



Instituto Tecnológico  
GeoMinero de España

**boletín**

**geológico**

**y minero**

VOLUMEN 107

Enero - Febrero 1996

NUMERO 1





Volumen 107

Número 1

Enero-Febrero 1996

# boletín geológico y minero



10 OCT 1996

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

## Sumario

<b>Geología</b>	M. ARBIZU, I. RABANO y J. TRUYOLS: Trilobites del Museo Geominero. II. Las colecciones antiguas del Devónico de la Cordillera Cantábrica (N. España) ... .. 3
	A. PINEDA VELASCO: El enlace y la paleogeografía neógena entre las Cuen- cas del Duero y del Ebro en La Bureba (Burgos) ... .. 14
	J. J. MUÑOZ PEREZ, J. M. GUTIERREZ MAS y J. M. PARRADO ROMAN: Estu- dio del movimiento de sedimentos en la playa de "Regla" (Chipiona-Cá- diz), mediante el uso de trazadores fluorescentes ... .. 29
	E. BARRON: Caracterización del género <i>Acer</i> Linné (Magnoliophyta) en el Va- llesiense (Neógeno) de la comarca de la Cerdaña (Lérida, España) ... .. 38
<b>Aguas Subterráneas</b>	J. A. LOPEZ GETA y J. M. MURILLO DIAZ: Optimización y tratamiento integral de recursos hídricos ... .. 55
	C. ALMECIJA, J. BENAVENTE y C. SANZ DE GALDEANO: Direcciones de dre- naje en la vertiente sur de Sierra Almirajara (Málaga). Influencia de la frac- turación ... .. 69
<b>Estudio de Minerales y Rocas</b>	M. PELAYO, L. PEREZ DEL VILLAR y J. S. COZAR: Caracterización mineralógi- ca y geoquímica de los rellenos de fracturas del macizo de El Berrocal (Sie- rra de Gredos) en relación con los procesos de migración/retención de los radionucleidos naturales ... .. 75
<b>Información</b>	O. PUCHE RIART, L. F. MAZADIEGO y M. MARTIN DIEZ: Los procesos de Amal- gamación a través de los tiempos ... .. 90

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

*Panderia beaumonti* (Rouault), exuvio completo con librigena desplazada, del Dobrotiviense superior de Los Pozuelos de Calatrava (Ciudad Real). Colección Museo Geominero

Foto: Uly Martín

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

## Trilobites del Museo Geominero. II. Las colecciones antiguas del Devónico de la Cordillera Cantábrica (N. España).

Por M. ARBIZU (\*), I. RABANO (\*\*) y J. TRUYOLS (\*)

#### R E S U M E N

Se cataloga y actualiza taxonómicamente la colección histórica de trilobites del Devónico cantábrico del Museo Geominero, que se encuentra formada por 244 ejemplares de los órdenes Phacopida, Corynexochida, Odontopleurida, Proetida y Ptychopariida. El origen de la colección se remonta aproximadamente a 1850, y procede de los trabajos de la Comisión del Mapa Geológico de España. Entre los recolectores y estudiosos de la misma se cuentan a PRADO y MALLADA en sus fases iniciales, y a HERNANDEZ SAMPELAYO en una época posterior.

**Palabras clave:** Catálogo, Colecciones históricas, Trilobites, Devónico, Museo Geominero.

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

The historical collection of Cantabrian Devonian trilobites from the Geominero Museum is catalogued and taxonomically updated. It is composed by 244 specimens of the orders Phacopida, Corynexochida, Odontopleurida, Proetida and Ptychopariida. The collection was initiated in 1850 during the works of the Spanish Geological Map Commission, and among the collectors and researchers who formed it, it is worthy to mention PRADO and MALLADA during the first times of the commission, and HERNANDEZ SAMPELAYO subsequently.

**Key words:** Catalogue, Historical collections, Trilobites, Devonian, Geominero Museum.

#### INTRODUCCION

En la colección de trilobites españoles del Museo Geominero se conserva un importante número de ejemplares procedentes de localidades devónicas de la vertiente meridional de la Cordillera Cantábrica. Entre éstos, destacan notablemente los trilobites recogidos en el siglo pasado, durante los trabajos llevados a cabo por los miembros de la antigua Comisión de la Carta Geológica (1849-1859) y por los componentes de la llamada "brigada geológica" de la Junta General de Estadística (1859-1868), que relevaron a aquéllos en su cometido.

(\*) Departamento de Geología, Facultad de Geología, Universidad de Oviedo, Arias de Velasco s/n, 33005 Oviedo.

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

En este trabajo se aborda la revisión taxonómica y bioestratigráfica de la mayor parte de los elementos pertenecientes a esta colección antigua, entre los que era patente la mezcla de ejemplares procedentes de diferentes yacimientos y formaciones, así como identificaciones obsoletas o erróneas.

#### ORIGEN E HISTORIA DE LA COLECCION

La referencia más antigua de la colección de trilobites examinada consta en un registro manuscrito de los primeros ejemplares ingresados en la institución. Dicho registro, probablemente obra de LUCAS MALLADA y sin fechar, lleva por título "Catálogo general de las especies existentes en la Comisión del Mapa Geológico de España". La Comisión a la que se refiere el docu-

mento corresponde a la institución antecesora del actual Instituto Tecnológico Geominero de España, vigente entre los años 1850 y 1910. En este periodo, las colecciones se ubicaron en el antiguo Palacio del Duque de San Pedro (calle Florín nº 2), contiguo a la madrileña Carrera de San Jerónimo, siendo trasladadas hacia 1870 al

Convento de la Trinidad, situado en la calle Isabel la Católica nº 23, y pocos años después, a la Plaza de los Mostenses nº 2 de Madrid.

El catálogo de la Comisión del Mapa Geológico de España está ordenado por provincias y en alguna de ellas figura un apartado especial bajo el epígrafe "Fósiles procedentes de Estadística, recogidos por Prado", referido a las provincias de León (págs. 151-166) y Palencia (págs. 203-215) (Fig. 1). Entre el numeroso material registrado en estos apartados, figuran 31 trilobites devónicos de diversos yacimientos de la provincia de León, entre los que destaca especialmente la localidad clásica de Colle (pág. 153); y 8 ejemplares de varios puntos del norte de la provincia de Palencia (pág. 203). Los trilobites procedentes de la provincia de León, tal como constan en el catálogo, son los siguientes: *Proetus?* (2 ejemplares), *Harpes* (2), *Phacops latifrons* BRONN (7), *Dalmanites calliteles* GREEN (8), *Dalmanites?* (1), *Acidaspis* (1), *Homalonotus pradoanus* VERN. (1), *Bronteus flabellifer* GOLDFUSS (2), *Bronteus* (1), *Hipostomo* (sic) (1).

Los ejemplares procedentes de yacimientos palentinos son los siguientes: *Phacops latifrons* BRONN (2), *Dalmanites laciniata* ROEMER (1), *Dalmanites calliteles* GREEN (1), *Dalmanites* (1), *Homalonotus* (3).

El número de ejemplares registrados en el catálogo (39) es mucho menor que el total de la colección conservada en el Museo (244), lo que lógicamente hace pensar que si ésta estuvo constituida inicialmente por el material "recogido por PRADO", fue nutriéndose con nuevos ejemplares en años sucesivos. Probablemente los fósiles de PRADO fueron recolectados no

mucho antes de 1850 ni mucho después de 1857. La primera de estas fechas corresponden al año de la publicación de su estudio geológico de la región leonesa de Sabero (PRADO, 1850), donde descubrió el célebre yacimiento de Colle y otros de su misma edad, y cuyo material paleontológico constituye la base de la conocida monografía de VERNEUIL (1850). Es de suponer que PRADO habría recogido por su cuenta algunos ejemplares de aquellos yacimientos, aunque los hallazgos que sirvieron a VERNEUIL para las descripciones que figuran en su trabajo, no fueron entregados a la Comisión de la Carta Geológica, ya que se depositaron en el museo de la Escuela de Minas de París (BARRANDE, 1873) (no se trataba de un estudio oficial, sino de la empresa industrial que explotaba el carbón de aquella cuenca). Las colecciones paleontológicas de este centro se encuentran depositadas actualmente en el Centro de Ciencias de la Tierra de la Universidad Claude-Bernard de Lyon (Francia), donde únicamente ha sido reencontrado un "sintipo" correspondiente a "*Homalonotus pradoanus*", no figurado en el trabajo de VERNEUIL (1850).

