo el sondeo, durante dicho año, de 1880, a los 250 m.

En otro punto de la provincia de Alicante, durante el mes de agosto de 1879, al pie de la Sierra Mariola, en Alcoy, y por encargo de su Junta de Aguas, VILANOVA escoge lugar idóneo para hacer un pozo artésiano. Treinta y cinco fábricas de la localidad se encontraban cerradas por falta de fuerza motriz hidráulica. Hay un comunicado de VILANOVA sobre los pozos artesianos de Alicante en los *Anales de la Construcción y de la industria*, N° 10, de febrero de 1880. También sabemos de tales actividades por el periódico *Las Provincias*, de Valencia, números: 5127 y 5135. La importancia que se dio

en Alcoy a este trabajo llevó a que en dicho municipio se tratase de crear, en 1880, una Escuela de Capataces dedicados a la perforación de pozos artesianos.

Las insistentes noticias que circulaban sobre los sondeos que se estaban realizando en la Península, hicieron que proliferase la literatura científica sobre el tema. A finales de 1879, aparece en el *Boletín de Obras Públicas*, un artículo de MELITON MARTIN, titulado *El agua y los pozos artesianos*, donde aparte de defender, como buen ingeniero de caminos, la construcción de canales y presas, rompe una lanza por la búsqueda de las aguas subterráneas artesianas o no. Respecto a las primeras, considera las dificultades geológicas de España, con unos materiales "revueltos y agitados por mano gigantesca", pero insiste en la necesidad de captar estos recursos (50). Asimismo, en 1880, ALFONSO RICHARD publica *Los pozos artesianos en España*. Esta obra consiste en una serie de cartas, dirigidas al eminente sabio QUATRE-FARGES, donde RICHARD da noticias de sus experiencias hispanas, entre 1878 y 1879. En realidad es una obra apologetica del autor, donde se recoge, en cierta medida, la historia de los pozos artesianos en España, criticando a sus contrincantes, y ensalzando los propios.

Ese mismo año, JUAN VILANOVA Y PIERA escribe *Teoría y Práctica de Pozos Artesianos y Arte de Alumbrar Aguas*. Según JAVIER MARTINEZ GIL (1990) fue realmente una aportación excepcional para su época: "no ya solamente a nivel nacional sino incluso a nivel de lo que por entonces creemos era la ciencia hidrogeológica en el mundo entero" (51). La obra se divide en tres partes: Hidrología, Hidroscopia y Apéndice. En la Hidrología se explica, en palabras del autor, el origen del agua, las visicitudes porque ha pasado y las metamorfosis que incesantemente experimenta. Ya no usa exclusivamente el término Hidrografía, que para el agua sería lo mismo que la Geografía para la Tierra. La segunda parte se refiere a la Hidroscopia o Práctica, consistente en descubrir o adivinar la existencia de aguas en el subsuelo. Aquí se habla de pozos tubulares, artesianos (Fig.-10) y absorbentes, así como instantáneos, y también alumbramientos y sondeos, describiendo todas las técnicas existentes. El apéndice final se

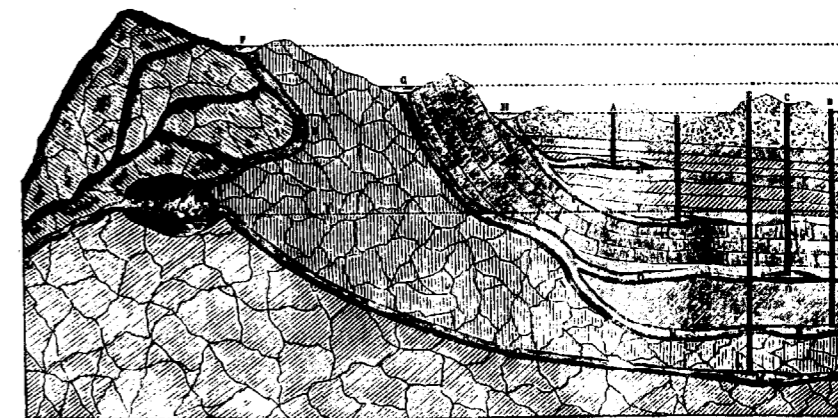


Figura 10. Corte demostrativo de la teoría de las fuentes ascendentes naturales y de los pozos artesianos, JUAN VILANOVA (1861 y 1880).

dedica a los riegos, la hidroscopia en España y la legislación de aguas vigente. Se aprecia en la obra la influencia de GARNIER, DEGOUSSE y LAURENT, PARAMELLE y HERICART DE THURY, así como los trabajos de los españoles BORDIU, THOS Y CODINA, LAGUNA y LLAUDRADO, entre otros. Echamos de menos las fórmulas de DARCY, DUPUIT y THIEM.

VILANOVA, nos describe como de repente se inunda la geografía hispana de pozos profundos en construcción; "de grandes dimensiones", como diría el autor (52). Además, todos ellos muestran un buen diámetro, al menos 0,30 m. Estos sondeos son los de: Vitoria (va por los 600 m), Alcalá de Chisvert (detenido a los 132 m), Los Angeles (según *Revista Minera* con 312 m, el 1-X-79, pretendiendo llegar a los 400 m), Muchamiel (parado sin éxito a los 250 m), el de la Junta de Aguas de Alcoy (va por los 60 m), el del Sr. REIG, en El Realengo (Játiva) (detenido a los 200 m, por haber encontrado agua suficiente), el del Sr. RIBERA, en Carcagente y el encargado por la Diputación de Navarra a la casa LIPMANN, en Ablitas, junto a Tudela (cuyas obras fueron inauguradas el 15 de marzo de 1880). Aparte de los descritos por VILANOVA, parece ser que se estaba realizando otro sondeo de gran profundidad en el Monte de San Juan, de Huesca.

También en 1880, el ingeniero de minas GABRIEL PUIG Y LARRAZ, escribe en el *Boletín de la Sociedad Geográfica de Madrid*, un artículo titulado *Descripción físico geográfica de la provincia de*

*Zamora*. Este autor en la Memoria geológica de la provincia hace referencia a los pozos abiertos en el Terciario de la capital, señalando que en aquella cuenca hay varios acuíferos superpuestos, a distintas profundidades. Tras evaluar la recarga, señala la posibilidad de construir pozos artesianos en algunos puntos.

En ese mismo año, el ingeniero de minas HORACIO BENTABOL Y URETA inicia su actividad hidrogeológica, publicando, en *Revista Minera*, un artículo titulado *Investigaciones subterráneas y alumbramientos de aguas por medio de sondeos*. En él trata sobre los procedimientos de perforación de pozos existentes y sobre un nuevo método inventado en España por el alemán MANUEL PZIBILLA. Este autor, en 1872, perforando en la cuenca carbonífera del Ruhr, en Westfalia, al atravesar una capa artésiana se dio cuenta que el sondeo se agilizaba por arrastrar el agua los detritus, lo que le hizo aplicar un sistema similar al de FAUVELLE que no se había prodigado, inyectando agua por el interior del vástago. En 1877, fue llamado a Puertollano, Ciudad Real, por HILARION ROUX para sondear, buscando comprobar la disposición de las capas de carbón subyacentes. El procedimiento mostraba algunas dificultades, pero pronto fueron subsanadas: "ideó el Sr. Pizibilla el medio de obtener la caída libre de la herramienta, sin que resultase interrupción en la corriente descendente del agua y por ese medio ha practicado en Puertollano tres sondeos", con excelentes resultados (53).

El método anterior, junto con el del

matemático AMADOR DE VILLAR Y CASTROPOL, descrito por JUAN VILANOVA (1880) y por E.M. (EUGENIO MAFFEI ?) en *Revista Minera*, XXXI, 89-90, serían la aportación hispana al mundo de los sondeos, en la segunda mitad del XIX. El 18 de marzo, de 1880, en la fábrica de fundición del Sr. CANTERAC, en la que se había construido la sonda de VILLAR, se hizo su demostración, estando presentes el ingeniero BOCHERINI, Comisionado por el Gobierno, profesionales y curiosos. En el aperitivo, dispuesto para la ocasión, hubo discursos patrióticos y VILANOVA brindó por los resultados obtenidos. El equipo no era otra cosa que una mejora del sondeo chino, el cual había caído en desuso por no trabajar el trépano a rotación, por la dificultad en mantener la verticalidad del taladro y porque, a grandes profundidades, la falta de rigidez del cable no garantizaba la percusión. VILLAR hizo modificaciones con objeto de vencer estas dificultades. El sistema constaba de un trépano que era a la vez cuchara limpiadora. Asimismo, mediante un cilindro acoplado con canales helicoidales, comunicaba en la caída a la herramienta el movimiento helicoidal preciso. Y, a través de un balancín de brazos variables y con el tambor donde se arrolla el cable, dotado de freno, conseguía desarrollar, para cada golpe, la longitud de cable justa.

El 26 de septiembre de 1881, se rompe el trépano en el sondeo de Vitoria, a los 1.021 m de profundidad. Al poco tiempo, cuatro equipos de extracción estaban atrapados en el interior del sondeo, así como 1.887 m de barras de hierro, siendo necesario para sacarlas 1.100 m de nuevas varillas. La empresa pide auxilio al Gobierno y este remite al ingeniero responsable del Distrito Minero de Guipúzcoa, RAMON ADAN DE YARZA, el cual elabora un informe, donde, tras relatar someramente la geología comarcal, señala que cabría esperar un buen resultado del sondeo si se llega a profundizar hasta las areniscas inferiores a las margas, aunque no se atreve a dar la profundidad por falta de datos, considerando oportuno que el Gobierno financie el sondeo. El ingeniero de minas MARIANO ZUAZ-NAVAR, desde las minas de Orbó, pide apoyo al desarrollo del sondeo: "Hay aquí para el físico, para el geólogo, para el mecánico muchos puntos de observación; sobre todo hasta de honra nacional en mi juicio sería la pro-

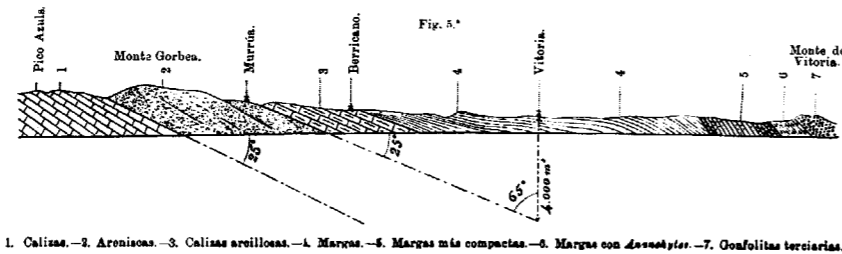
secución del trabajo, en tanto que respetables corporaciones no dieran su fallo demostrando la imposibilidad de continuar la profundidad del taladro" (54). Con fecha 3 de noviembre, el Director General de Obras Públicas remite, a la Comisión del Mapa Geológico, el informe de ADAN DE YARZA, así como una instancia presentada por ALFONSO RICHARD. La Comisión encargó a DANIEL CORTAZAR el estudio de la cuestión, contestando dicho autor de forma categórica, según hemos podido leer en el *Boletín de la Comisión del Mapa Geológico*, Tomo XI (1884): "resulta que no es probable pudiera encontrarse el agua que por aquellas circula a menos de 4000 m de profundidad" (Fig.-11) (55), recordemos que RICHARD, en su segunda versión, consideraba que el sondeo debía llegar a los 1336 m. De igual forma, para CORTAZAR las capas inferiores al supuesto acuífero areniscoso, señalado por RICHARD, son calizas más o menos permeables. CORTAZAR se queja asimismo, el no haber consultado antes de la apertura del pozo a la Comisión, que ya disponía información geológica de la zona. Y, termina indicando que las 125.000 pesetas solicitadas se consumirían en dejar expedito el sondeo y no en profundizar más. La conclusión de CORTAZAR es la siguiente: "si es sensible (el Estado) que el sondeo de la capital de Alava haya de abandonarse, no sería el primero entre los de gran profundidad, pues en la plaza de Columbus, estado de Ohio, se bajó a 923 m sin resultado, y en San Luis, estado de Missouri, sucedió lo propio a los 998 m..." (56). A nosotros, según datos tomados de la literatura científica de la época, nos bailan un poco las cifras relativas a la profundidad del sondeo

de Missouri, pero para CORTAZAR no cabe duda, el pozo de Vitoria es a la fecha el más profundo del Mundo. El sondeo se suspendería, lo que significa que RICHARD fracasa en España en cierta medida, pese a las cotas alcanzadas, ya que también el pozo de Los Angeles tuvo que parar sin resultado positivo, tras llegar a los 583 m, en ese año fatídico para él de 1881.

En el mismo 1881, RAFAEL ROIG TORRES, Director de la *Revista de Agricultura* y del Laboratorio de Química del Instituto Agrícola San Isidro de Cataluña, publica en Barcelona un pequeño folleto donde se recogen las doctrinas relativas a la investigación de las aguas subterráneas. Su título es *La riqueza de la Agricultura. Aguas subterráneas*.

El 25 de enero de 1882, LUIS MARIANO VIDAL remite, al *Boletín de la Comisión del Mapa Geológico*, un amplio informe sobre los manantiales termales de Caldas de Malavella, con la descripción geológica de la zona, realizando diversas hipótesis sobre el origen de las aguas. En ese mismo tomo, FEDERICO BOTELLA, en la *Reseña física y geológica de la región S.O. de la provincia de Almería*, señala que pese a no haberse realizado en esta provincia ningún taladro para buscar aguas artesianas debería estudiarse el tema, en región tan castigada por las sequías, aunque el autor no señala punto concreto. Y, en tal año, E. BELGRAND, de forma póstuma, publica el último de los cuatro tomos sobre *Les eaux de Paris*.