Por otra parte, el material palentino mencionado en el catálogo pudo ser recolectado por PRADO pocos años más tarde, cuando estaba preparando el mapa geológico de la parte norte de la provincia de Palencia, que fue publicado por la Junta de Estadística en 1861, si bien consta en su leyenda que su elaboración finalizó en 1857 (PRADO, 1861).

Las recolecciones de trilobites en ambas provincias debieron efectuarse pues durante la década de 1850, iniciándose tal vez ligeramente antes de este año y finalizándose no más tarde de 1857. Con seguridad, para la determinación de los fósiles palentinos, PRADO debió valerse de la monografía de VERNEUIL aparecida en 1850, puesto que todas las especies citadas en el registro figuran entre las reconocidas en la región por este autor (salvo uno de ellas, "*Dalmanites laciniata*").

Sin embargo, en la colección del Museo existe un número mucho más elevado de ejemplares de los que corresponderían en el registro de MALLADA a las mismas especies. Así, de

"*Homalonotus pradoanus*" (= *Burmeisteria pradoana*) figura un sólo ejemplar en el registro y en cambio se han identificado 15 ejemplares en la colección actual; de "*Dalmanites calliteles*" (= *Pilletina collensis*), 8 ejemplares de León y 2 de Palencia, mientras en la colección existen 13; de "*Phacops latifrons*" (= *Phacops saberensis*), 7 de León y 2 de Palencia, frente a 17 en la colección. Otro tanto ocurre con el resto de especies citadas en el catálogo y reconocidas por nosotros en la colección. Estos hechos confirman nuestra suposición de que, junto a los fósiles que depositó PRADO, debieron ingresar más tarde ejemplares de otras procedencias. En concreto, varias formas corresponden a una especie (*Bronteus castroi*) creada por el propio MALLADA en el primer tomo de su *Sinopsis* (1875), lo que permite al menos afirmar que MALLADA fue también otro de los donantes de material trilobítico que nutrió la colección con nuevas aportaciones.

El origen plural de la colección viene acreditado además por la diversidad de etiquetas y tipos de letra diferente encontrados en las distintas cajas donde se guardaban los ejemplares. Tras un examen caligráfico superficial, parece probable que un número determinado de muestras fue etiquetado de puño y letra por el propio MALLADA, las cuales deben corresponder a material obtenido durante algunas de sus campañas en la provincia de León realizadas durante esa época. Pero no deja de resultar curioso que un cierto número de ejemplares de la colección no figuren en ninguna de sus publicaciones, como puede comprobarse además si consultamos el *Catálogo* que publicó MALLADA en 1891, donde se da la relación de todas las especies conocidas hasta el momento en nuestro país. Se trata pues de formas inéditas para determinados yacimientos, y por ello su cita en el presente trabajo puede poseer un cierto interés.

La colección debió ser revisada varias veces a lo largo de los años. La misma diversidad de etiquetas, con distinto tipo de rotulación, y la existencia de identificaciones diferentes para una misma muestra, así como la mezcla de ejemplares procedentes de varias formaciones y yacimientos, nos hace pensar que la colección sufrió varias revisiones con el tiempo, efectuadas por personas que tuvieron acceso a la misma.

León.

I. Fósiles procedentes de Estadística, recogidos por Prado.

Num.	Nomenclatura	Terrena	Localidad	Observaciones
1	<i>Paradiplos Bradanus</i> , Verneuil	Verneuil	Abrados	
2	<i>Paradiplos Bradanus</i> , Verneuil	Verneuil	Comillas	
3	<i>Paradiplos Bradanus</i> , Verneuil	Verneuil	Crimenes	
4	<i>Paradiplos Bradanus</i> , Verneuil	Verneuil	El Soborón	
5	<i>Paradiplos Bradanus</i> , Verneuil	Verneuil	Pimajo	
6	<i>Paradiplos Bradanus</i> , Verneuil	Verneuil	Valdón	
7	<i>Paradiplos Bradanus</i> , Verneuil	Verneuil	Sabero	
8	<i>Paradiplos Bradanus</i> , Verneuil	Verneuil	Vosmediano	
9	<i>Paradiplos Bradanus</i> , Verneuil	Verneuil	Vosmediano	
10	<i>Paradiplos Bradanus</i> , Verneuil	Verneuil	La Vella	
11	<i>Paradiplos Bradanus</i> , Verneuil	Verneuil	Alto	
12	<i>Paradiplos Bradanus</i> , Verneuil	Verneuil	Sabero	
13	<i>Paradiplos Bradanus</i> , Verneuil	Verneuil	Abrados	
14	<i>Paradiplos Bradanus</i> , Verneuil	Verneuil	Loredo	
15	<i>Paradiplos Bradanus</i> , Verneuil	Verneuil	Corniero	
16	<i>Paradiplos Bradanus</i> , Verneuil	Verneuil	Crimenes	
17	<i>Paradiplos Bradanus</i> , Verneuil	Verneuil	El Soborón	
18	<i>Paradiplos Bradanus</i> , Verneuil	Verneuil	Pimajo	
19	<i>Paradiplos Bradanus</i> , Verneuil	Verneuil	Sabero	
20	<i>Paradiplos Bradanus</i> , Verneuil	Verneuil	Valdón	
21	<i>Paradiplos Bradanus</i> , Verneuil	Verneuil	Vosmediano	
22	<i>Paradiplos Bradanus</i> , Verneuil	Verneuil	Loredo	
23	<i>Paradiplos Bradanus</i> , Verneuil	Verneuil	Crimenes	
24	<i>Paradiplos Bradanus</i> , Verneuil	Verneuil	El Soborón	
25	<i>Paradiplos Bradanus</i> , Verneuil	Verneuil	Valdón	
26	<i>Paradiplos Bradanus</i> , Verneuil	Verneuil	La Vella	
27	<i>Paradiplos Bradanus</i> , Verneuil	Verneuil	Vosmediano	
28	<i>Paradiplos Bradanus</i> , Verneuil	Verneuil	Sabero	

Figura 1. Página nº 151 del "Catálogo General de las Especies fósiles existentes en la Comisión del Mapa Geológico" (Museo Geominero, ITGE), correspondiente a parte de los fósiles recogidos por D. CASIANO DE PRADO en la provincia de León.

Es de suponer que P. HERNANDEZ SAMPELAYO, experto del Instituto Geológico y Minero de España en fósiles paleozoicos, intervino en algún momento en la revisión o el incremento de esta colección, ya que fue él la persona encargada de formar el Museo en su emplazamiento actual a partir de 1927.

#### RESULTADOS DE LA REVISION

La colección estudiada comprende 244 restos de trilobites, conservados en el momento de la intervención en la litoteca del Museo y en una pequeña parte expuestos al público. Algo menos de la mitad de los ejemplares (115) carecían de identificación taxonómica precisa, y 5 eran considerados únicamente a nivel de clase, como Trilobites.

La determinación del material no ha comportado excesivos problemas al compararlo con el obtenido por otros paleontólogos o por nosotros mismos de los yacimientos que constan en las correspondientes etiquetas (ARBIZU, 1978, 1979, 1982; SMEENK, 1983). Por otra parte, el conocimiento directo de la práctica totalidad de las localidades citadas, nos ha permitido comprobar las procedencias asignadas, así como precisar su edad en la mayor parte de los casos.