Entre 1880 y 1884, hubo importantes actividades de sondeos en Huelva. El primero de estos años, en la margen derecha de la ría, la compañía minera



1. Calizas.—2. Areniscas.—3. Calizas arenilosas.—4. Margas.—5. Margas más compactas.—6. Margas con *Lasseoelytes*.—7. Conofolias terciarias.

Figura 11. Corte geológico de DANIEL CORTAZAR para demostrar la inviabilidad del sondeo de Vitoria.

de Tharsis inicia esta labor con un taladro, de algo menos de 100 m, cortando cuatro niveles acuíferos de escasa importancia. Asimismo, entre 1882 y 1884, en la margen izquierda, Riotinto Minera realiza un pozo ascendente de 215 m.

En 1886, PHILIP FORCHEIMER introduce el concepto de Superficies Equipotenciales. Ese mismo año en el Real Decreto, de 30 abril, relativo al Reglamento del Cuerpo Nacional de Ingenieros de Minas, se recoge entre las atribuciones asignadas: "Formar la carta geológica general del país, y cuantas otras de igual índole y geológico, agronómicas e hidrogeológicas locales o parciales sea menester" (Art. 1º, Apart. 5º). Estamos ante la primera referencia, que conozcamos para la formación de una cartografía hidrogeológica. También en el Artículo 9º se señala la competencia de: "Alumbrar aguas subterráneas en bien de la agricultura por medio de sondeos y otros trabajos".

#### Llega a España la hidráulica subterránea.

En 1894, el ingeniero industrial ANTONIO MONTENEGRO escribe *Arte de la Explotación del Agua en pozos, fuentes y alumbramientos*. La novedad que nos proporciona este autor tal vez consista en lanzar la idea (cuyo antecedente fue RICO SINOBAS) de la necesaria construcción de embalses y depósitos subterráneos, lo que hoy en día llamamos recarga artificial de acuíferos. Se trataba de evitar la evaporación y las aguas torrenciales, reteniendo el agua en el interior de la Tierra.

En 1896, el ingeniero de caminos GONZALO MORAGAS, en la *Revista de Obras Públicas*, publica un importante trabajo titulado *Estudio general sobre el régimen de las aguas contenidas en los terrenos permeables e influencia que ejercen los alumbramientos por galerías y pozos, y especial del régimen de la corriente subterránea en el delta acuífero del Besós*. Para JAVIER MARTINEZ GIL: "La obra representó en su momento un excelente tratado de hidráulica subterránea, muy completo para su época, quizá uno de los primeros estudios publicados en este sentido en nuestro país" (57). Es el primer autor español, según nos consta, que emplea la Ley de Darcy. Según MORA-

GAS las aguas caídas a 40 km del mar llegarían a este en dos días, mientras que subterráneamente con una pendiente de 0,005 y un valor de k (permeabilidad) de 0,01 tardarían en llegar al mar 27 años. Estos valores son exagerados, pero la observación de este retardo, tal y como había hecho GARCÉS en Cella, es de sumo interés.

En 1897, aparecen las obras, del que fuera Director de la Escuela de Minas de París, A. DAUBREE, *Les eaux souterraines aux époques anciennes (1 Vol.) y Les eaux souterraines a l'époque actuelle, leur régime, leur température, leur composition (2 Vol.)*. Este conocido autor se dedicaba a la Geología Experimental, no extraña pues que quisiera poner en práctica la fórmula de Darcy, y comprobar la influencia de la presión y la temperatura en la permeabilidad.

Hacia 1897, entre una Sociedad Minera y un particular, LUIS PENALVA, hacen 16 pozos artesianos, de 40 m., en Zaricejos, Alicante, subiendo el agua hasta los 2 m por debajo del nivel del suelo. Entre todos darían 400 litros por segundo.

En 1898, HORACIO BENTABOL publica un artículo en *La Unión Mercantil*, de Málaga, titulado *Detención de las aguas de lluvia*. A lo largo del XIX surge una cierta preocupación por la retención de las aguas de lluvia, hemos hablado del tema de la reforestación pero hubo otros considerandos, las excavaciones u hoyos de CAVANDIER o las zanjas horizontales de POLANCEAU. Parece ser que, en ese mismo año, BENTABOL escribe la obra *Las aguas de España y Portugal*, aunque no sería publicada hasta 1900: "tras dos años de vivos esfuerzos, por parte del autor para conseguir su publicación. A principios de 1899 intentó publicarla, primero en *El Liberal* y después en *La Epoca*, pero la índole y extensión del escrito constituyeron un obstáculo insalvable" (58).

En Puertollano, durante el año de 1899, se hace un sondeo para la central eléctrica, dando a los 33 m aguas ascendentes. Asimismo, por aquellas fechas, también se perfora un pozo en Linares, Jaén, a más de 120 m; se encontraron caudales, pero las aguas no eran artesianas.

Ese mismo año, BENTABOL intenta que la Comisión del Mapa Geológico publique su obra sin conseguirlo. El 20 de

febrero imparte una conferencia en el Ateneo de Madrid, *Las aguas de España y la regeneración del país*, discurso que recogió integro *La Correspondencia de España* y que tuvo gran difusión en otros periódicos del país. El 4 de mayo publica en *La Epoca* un provocativo artículo titulado *Menos canales y más aguas, que empieza así: "No con canales sino con aguas se riegan los campos..."*, lo que le valió granjearse varios enemigos en el Cuerpo de Caminos.

En 1900, aparece por fin la obra de HORACIO BENTABOL Y URETA, *Las aguas de España y Portugal*, editada en el *Boletín de la Comisión del Mapa Geológico*. Sin duda, constituye el tratado más importante escrito hasta entonces en España sobre hidrología general y aplicada. Se divide en dos partes: Evaluación del régimen hidrológico y Plan de reformas necesarias. En la primera considera a la lluvia como un fenómeno irregular, pero de cantidad sensiblemente constante en períodos de diez años. Señala la escasez de datos sobre evaporación, que tanto influye en el ciclo hidrológico. Indica la importancia de las observaciones hidrométricas, midiendo las precipitaciones con eudímetros (pluviómetros) y la evaporación con higrómetros agrícolas (lisímetros). Estamos ante uno de los primeros tratados españoles de hidrología general, junto al extenso artículo de MORAGAS, donde se aplica la Ley de Darcy. Asimismo, el autor confirma que la característica útil de las aguas subterráneas es su escasa velocidad. Por último, propone medir la infiltración en cada cuenca, aforando cauces y cuantificando pluviometrías y evapotranspiraciones. En la segunda parte, estimula a la retención de caudales, mediante un programa de forestación, construcción de muros, así como creando embalses superficiales y subterráneos, ampliando las ideas de MONTENEGRO. Reco-mienda todo tipo de técnicas para mejorar lo que hoy denominamos recarga artificial de acuíferos. Y, propone la creación de una *Dirección Hidrogeológica Central*, para acabar con el cantonalismo y desorganización en el tema aguas. Reseñar también que no habla de los trabajos de DUPUIT y THIEM. Asimismo algunos autores señalan a BENTABOL como introductor del término Hidrogeología, aunque ya vimos que esto corresponde a VIDAL. Por último, señalar un dato importante que recoge BENTABOL, el

incremento del consumo de agua. Según datos del Canal de Isabel II, en el Madrid de 1860 era de 60 litros por persona y día, mientras que en 1898 esta cifra se había transformado en 260, mientras que BENTABOL reduce este valor a 30. No cabe duda que la mayor demanda haría que se prestase mayor atención a dicho recurso.

La obra fue criticada por algunos, tal y como hizo, en la **Revista de Obras Públicas**, de 30 de agosto de 1900, el ingeniero de caminos RAFAEL CODERCH. Fundamentalmente no se entendía bien el tema de la construcción de excavaciones subterráneas para acumular las aguas de lluvia y favorecer la infiltración, así como, según señala al final de su artículo: **"...no es, ni será nunca bastante conocida la estructura y naturaleza del subsuelo para poder precisar la marcha de las corrientes subterráneas..."**. CODERCH fue contestado a la semana siguiente, desde **Revista Minera**, por el ingeniero de minas ADRIANO CONTRERAS que ante el escepticismo de CODERCH sobre los conocimientos del entorno geológico y de las aguas subterráneas señala: **"pero hartos sabe el Sr. Coderch que la hidrología interna es ciencia, que desde Paramelle acá, se ha constituido sobre leyes fijas, y que la investigación y captación de las aguas subterráneas tiene su técnica exacta, sancionada en innumerables trabajos"** (59). En este artículo el autor aporta una sugerencia relevante, crear asignaturas específicas, especialmente en Minas y Agrónomos, para propagar el estudio de las aguas subterráneas. También insta al Gobierno para un estudio completo del territorio nacional, en el caso particular de las aguas artesianas: **"pues sólo él tiene personal y medios para practicar el estudio del territorio desde este punto de vista"** (60). La enseñanza de la Hidrogeología como asignatura propia, no acontece hasta 1921; esto ocurre en la Escuela de Minas de Madrid, con el nombre de Hidrología Subterránea, siendo impartidas las clases por PABLO FABREGA Y COELLO. En ese mismo año MEINZER estructura la Hidrogeología como ciencia.

Otra cuestión importante es que la búsqueda de las aguas subterráneas, tan necesaria en un país eminentemente agrícola, impulsó enormemente el desarrollo de la Geología. En el Congreso de Minería de Murcia, de 1900, el ingeniero de minas y gran

regeneracionista LUCAS MALLADA, que en su obra **Los males de la Patria** ya había puesto de relieve la importancia de la problemática del agua en nuestro país, presenta una comunicación, de 18 páginas, titulada: **Necesidad e importancia en España de los estudios hidrogeológicos y de la explotación de las aguas subterráneas**, donde señala que: **"en España más que en ninguna otra nación de Europa, es indispensable, antes de investigar las aguas subterráneas, hacer un estudio geológico muy detallado de las condiciones del terreno; y no siendo en general factibles estos trabajos a los particulares, incumbe al Gobierno ordenarlos y conseguirlos para toda la nación"** (61). En el resumen con que termina el trabajo, su autor, por el sumo interés que para la agricultura tiene alumbrar aguas subterráneas, señala y propone al Congreso que lleve al Gobierno (siendo votado en la Asamblea) la necesidad de: 1º Hacer un inventario de manantiales, 2º Señalar las zonas favorables para la construcción de pozos artesianos, 3º Enumerar, siquiera someramente, las zonas montañosas susceptibles de contener entre sus rocas importantes cantidades de agua. A la Junta Superior de Minería correspondería informar si la Comisión formada para estos estudios debiera ser o no independiente de la Comisión del Mapa Geológico, así como consignar el personal y recursos para su puesta en marcha. Esta labor se encomendaría a la Comisión en 1905.

Se inicia el siglo XX, con una moderna legislación de aguas, con unas publicaciones de cierto nivel, con los ingenieros y científicos demandando que el Gobierno asuma la investigación de las aguas subterráneas y con unas técnicas de sondeo avanzadas. En referencia a esto último, el ingeniero de caminos JOSE MESA Y RAMOS señala, en su documentado libro sobre **Pozos artesianos** (1909), un retorno a la perforación con cable: **"Causó verdadera sorpresa ver, en la Exposición de París de 1900, en el Bois de Vincennes, que una Sociedad Americana exponía procedimientos de sondeos empleados en los Estados Unidos para buscar petróleo, y su aplicación a la perforación de pozos artesianos, suprimiendo las principales causas de oposición a estos alumbramientos, como son el largo tiempo de ejecución y su excesivo costo"** (62). Los americanos sacaban petróleo desde mediados del XIX (Fig.-12), lo



Figura 12. Primer pozo de petróleo en Pennsylvania.

que desarrollaría notablemente los sondeos. La Sociedad antes mencionada hizo un pozo artesiano de 590 m en sólo dos meses. Estaban sentadas las bases para el progreso de la Hidrogeología en España.

#### **Algunos datos sobre la legislación.**

Terminamos el estudio con un somero análisis legislativo, tocando sólo el tema de las aguas subterráneas (dejamos para otra ocasión las aguas minero-medicinales y minero-industriales). Ya vimos, como en **Las Partidas**, de ALFONSO X EL SABIO, el propietario del terreno era el dueño de las aguas subterráneas, estamos ante el **"a colosse ad abyssum"** consignado en el derecho romano. Sin embargo, en Aragón, tal vez debido a la escasez del preciado elemento, la propiedad pasa al rey, formando el dominio de las aguas parte de las llamadas regalías menores. Los que pretendían abrir un pozo debían denunciarlo a los Bayles y pagar canon anual. Cuenta RAIMUNDO JORDA (1875) que **"el Rey hizo donación de esta regalía menor, respecto al campo de Tarragona, a los Abades de la Cartuja de Scala Dei, a quienes acudían en solicitud de permiso los que aspiraban a alumbrar aguas"** (63). Este uso se perdió, llegándose a acuerdos

incremento del consumo de agua. Según datos del Canal de Isabel II, en el Madrid de 1860 era de 60 litros por persona y día, mientras que en 1898 esta cifra se había transformado en 260, mientras que BENTABOL reduce este valor a 30. No cabe duda que la mayor demanda haría que se prestase mayor atención a dicho recurso.