Del total de ejemplares estudiados, 120 restos corresponden al orden Phacopida, 45 al ?Corynexochida (Scutelluina), 15 son Odontopleurida, 63 al Proetida y uno al Ptychopariida (Harpina). Se han realizado 39 identificaciones diferentes, en su mayoría pertenecientes a los dos primeros órdenes citados, en tanto que los proétidos y los odontopleuridos se han dejado en nomenclatura abierta en espera de una revisión más pormenorizada.

Si consideramos la procedencia del material, la mayoría de las muestras llevan la indicación de Colle (León) y fueron recogidas con seguridad en dos puntos diferentes de los alrededores de este pueblo: uno de ellos está situado sobre el antiguo camino de Colle a Vozmediano, y el otro a media distancia entre Colle y el punto anterior. Ambos yacimientos, que no se corresponden con el que actualmente viene siendo considerado como "clásico" en Colle, habrían librado en

el siglo pasado el abundante material de trilobites de la colección examinada (el llamado "yacimiento clásico" de Colle ha proporcionado una cantidad más bien discreta de trilobites). La primera de las dos localidades corresponde al yacimiento 31 de ARBIZU (1979), equivalente al punto L3 de SMEENK (1983), y constituye la localidad tipo de la especie *Pilletina collensis* ARBIZU, 1979. El segundo yacimiento (número 32 de ARBIZU, 1979, y localidad L5 de SMEENK, 1983), destaca por la presencia de las especies *Phacops saberensis* MORZADÉC, 1970, *Burmeisteria pradoana* (VERNEUIL, 1850) y *Platyscutellum castroi* (MALLADA, 1875), tratándose de la localidad tipo donde fueron descritas por vez primera estas tres formas. El resto de los yacimientos que constan en las etiquetas ha librado un número menor de ejemplares, comprendiendo tres localidades palentinas (Lebanza, Cueto de Polentinos y Mudá), y al menos otras cuatro leonesas (Aleje, Aviados, Collado de Llama y La Valcueva).

#### CATALOGO DE LA COLECCION

Los resultados se presentan siguiendo un orden paleontológico-sistemático, indicando, cuando procede, la antigua identificación con la que constaban algunos ejemplares concretos en la colección del Museo.

Orden PHACOPIIDA SALTER, 1864  
Suborden PHACOPINA STRUVE, 1959  
Superfamilia DALMANITACEA VOGDES, 1890  
Familia DALMANITIDAE VOGDES, 1890  
Subfamilia ASTEROPYGINAE DELO, 1935

#### *Pilletina collensis* ARBIZU, 1979 (Lám. 1, figs. 1-3)

*Material:* 480D (pigidio), 481D (ejemplar enrollado), 482D (ejemplar completo), 803D (cefalón+tórax), 804D (tórax+pigidio), 805D (ejemplar incompleto), 806D (ejemplar incompleto), 807D (cefalón incompleto), 808D (pigidio), 809D (ejemplar incompleto), 810D (cefalón+tórax), 811D (cefalón incompleto), 812D (cranidio incompleto), 813D (cranidio incompleto), 814D (cranidio incompleto), 815D (cefalón+tórax enro-

lado), 816D (ejemplar enrollado incompleto), 951D (ejemplar enrollado).  
*Procedencia:* Ocejo de la Peña (León) (482D), Colle (León) (resto).  
*Posición estratigráfica:* Formación La Vid, Emsiense inferior.  
*Antigua identificación:* *Dalmanites calliteles* GREEN (ejemplar 806D).

#### *Pilletina* sp.

*Material:* 817D (cranidio incompleto), 818D (cranidio incompleto).  
*Procedencia:* Colle (León).  
*Posición estratigráfica:* Formación La Vid, Emsiense inferior.  
*Antigua identificación:* *Phacops latifrons* BRONN (ejemplar 817D).

#### *Pilletina?* sp.

*Material:* 819D (pigidio incompleto).  
*Procedencia:* Desconocida.  
*Posición estratigráfica:* Formación La Vid.

#### *Alcaldops alcaldei* ARBIZU, 1979 (Lám. 1, fig. 6)

*Material:* 802D (Cefalón+tórax).  
*Procedencia:* Aleje (León).  
*Posición estratigráfica:* Formación Huergas, Eifeliense.

#### *Heliopyge asturica* HAAS, 1979

*Material:* 820D (pigidio incompleto).  
*Procedencia:* Collado de Llama (León).  
*Posición estratigráfica:* Formación Portilla, Frasnense inferior.

#### *Treveropyge iberica* GANDL, 1972 (Lám. 1, fig. 10)

*Material:* 821D (pigidio), 822D (cefalón), 823 (cefalón incompleto).  
*Procedencia:* Colle (León).  
*Posición estratigráfica:* Formación La Vid, Emsiense inferior.  
*Antigua identificación:* *Dalmanites calliteles* GREEN (ejemplar 821D, 822D).

#### *Kyserops obsoletus* GANDL, 1972 (Lám. 1, fig. 7)

*Material:* Pigidios 824.1D, 825D, 826D, 827D, 828D, 829D, 830D, 831D, 832D, 833D, 834D, 835D, 836D, 837D, 838D.  
*Procedencia:* Colle (León).  
*Posición estratigráfica:* Formación La Vid, Emsiense inferior.

#### *Kyserops* cf. *obsoletus* GANDL, 1972

*Material:* 839D (cranidio incompleto), 840D (cranidio incompleto), 841D (cefalón incompleto), 842D-844D (cranidios incompletos).  
*Procedencia:* Colle (León).  
*Posición estratigráfica:* Formación La Vid, Emsiense inferior.

#### *Kyserops* sp.

*Material:* 845D-846D (cranidios), 847D (ejemplar incompleto), 985.2 (cranidio).  
*Procedencia:* Colle (?).  
*Posición estratigráfica:* Formación La Vid.

#### *Delocare dalii* SMEENK, 1983 (Lám. 1, fig. 12)

*Material:* 848D (pigidio).  
*Procedencia:* Colle (León).  
*Posición estratigráfica:* Formación La Vid, Emsiense inferior.

#### *Delocare rostrata* ARBIZU, 1979

*Material:* 849D (cranidio incompleto), 850D (pigidio).  
*Procedencia:* Colle (León).  
*Posición estratigráfica:* Formación La Vid, Emsiense inferior.

#### *Greenops (Greenops)* sp.

*Material:* 851D (ejemplar enrollado).  
*Procedencia:* Aleje (León).  
*Posición estratigráfica:* Formación Huergas, Eifeliense.

***Greenops (Neometacanthus) perforatus***  
(MORZADEC, 1969)  
(Lám. 1, fig. 11)

**Material:** 852.1D-854D (ejemplares completos), 855D-856D y 890D (pigidios), 891D (cefalón+tórax).

**Procedencia:** Aleje (León).

**Posición estratigráfica:** Formación Huergas, Eifeliense.

***Pseudocryphaeus* sp.**

**Material:** 857D-858D (cranidios incompletos).

**Procedencia:** Colle (León).

**Posición estratigráfica:** Formación La Vid, Emsiense inferior.

***Bradocryphaeus* sp.**

**Material:** 859D (pigidio).

**Procedencia:** La Valcueva (León).

**Posición estratigráfica:** Formación Portilla, Givetiense.

***Asteropyginae* indet.**

**Material:** 861D-1069D (pigidios incompletos).

**Procedencia:** Desconocida.

Familia SYNPHORIIDAE DELO, 1935  
Subfamilia MALLADAIINAE ARBIZU, 1978

***Malladaia luciae* OEHLERT & OEHLERT, 1896**  
(Lám. 1, figs. 8-9)

**Material:** 862D (cefalón+tórax), 863D (cefalón).

**Procedencia:** Aviados (León).

**Posición estratigráfica:** Formación Santa Lucía, Emsiense superior.

**Antigua identificación:** *Phacops latifrons* BRONN (ejemplar 863D).

Superfamilia PHACOPACEA HAWLE & CORDA, 1847

Familia PHACOPIDAE HAWLE & CORDA, 1847  
Subfamilia Phacopinae HAWLE & CORDA, 1847

***Phacops saberensis* MORZADEC, 1970**  
(Lám. 1, figs. 4-5)

**Material:** 475D (ejemplar completo), 478D (ejemplar incompleto), 824.2D (cefalón), 864D-868D (ejemplares enrollados), 869D-872D (cefalones), 873D (pigidio), 945D (tórax+pigidio).

**Procedencia:** Corniero (León) (ejemplar 475D), Colle y Villallandre? (León) (resto).

**Posición estratigráfica:** Formación La Vid, Emsiense inferior.

***Phacops* cf. *saberensis* MORZADEC, 1970**

**Material:** 477D (cefalón), 874.1-2D, (pigidios).

**Procedencia:** Valdoré (León) (477D), Colle (León) (874.1-2D).

**Posición estratigráfica:** Formación La Vid, Emsiense inferior.

***Phacops* sp.**

**Material:** 852.2D (cefalón+tórax), 876D-877D (cefalones), procedentes de Aleje (León) (Formación Huergas, Eifeliense). 878D (tórax+pigidio) (Formación La Vid ?). 875D (cefa-

**LAMINA 1**

Figs 1-3. *Pilletina collensis* ARBIZU, 1979. Ejemplares completo (1, MGM-482D, x 1,1), incompleto (2, MGM-805D, x 1,7) y enrollado incompleto (3, MGM-816D, x 2). Colle (León).

Figs. 4-5. *Phacops saberensis* MORZADEC, 1970. Ejemplares completo (4, MGM-475D, x 1,5) y enrollado (5, MGM-865D, x 2), procedentes de Corniero (fig. 4) y Colle (fig. 5), en la provincia de León.

Fig. 6. *Alcaldops alcaldei* ARBIZU, 1979. Cefalón + tórax, MGM-802D, x 1,1. Aleje (León).

Fig. 7. *Kayserops obsoletus* GANDL, 1972. Pigidio MGM-825D, x 4. Colle (León).

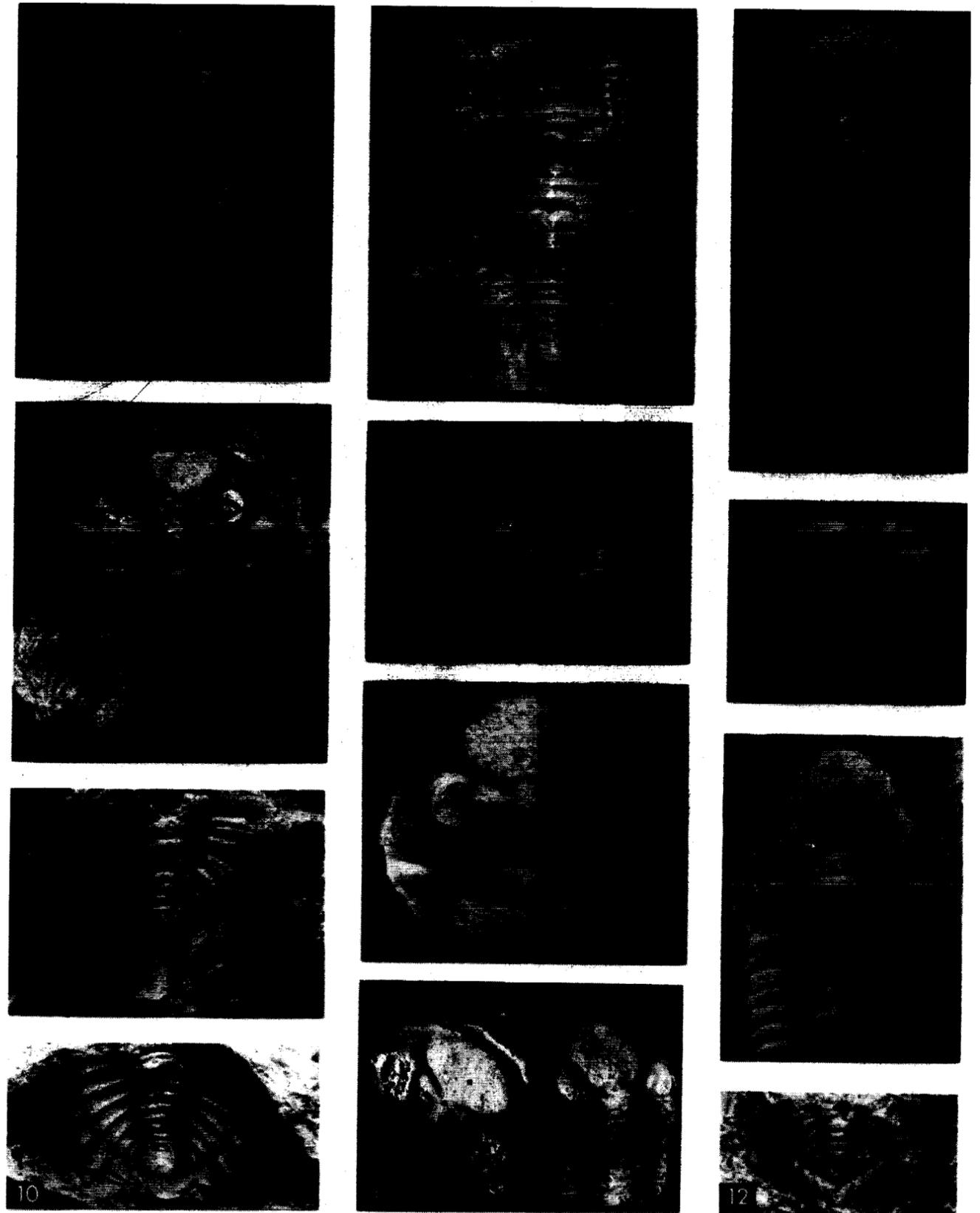
Figs. 8-9. *Malladaia luciae* OEHLERT & OEHLERT, 1896. Cefalón (8, MGM-863D, x 2,5) y cefalón + tórax (9, MGM-862D, x 2). Aviados (León).

Fig. 10. *Treveropyge iberica* GANDL, 1972. Pigidio MGM-821D, x 3. Colle (León).

Fig. 11. *Greenops (Neometacanthus) perforatus* (MORZADEC, 1969). Ejemplar completo (MGM-852.1D) junto a un cefalón + tórax de *Phacops* sp. (MGM-852.2D). Aleje (León), x 2.