La obra fue criticada por algunos, tal y como hizo, en la *Revista de Obras Públicas*, de 30 de agosto de 1900, el ingeniero de caminos RAFAEL CODERCH. Fundamentalmente no se entendía bien el tema de la construcción de excavaciones subterráneas para acumular las aguas de lluvia y favorecer la infiltración, así como, según señala al final de su artículo: "...no es, ni será nunca bastante conocida la estructura y naturaleza del subsuelo para poder precisar la marcha de las corrientes subterráneas...". CODERCH fue contestado a la semana siguiente, desde *Revista Minera*, por el ingeniero de minas ADRIANO CONTRERAS que ante el escepticismo de CODERCH sobre los conocimientos del entorno geológico y de las aguas subterráneas señala: "pero harlo sabe el Sr. Coderch que la hidrología interna es ciencia, que desde Paramelle acá, se ha constituido sobre leyes fijas, y que la investigación y captación de las aguas subterráneas tiene su técnica exacta, sancionada en innumerables trabajos" (59). En este artículo el autor aporta una sugerencia relevante, crear asignaturas específicas, especialmente en Minas y Agrónomos, para propagar el estudio de las aguas subterráneas. También insta al Gobierno para un estudio completo del territorio nacional, en el caso particular de las aguas artesianas: "pues sólo él tiene personal y medios para practicar el estudio del territorio desde este punto de vista" (60). La enseñanza de la Hidrogeología como asignatura propia, no acontece hasta 1921; esto ocurre en la Escuela de Minas de Madrid, con el nombre de Hidrología Subterránea, siendo impartidas las clases por PABLO FABREGA Y COELLO. En ese mismo año MEINZER estructura la Hidrogeología como ciencia.

Otra cuestión importante es que la búsqueda de las aguas subterráneas, tan necesaria en un país eminentemente agrícola, impulsó enormemente el desarrollo de la Geología. En el Congreso de Minería de Murcia, de 1900, el ingeniero de minas y gran

regeneracionista LUCAS MALLADA, que en su obra *Los males de la Patria* ya había puesto de relieve la importancia de la problemática del agua en nuestro país, presenta una comunicación, de 18 páginas, titulada: **Necesidad e importancia en España de los estudios hidrogeológicos y de la explotación de las aguas subterráneas**, donde señala que: "en España más que en ninguna otra nación de Europa, es indispensable, antes de investigar las aguas subterráneas, hacer un estudio geológico muy detallado de las condiciones del terreno; y no siendo en general factibles estos trabajos a los particulares, incumbe al Gobierno ordenarlos y conseguirlos para toda la nación" (61). En el resumen con que termina el trabajo, su autor, por el sumo interés que para la agricultura tiene alumbrar aguas subterráneas, señala y propone al Congreso que lleve al Gobierno (siendo votado en la Asamblea) la necesidad de: 1º Hacer un inventario de manantiales, 2º Señalar las zonas favorables para la construcción de pozos artesianos, 3º Enumerar, siquiera someramente, las zonas montañosas susceptibles de contener entre sus rocas importantes cantidades de agua. A la Junta Superior de Minería correspondería informar si la Comisión formada para estos estudios debiera ser o no independiente de la Comisión del Mapa Geológico, así como consignar el personal y recursos para su puesta en marcha. Esta labor se encomendaría a la Comisión en 1905.

Se inicia el siglo XX, con una moderna legislación de aguas, con unas publicaciones de cierto nivel, con los ingenieros y científicos demandando que el Gobierno asuma la investigación de las aguas subterráneas y con unas técnicas de sondeo avanzadas. En referencia a esto último, el ingeniero de caminos JOSE MESA Y RAMOS señala, en su documentado libro sobre *Pozos artesianos* (1909), un retorno a la perforación con cable: "Causó verdadera sorpresa ver, en la *Exposición de París de 1900, en el Bois de Vincennes, que una Sociedad Americana exponía procedimientos de sondeos empleados en los Estados Unidos para buscar petróleo, y su aplicación a la perforación de pozos artesianos, suprimiendo las principales causas de oposición a estos alumbramientos, como son el largo tiempo de ejecución y su excesivo costo*" (62). Los americanos sacaban petróleo desde mediados del XIX (Fig.-12), lo

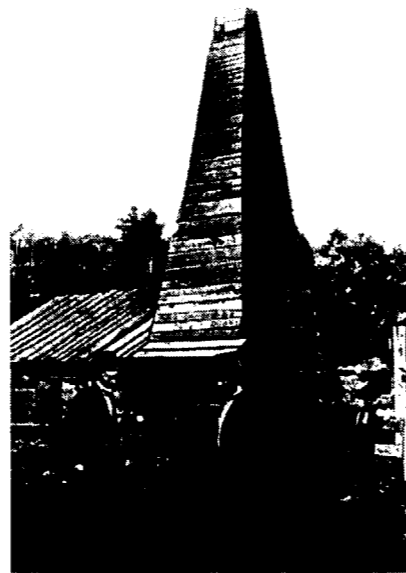


Figura 12. Primer pozo de petróleo en Pensylvania.

que desarrollaría notablemente los sondeos. La Sociedad antes mencionada hizo un pozo artesiano de 590 m en sólo dos meses. Estaban sentadas las bases para el progreso de la Hidrogeología en España.

#### Algunos datos sobre la legislación.

Terminamos el estudio con un somero análisis legislativo, tocando sólo el tema de las aguas subterráneas (dejamos para otra ocasión las aguas mineralocinéticas y minero-industriales). Ya vimos, como en *Las Partidas*, de ALFONSO X EL SABIO, el propietario del terreno era el dueño de las aguas subterráneas, estamos ante el "a colo usque ad abysum" consignado en el derecho romano. Sin embargo, en Aragón, tal vez debido a la escasez del preciado elemento, la propiedad pasa al rey, formando el dominio de las aguas parte de las llamadas regalías menores. Los que pretendían abrir un pozo debían denunciarlo a los Bayles y pagar canon anual. Cuenta RAIMUNDO JORDA (1875) que "el Rey hizo donación de esta regalía menor, respecto al campo de Tarragona, a los Abades de la Cartuja de Scala Dei, a quienes acudían en solicitud de permiso los que aspiraban a alumbrar aguas" (63). Este uso se perdió, llegándose a acuerdos

entre particulares, si afectaba a la propiedad de un tercero, y posterior denuncia para alumbrar, ante el Ayuntamiento. Tal situación persiste hasta que, en 1836, la Reina Gobernadora suprime las regalías menores.

Tratamiento distinto tenían las aguas de mina; en 1841, por Orden de la Regencia Provisional del Reino, de 20 de abril, sobre el aprovechamiento de las aguas que se encuentran en las minas, se señala: "Que las aguas como todo lo que el minero extrae de la mina es de su propiedad mientras no pierda el derecho que a esta le concede la ley, sin que deba por lo mismo pagar canon alguno por este aprovechamiento". En este punto persiste prácticamente toda la extensa legislación minera posterior.

El tres de agosto de 1866, nace la *Ley de Aguas*, para algunos la primera ley sobre este tema específica promulgada en el Mundo. El Estado asume la propiedad de las aguas y establece un régimen con primacía de acceso al propietario, por concesión. El problema es que la ley no establece los trámites a que debe sujetarse la instrucción de expedientes. Esta ley fija limitaciones a la libre disposición de los propietarios de los terrenos, pero por otro lado los que disfrutaban de las aguas alumbradas, en pacífica posesión, por espacio de más de veinte años tienen derecho automático a su explotación. Otro inconveniente legal surge al no considerar las concesiones otorgadas por los entes locales, en los últimos años, que adquieren nulidad.

El tema de los expedientes queda resuelto al publicarse las *Bases generales para la nueva legislación de minas*, el 29 de diciembre de 1868. En ellas las sustancias minerales se dividen en tres secciones: la 1ª que corresponde a las que pertenecen al dueño del terreno; la 2ª aunque pertenecen al propietario del terreno puede otorgarse su concesión a un tercero por causa de utilidad pública; y la 3ª sección, que comprende las sustancias que no se pueden explotar sin concesión del Estado, en la que se incluyeron las aguas subterráneas: "Debe considerarse que pertenecen también a este grupo, las aguas subterráneas". En el Art. 48 insiste en el tema que los mineros son dueños de las aguas que encuentran en sus trabajos (no tienen que andarse con solicitudes de alumbramiento, ni pago de cánones) y así mismo indica que una

ley especial fijará reglas sobre el aprovechamiento de las aguas subterráneas. Parece ser que hubo muchas impugnaciones, por parte de los propietarios de los terrenos.

La *Ley de aguas*, de 20 de febrero de 1870, mantiene los derechos reconocidos a los propietarios de los terrenos.

En el *Proyecto de Ley de Minas*, cuya Comisión es nombrada por Decreto de 5 de mayo de 1873, las aguas subterráneas pasarían a formar parte de la 2ª sección, no permitiéndose que un extraño alumbramiento en una propiedad particular, a menos que se den las siguientes circunstancias: 1º Que el dueño de un predio no se obligue a explotar el recurso por su cuenta, cuando otro se interese por él. 2º Que se declare previamente la utilidad pública de la explotación. En cuanto a la tramitación de las concesiones, EUGENIO MAFFEI señala que existe una distinción: "como el problema de la iluminación según he dicho es puramente geológico, y el agua es una sustancia mineral como otra cualquiera nadie puede negar la competencia que para intervenir en estos expedientes tienen los ingenieros de minas; pero cuando las aguas están ya alumbradas y se trata de su aplicación, entienden en el asunto los de caminos, según las disposiciones vigentes" (64).

Como consecuencia de los derechos reconocidos a los propietarios de los predios, según las leyes de aguas de 1866 y 1870, se promulga la Real Orden, de 5 de diciembre de 1876, donde se indica que en la sección 3ª sólo pueden referirse a las aguas subterráneas en terrenos del Estado, criterio reiterado por la Real Orden de 10 de julio de 1877.

El 31 de junio de 1879, aparece nueva *Ley de Aguas*. Como señala JAVIER MARTINEZ GIL (1990): "En ella se fijaron las distancias mínimas que debían ser respetadas entre dos captaciones próximas, de propietarios diferentes en función del tipo de captación (pozos ordinarios, pozos artesianos, pozos con equipos mecánicos de elevación, socavones, galerías, etc.)" (65).

Ese mismo año P. Mª. BENTABOL Y URETA, realiza un compendio de las legislaciones de aguas, aparecidas entre 1846 y 1879, en obra titulada *Legislación de Aguas*.

Por Real Orden Aclaratoria, de 5 de junio de 1883, tenemos que, dentro de las normas para tramitar expedientes de concesión, según está previsto en el Capítulo IV de la Ley de Aguas vigente: "La clase de obra que el alumbramiento de aguas necesita, exigen la intervención de los Ingenieros de Minas, así como las de los de Canales, Caminos y Puertos, por lo que los trabajos pueden afectar al dominio público e influir en las corrientes de agua y aprovechamientos existentes". Esta concurrencia competencial a traído desde entonces un buen sin número de conflictos.

Termina el siglo, señalando HORACIO BENTABOL las limitaciones de la Ley de 1879, obstáculo para un programa de actuación sobre el conjunto los recursos hídricos. Sin embargo, esta normativa debía ser bastante racional ya que pervive por más de un siglo, hasta que en 1985 se promulga la nueva Ley de Aguas.

#### REFERENCIAS

- (1) OROZ, J. y MARCOS, M. A. (1994): *San Isidoro de Sevilla. Etimologías*, II, edición bilingüe. Ed. B.A.C. 614 pág. Madrid. Pág. 155.
- (2) Ibidem. XIII, 12, 2. Pág 141.
- (3) MANZANO, R. (1995): El agua en la antigüedad púnica y romana. en *El hombre y el agua en la Geografía y la Historia de España*, 37-63. Ed. F.C.C. 248 pág. Madrid. Pág. 41.
- (4) OROZ, J. y MARCOS, M. A. (1994): Ibidem. XIII, 12, 3. Pág. 141.
- (5) SANCHEZ, A. (1991): Desarrollo histórico de los aprovechamientos hidráulicos. *El agua en España*, Ed. I.I.E. 186 pág. Madrid. 37-45. Pág. 40.
- (6) RIPOLL, G. e VELAZQUEZ, I. (1995): La España visigótica. Del Rey Ataulfo a Don Rodrigo. En *Historia de España*, 6. Junio-95. Pág. 136.
- (7) SHARKEY, J. (1994): *Misterios celtas. La antigua religión*. Ed. Debate. 96 pág. Madrid. Pág.7.
- (8) LUCAS, L. et al. (1982): *Guía didáctica de apoyo a cuatro murales sobre el agua*. IGME. 64 pág. Madrid. Pág. 53.



(9) ANONIMO (1988): *Ayer y hoy de la minería en España*. Ed. Tecniberia-ICEX. Madrid.

(10) SANZ GARCIA, J. M. (1993): *Viacrucis del Manzanares isabelino*. Ed. Ayto. de Madrid-Inst. Est. Madrileños del CSIC. 74 páginas. Madrid. Pág. 16.

(11) PUCHE, O. (in litt): La obra minera del Rey Sabio y las explotaciones de su tiempo. En actas de las *I Jornadas sobre Minería y Tecnología en la Edad Media Peninsular*. León.

(12) PEÑUELAS, L. (1851): Sobre los pozos artesianos en la provincia de Murcia. *Revista Minera*, 2, 717-724. Pág. 717.

(13) CAPEL, H. (1985): *La física sagrada*. Eds. del Serbal. Barcelona. 223 págs. Pág. 99.