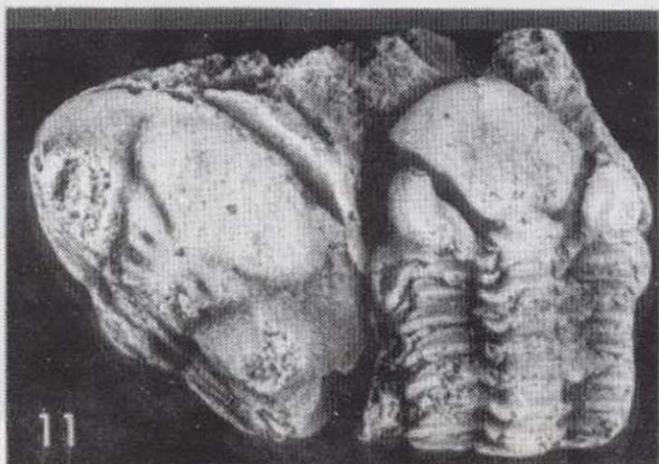
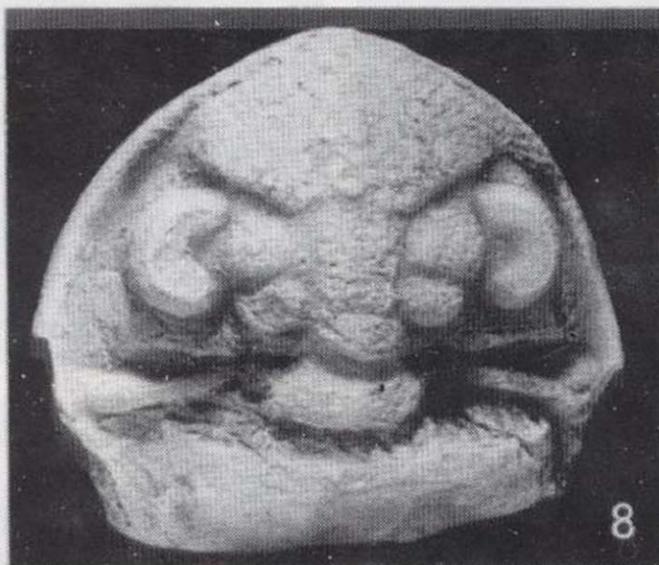
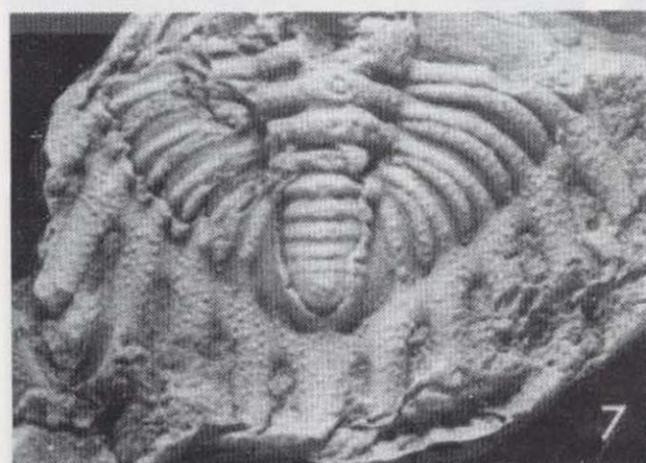
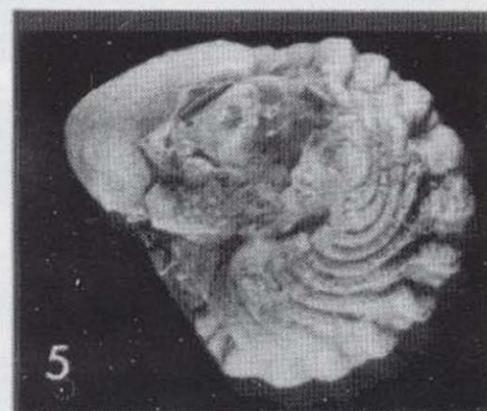
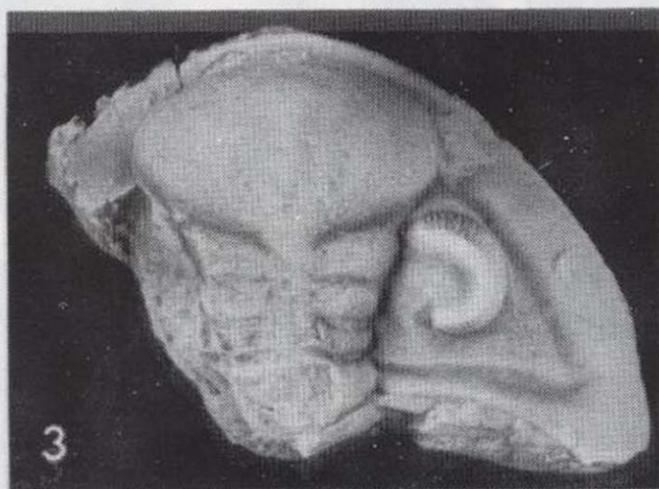
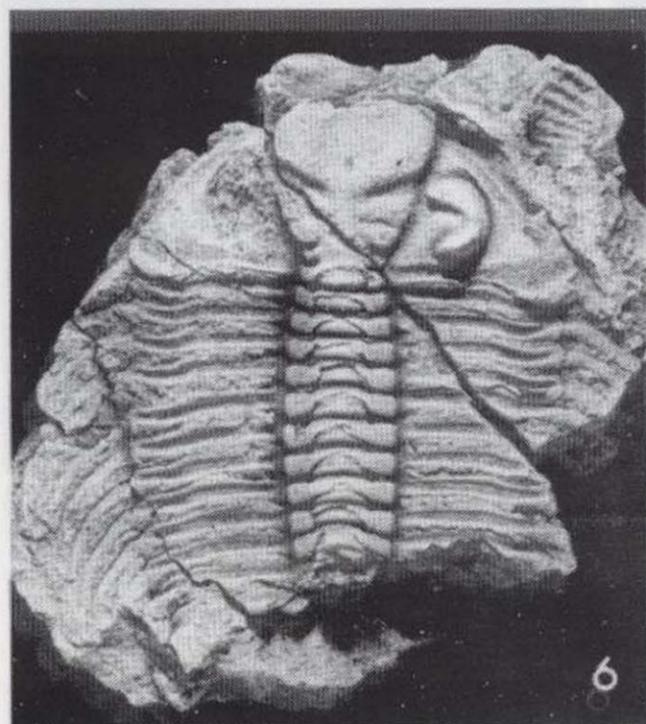
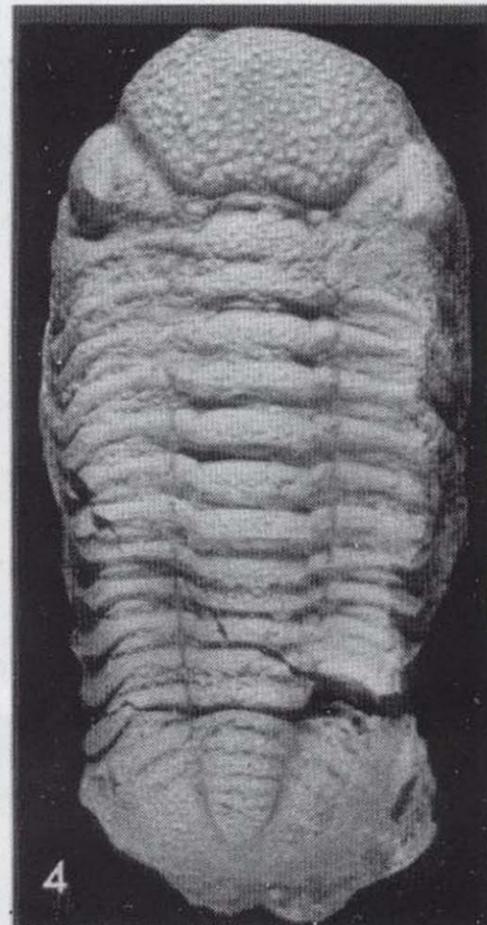
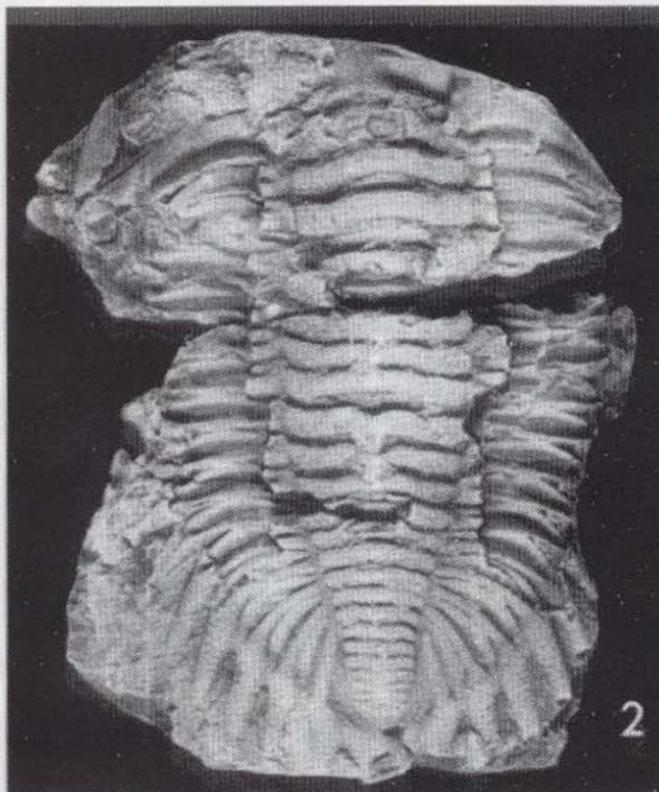
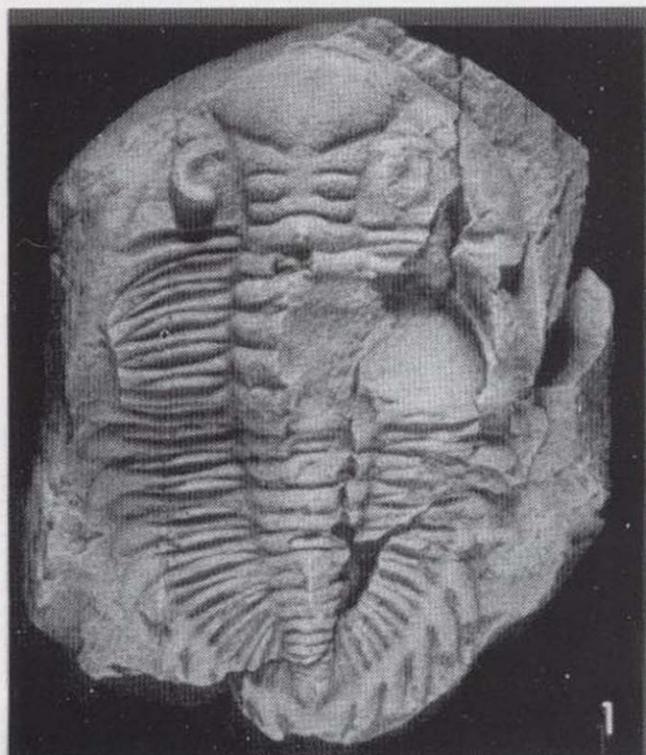
Fig. 12. *Delocare dali* SMEENK, 1983. Pigidio MGM-848D (x 4,5). Colle (León).