(14) LOPEZ AZCONA, J. M. (1985): Los jheólogos. *Revista de materiales y procesos geológicos*, V. III, 179-187. Pág. 185.

(15) CHUECA GOITIA, F. (1995): El agua en el Renacimiento y en el Barroco. En *El agua en España*, C. IV, *Ibidem*. Pág. 134.

(16) MAFFEI, E. y RUA DE FIGUEROA, R. (1871): *Apuntes para una biblioteca española de libros, folletos y artículos, impresos y manuscritos relativos al conocimiento y explotación de las riquezas minerales y a las ciencias auxiliares*. Imp. J.M. Lapuente. Madrid. Reed. VI Congr. Int. de Minería, V. II y V. III León.

(17) GARCIA TAPIA, N. (1989): *Inventores españoles del Siglo de Oro*. Inv. y Ciencia. Barcelona.

(18) PERRAULT, P. (1764): *De L'Origine des Fontaines*. Imp. Chez Pierre Le Petit. París.

(19) THOS Y CODINA, S. (1878). *El agua en la Tierra*. El autor-editor. 304 páginas. Barcelona. Pág. 155.

(20) PENDAS, F. (1993): *La enseñanza de la Hidrogeología en las Escuelas de Minas de España*. Conferencia pronunciada en las Jornadas Conmemorativas del Centenario de Juan Vilanova y Piera. 29 páginas.

(21) PEÑUELAS, L. (1851): *Ibidem*. Pág. 718.

(22) ANONIMO (1826). Pozos artesianos o fuentes de barrena. *Mercurio de España*, mayo pág. 292, septiembre pág. 186, noviembre pág. 393 y diciembre pág. 398.

(23) LOPEZ DE AZCONA, J. M. (1984): Joaquín Ezquerro del Bayo. *Industria Minera*, 236, 17-18. Pág. 18.

(24) BERTIN, L. (1965): *La Tierra nuestro planeta*. Ed. Labor. 568 pág. Barcelona. Pág. 93.

(25) RICHARD, A. (1880): *Los pozos artesianos en España, cartas dirigidas al eminente sabio Mr. Quatrefargas*. Trad. al castellano por MANUEL MAETZU. Imp. Antonio Reus. Alicante. Págs. 63-65.

(26) L'ABBE PARAMELLE (1859): *L'Art de Découvrir les sources*. 2ª Ed. corregida y aumentada. Chez Delmont et Dunod. París. Pág. 319.

(27) NAVARRO FERNANDEZ, L. (1909): *Pozos artesianos*. Ed. Manuales Gallach. Barcelona.

(28) NARANJO Y GARZA, F. (1850): Reconocimiento geológico de la cuenca del Guadiana. *Revista Minera*, 1, 65-82. Pág. 65 y Pág. 74.

(29) LINO PEÑUELAS (1850): *Ibidem*. Págs. 722 y 723.

(30) ECHEGARAY Y COSTA, J. DE (1851): *Memoria sobre las causas de la sequía de las provincias de Almería y Murcia, y de los medios de atenuar sus efectos*. Imp. del Minist. Comercio, Instrucción y Obras Públicas. 124 pág. Madrid.

(31) LOPEZ AZCONA, J. M. (1985): Las aguas subterráneas. *Industria Minera*, 246, 9-21. Pág. 12.

(32) GRANDE BLANCO, J. (1850): Máquinas de noria perfeccionadas en Madrid. *Revista Minera*, 1, 118-120.

(33) CERRO MALAGON, R. (1995): Abastecimiento y uso del agua en Toledo. En *Acerca del Tajo. Actuación integral sobre el Tajo a su paso por Toledo*, 197-221. Ed. Ayto. de Toledo. 255 páginas. Toledo.

(34) DAVIS, S. y DE WIEST, R. (1966): *Hidrology*. Ed. Jhon Wiley & Sons. 463 pág. Nueva York-Londres-Sidney.

(35) PRADO, C. DE (1864): *Descripción física y geológica de la provincia de Madrid*. Ed. Junta Gral. de Estadística.-Imp. Nal. 219 páginas. Madrid. Pág. 24.

(36) S. (1870): Carta geológica. *Revista Minera*, 21, 261-262. Pág. 262.

(37) ANONIMO (1871): Pozos artesianos en Murcia. *Revista Minera*, 22, 336-343.

(38) VILANOVA, J. (1878): Noticia acerca de un pozo artesiano en Alcalá de Chisvert. *Actas de la Sociedad Española de Historia Natural*, 7, 53. En contestación a una pregunta formulada por el académico PEREZ ARCAS, el autor describe el retraso del sondeo debido a las dificultades que hay para la construcción de los tubos y la dureza del terreno.

(39) RICHARD, A. (1880): *Ibidem*. Pág. 22.

(40) ANONIMO (1877): *Revista Minera*, XVIII. Pág. 238.

(41) VILANOVA Y PIERA, J. (1880): *Teoría y práctica de pozos artesianos y arte de alumbrar aguas*. Imp. y Fundición de M. Tello. Madrid. Pág. 519.

(42) CORTAZAR, D. (1885): Bosquejo físico-geológico y minero de la provincia de Teruel. *Boletín de la Comisión del Mapa Geológico de España*, XII, 263-607. Pág. 291.

(43) ANONIMO (1878): Las Conferencias Agrícolas y los Ingenieros de Minas. *Revista Minera*, 29, 57-58. Pág. 58.

(44) CORTAZAR, D. (1877): *Descripción geológica de la provincia de Valladolid*. Mem. de la Comisión del Mapa Geológico. 21 pág. Madrid. Pág. 80.

(45) ANONIMO (1876): Variedades. *Revista Minera*, XXVII, 122-123. Pág. 123.

(46) PRATS VILA, J. L. (1995): El hombre ante los problemas del agua en la historia contemporánea española. En *El hombre y el agua en la Geografía y en la Historia de España*, V, 195-245. Ed. FCC. 248 páginas. Madrid. Pág. 208.

(47) THOS Y CODINA, S. (1878): *Ibidem*.

(48) RICHARD, A. (1880): *Ibidem*. Pág. 74.

(49) VILANOVA, J. (1880): *Ibidem*. Pág. 518.

(50) MARTIN, M. (1880): El agua y los pozos artesianos. *Revista Minera*, XXXI, 26-28.

(51) MARTINEZ GIL, J. (1990): Historia de la Hidrogeología Española. *Curso de Conferencias sobre la Historia de la Geología*. Real Ac. de Cienc. Exac., Fis. y Naturales, 197-238. Madrid.

(52) VILANOVA (1880): *Ibidem*.

(53) BENTABOL Y URETA, H. (1880): Investigaciones subterráneas y alumbraamientos de aguas por medio de sondeos. *Revista Minera*, XXXI, 209-210, 225-227 y 241-242. Pág. 241.