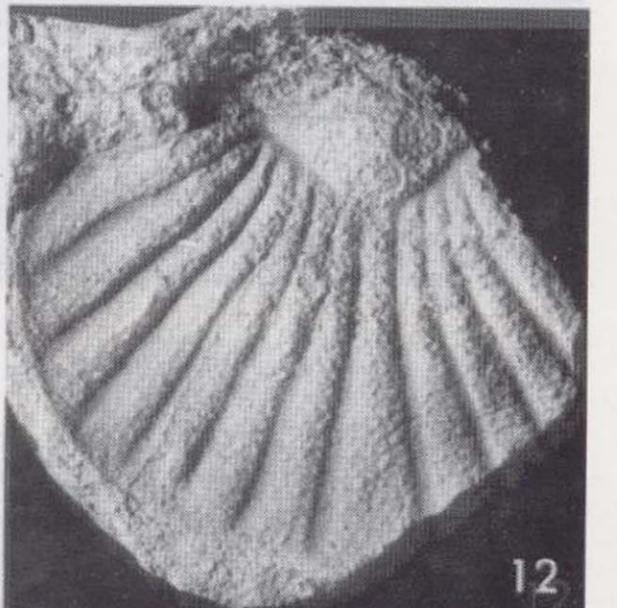
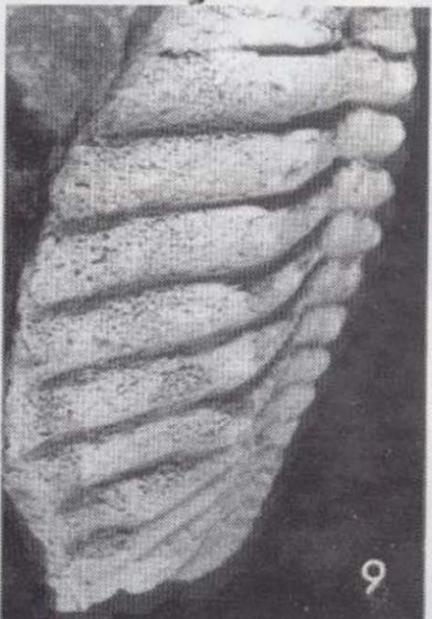
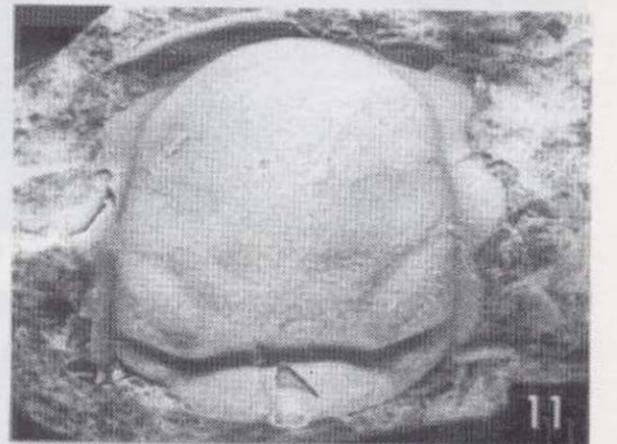
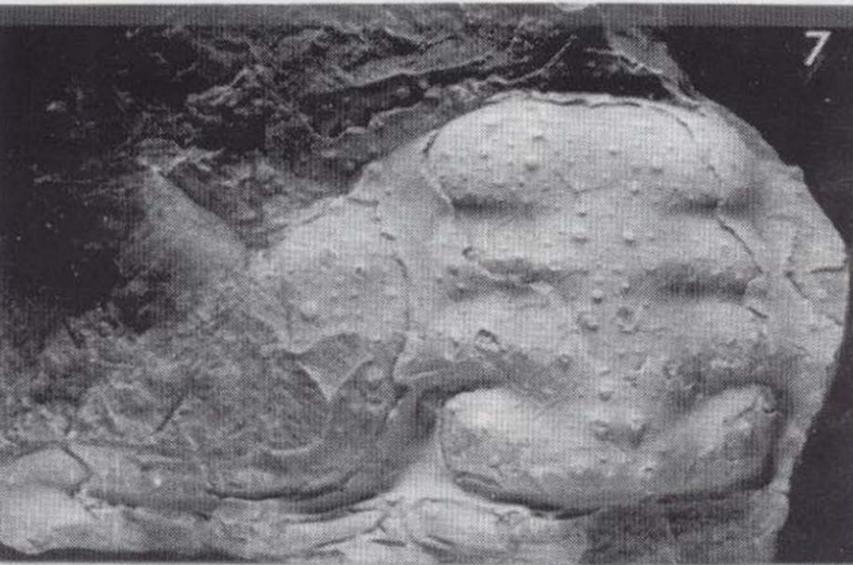
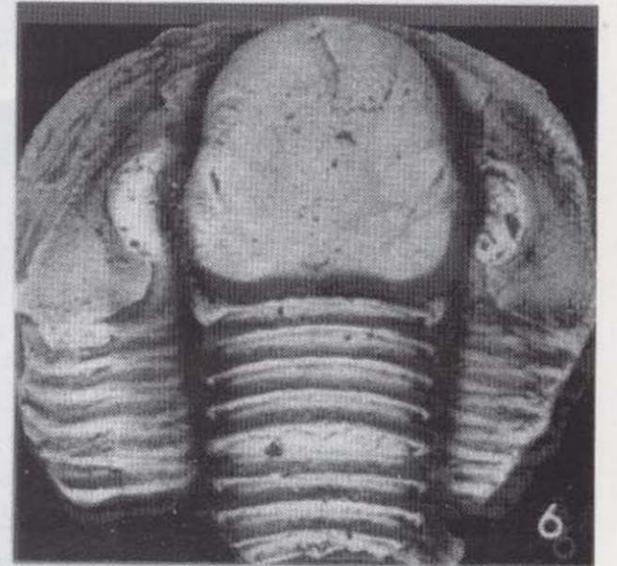
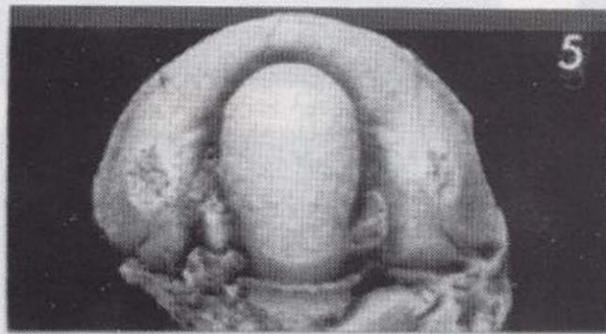
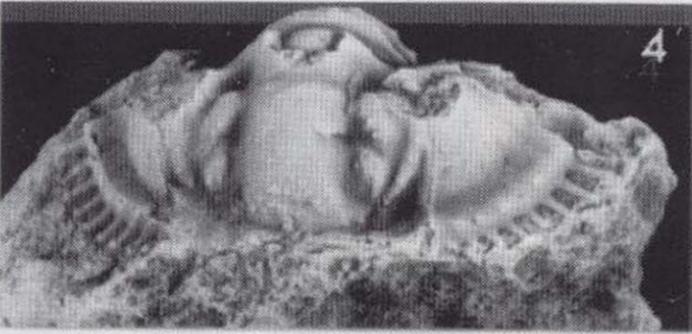
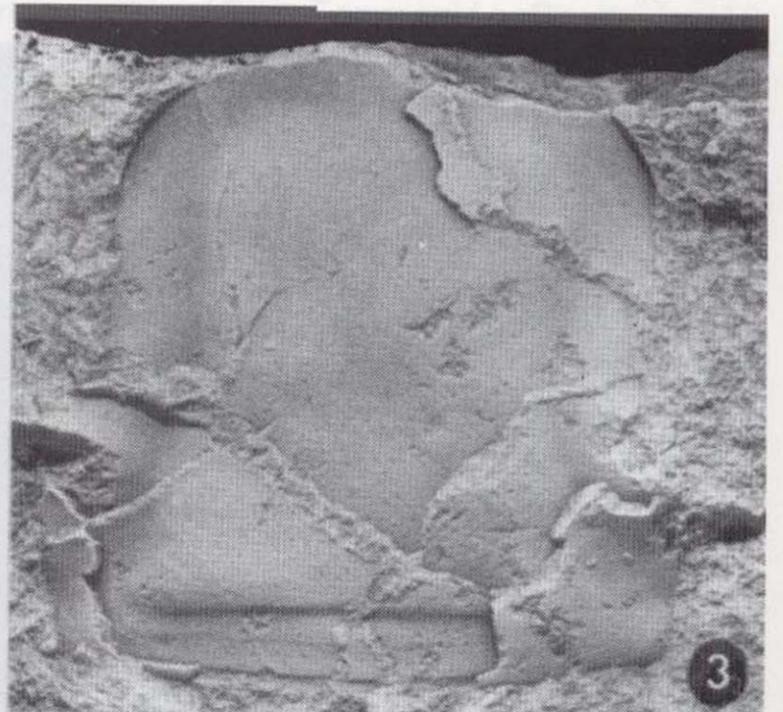
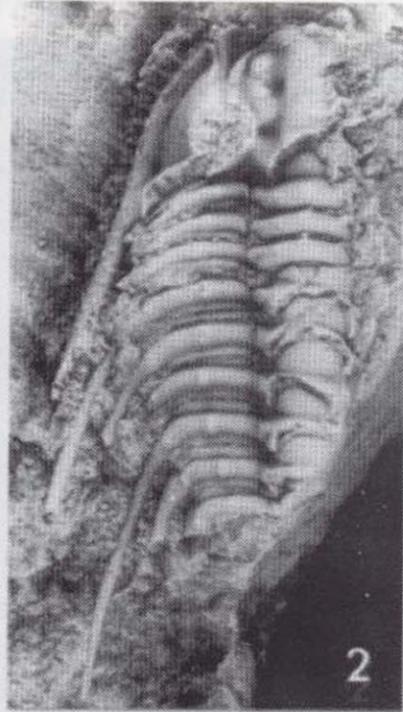
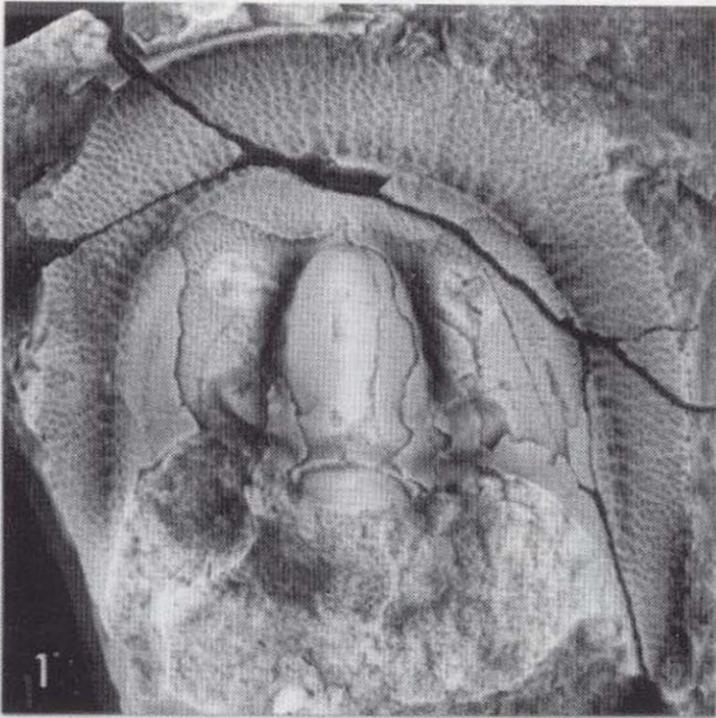
**LAMINA 1**