(54) ZUAZNAVAR, M. (1880): Pozo artesiano de Vitoria. *Revista Minera*, XXXII, 329-330. Pág. 330.

(55) CORTAZAR, D. (1884): El pozo artesiano de Vitoria. *Boletín de la Comisión del Mapa Geológico*, IX, 57-70. Pág. 58.

(56) CORTAZAR, D. (1884): *Ibidem*. Pág. 70.

(57) MARTINEZ GIL, J. (1990): *Ibidem*. Pág. 204.

(58) MARTINEZ GIL, J. (1990): *Ibidem*. Pág. 207.

(59) CONTRERAS, A. (1900): Las aguas de España. *Revista Minera*, LI, 413-416. Pág. 415.

(60) CONTRERAS, A. (1900): *Ibidem*. Pág. 415.

(61) CORTAZAR, D. (1905): Noticia referente a estudios hidrogeológicos en

España. *Boletín de la Comisión del Mapa Geológico de España*, XXVIII, 177-206. Pág. 186.

(62) MESA Y RAMOS, J. (1909): *Pozos artesianos*. Est. Tip. de V. Tordesillas. 238 pág. Madrid. Pág. 55.

(63) JORDA, R. (1875): Reseña histórica sobre el modo de adquirir la propiedad de las aguas subterráneas en la comarca del campo de Tarragona, desde los tiempos antiguos hasta nuestros días. *Revista Minera*, XXVI, 109-111 y 121-123.

(64) ANONIMO (1877): Las Conferencias Agrícolas y los Ingenieros de Minas. *Revista Minera*, XXVIII, 66-69 y 73-76. Pág. 75.

(65) MARTINEZ GIL, J. (1990): *Ibidem*. Pág. 203.

# NORMAS DE PUBLICACION PARA LOS AUTORES

Los trabajos inéditos que se reciban para su publicación en el BOLETIN GEOLOGICO Y MINERO serán revisados por un Comité editorial que decidirá si procede su publicación.

Los autores deberán atenerse a las siguientes normas:

## Texto.

Se entregará paginado y mecanografiado a doble espacio por una sola cara y con amplios márgenes. Este texto se considerará definitivo, deberá venir leído por el autor y perfectamente puntuado y con las correcciones de las erratas de mecanografía que fuesen precisas. En él serán marcadas las fechas de recepción y aceptación.

Cuando en el trabajo se acompañen figuras, tablas y fotografías, el autor deberá dejar un pequeño espacio con indicación del lugar donde han de intercalarse, si es posible. En los originales de las mismas se reseñará el título del trabajo, así como el nombre de los autores.

Todos los trabajos en lengua española irán precedidos de un breve resumen en español e inglés o francés. Los de idiomas extranjeros lo llevarán en su idioma y también en español. Al final de los mismos, y en párrafo aparte, se incluirán las palabras clave, reservándose el último lugar para la localización geográfica, si la hubiere.

En todo momento los autores conservarán una copia del texto original y figuras.

## Idiomas.

Excepcionalmente podrán publicarse trabajos en otros idiomas (preferiblemente inglés o francés), siempre que abarquen temas sobre España y sean de autores extranjeros.

## Referencias.

Se incluirá al final de cada trabajo la relación de las obras consultadas por orden alfabético de autores, empleándose las normas y abreviaturas usuales.

## Parte gráfica.

La parte gráfica vendrá preparada para ser reproducida a las anchuras máximas de 80 mm. (una columna) y 170 mm. (doble columna). Se evitará en lo posible la inclusión de encartes, así como se reducirá a lo indispensable el número de figuras, tablas y fotografías. En las ilustraciones a escala, ésta se expresará solamente en forma gráfica, con objeto de evitar errores en caso de reducir el original. Todas las figuras irán numeradas correlativamente según su orden de inserción.

Las figuras serán originales y nunca copiativos, delineadas con tinta china sobre papel vegetal. Las tablas, bien presentadas para su reproducción fotográfica. Las fotografías serán positivos en blanco y negro sobre papel brillo y excepcionalmente en color (positivo en brillo o transparencia)

## Pruebas.

Serán enviadas a los autores para que realicen las correcciones de erratas de imprenta producidas en la composición, no admitiéndose modificación alguna, adición o supresión al texto original.

Las pruebas serán devueltas por el autor en el plazo máximo de diez días, pasados los cuales la Redacción decidirá entre retrasar el trabajo o realizar ella misma la corrección, declinando la responsabilidad por los errores que pudieran persistir.

Los originales de texto y figuras quedarán en poder de la Redacción.

## Tiradas aparte.

Se asignan 30 tiradas aparte con carácter gratuito por trabajo publicado. Cuando el autor desee un número mayor del indicado deberá hacerlo constar por escrito en las pruebas y abonar el precio de este excedente.

La Redacción del BOLETIN GEOLOGICO Y MINERO introducirá cuantas modificaciones sean necesarias para mantener los criterios de uniformidad y calidad del mismo. De estas modificaciones se informará al autor.

## TARJETA DE SUSCRIPCION AL BOLETIN GEOLOGICO Y MINERO

### Boletín Geológico y Minero

Revista bimestral de geología, minería y ciencias conexas

Precio suscripción anual (6 números). Año 1996: 6.000 ptas. Igual precio para años anteriores.

### DIRECCION Y ADMINISTRACION

### Instituto Tecnológico Geominero de España

Ríos Rosas, 23 - 28003 - Madrid. España.

Teléf./Fax (91) 349 57 62

Nombre .....

Organismo o Empresa .....

Dirección ..... Teléfono .....

Ciudad ..... C.P. ....

País ..... FIRMA .....

Fecha .....

## BOLETIN GEOLOGICO Y MINERO

### ACUSE DE RECIBO

HEMOS RECIBIDO  
WE HAVE RECEIVED  
NOUS AVONS RECU

NOS FALTA  
WE ARE IN WANT OF  
IL NOUS MANQUE

FECHA ..... FIRMA .....  
DATE ..... SIGNATURE .....

NOMBRE .....  
NAME .....  
NOM .....

DIRECCION .....  
ADDRESS .....  
ADRESSE .....

ROGAMOS DEVUELVAN ESTE ACUSE DE RECIBO, NECESARIO PARA NUESTRO CONTROL, DIRIGIDO EXCLUSIVAMENTE A AQUELLOS CENTROS QUE RECIBEN ESTA PUBLICACION CON CARACTER GRATUITO EN REGIMEN DE INTERCAMBIO.

Toda la correspondencia referente a las publicaciones  
deberá dirigirse a:

Leopoldo Aparicio Ladrón de Guevara  
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

#### Sede Central:

C/Ríos Rosas, 23 - 28003 MADRID  
☎: 91/349 57 00. Fax: 91/349 57 62

#### Centro de Laboratorios:

C/La Calera, 1 - 28760 TRES CANTOS (MADRID)  
☎: 803 22 00