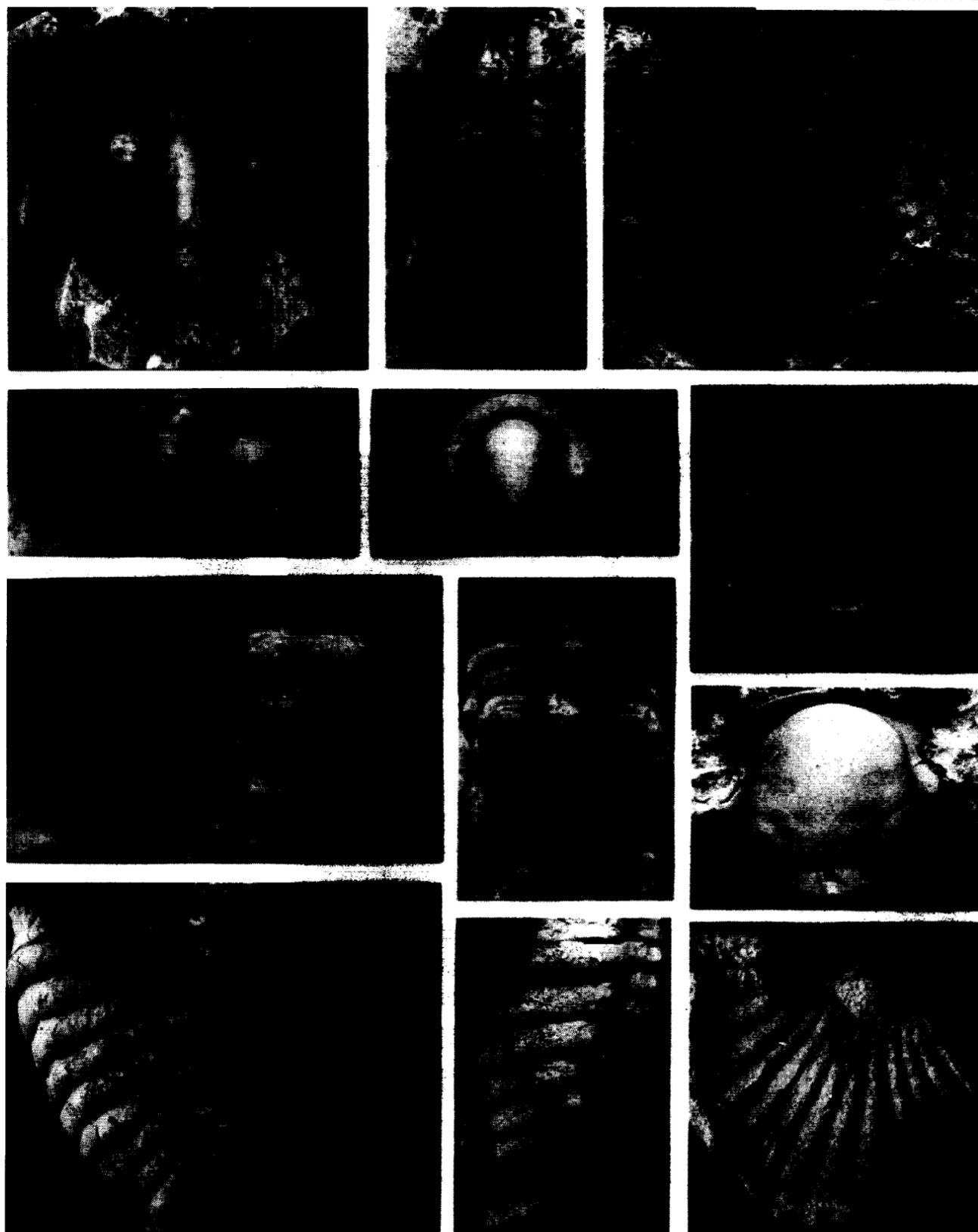
LAMINA 2

LAMINA 1





## LAMINA 2



lón), 879D (pigidio) y 946D (cefalón+tórax), de procedencia desconocida.

Suborden CALYMENINA SWINNERTON, 1915  
Familia HOMALONOTIDAE E.J. CHAPMAN,  
1890  
Subfamilia HOMALONOTINAE E.J. CHAPMAN,  
1890

**Burmeisteria pradoana (VERNEUIL, 1850)**  
(Lám. 2, figs. 7-9)

**Material:** 484D (Glabela), 485D (pigidio), 514D (tórax incompleto), 880D (cefalón incompleto), 881D (pigidio incompleto), 882.1-2D (fragmentos torácicos), 883.1-4D (pigidios incompletos), 884.1-2D (pigidios incompletos), 885.1-4D (fragmentos pigidiales), 937D (fragmento pigidial), 990D (fragmento pigidial), 992D (pleura torácica).

**Procedencia:** Colle y Villallandre? (León).  
**Posición estratigráfica:** Formación La Vid, Emsiense inferior.  
**Antigua identificación:** *Bronteus flabellifer* (GOLDF.) (880D, 882D), *Bronteus castroi* (MALLADA) (514D).

**Dipleura fornix HAAS, 1968**  
(Lám. 2, fig 3)

**Material:** 939D (cranidio), 948D (cranidio), 941D (pigidio), 952D (pigidio), 1344 (cefalón).  
**Procedencia:** Colle (León).  
**Posición estratigráfica:** Formación La Vid, Emsiense inferior.

## LAMINA 2

- Fig. 1. *Harpes* sp. Cefalón MGM-483D (x 1,9). Colle (León).  
Fig. 2. *Leonaspis* sp. Ejemplar incompleto MGM-489.1D (x 3,2). Salamón (León).  
Fig. 3. *Dipleura fornix* HAAS, 1968. Cranidio MGM-939D (x 2,1). Colle (León).  
Fig. 4. *Leonaspis* sp. Ejemplar prácticamente completo MGM-882.2D (x 3). Colle (León).  
Fig. 5. *Otarion* sp. Cefalón MGM-1001D (x 4). Colle (León).  
Fig. 6. "*Proetus*" sp. Cefalón + tórax MGM-473.1D (x 3). Valdoré (León).  
Figs 7-9. *Burmeisteria pradoana* (VERNEUIL, 1850). Glabela (7, MGM-484D, x 0,7) y pigidio MGM-485D (8, vista anterior y 9, vista lateral, ambas x 0,7). Colle (León).  
Fig. 10. *Leonaspis* cf. *maura* ALBERTI, 1969. Ejemplar incompleto MGM-888D (x 3). Colle (León).  
Fig. 11. Proetidae indet. Cranidio MGM-1048D (x 3). Colle (León).  
Fig. 12. *Microscutellum* cf. *hawlei* (BARRANDE, 1852). Pigidio MGM-938D (x 2,9). Procedencia desconocida.

**Dipleura fornix? HAAS, 1968**

**Material:** 942D (cefalón), 943D (cefalón).  
**Procedencia:** Colle (León).  
**Posición estratigráfica:** Formación La Vid, Emsiense inferior.

**Dipleura? sp.**

**Material:** 940D (cranidio incompleto).  
**Procedencia:** Colle (León).  
**Posición estratigráfica:** Formación La Vid, Emsiense inferior.

?Orden CORYNEXOCHIDA KOBAYASHI, 1935  
Suborden SCUTELLUINA HUPE, 1953  
Familia SCUTELLUIDAE RICHTER & RICHTER,  
1925

**Platyscutellum castroi (MALLADA, 1875)**

**Material:** 469D (cranidio incompleto), 470D (pigidio), 949D (pigidio+cranidio), 950D (pigidio incompleto), 953D (pigidio incompleto), 954a-cD (pigidios incompletos), 955D (cranidio incompleto), 956 (pigidio incompleto), 957D (glabela), 958D (librigena), 959D (rostro), 977D-980D (librigenas), 960.1D (hipostoma), 961D (pigidio), 962D (cranidio), 965D (pigidio incompleto), 968D (cefalón+tórax+pigidio fragmentario), 974D (pigidio incompleto), 976D (pigidio incompleto), 981.1D (rostro), 982D (cranidio), 983D (pigidio), 984D (pigidio), 985.1D (pigidio), 986D (cranidio), 987D-989D (pigidios incompletos).  
**Procedencia:** Colle (León).  
**Posición estratigráfica:** Formación La Vid, Emsiense inferior.  
**Antigua identificación:** *Bronteus castroi* MALLADA.

**Platyscutellum cf. viator (BARRANDE, 1852)**

*Material:* 967D (pigido incompleto), 969D (pigido).

*Procedencia:* Aleje (?) (967D), Colle (León) (969D).

*Posición estratigráfica:* Formación La Vid, Emsiense inferior.

**Scabriscutellum (Scabriscutellum) aff. richteri (BARRANDE, 1852)**

*Material:* 971D-972D (pigidios), 993D-1070D (pigidios).

*Procedencia:* Colle (?).

*Posición estratigráfica:* Formación La Vid.

*Antigua identificación:* *Bronteus castroi* MALLADA (971D, 993D, 994D)

**Scabriscutellum (Scabriscutellum)? sp.**

*Material:* 973D (pigido incompleto).

*Procedencia:* Desconocida (Formación La Vid?).

**Poroscutellum cf. infaustum (BARRANDE, 1852)**

*Material:* 966D (pigido+segmentos torácicos).

*Procedencia:* Aleje (?).

*Posición estratigráfica:* Formación La Vid.

**Microscutellum cf. hawlei (BARRANDE, 1852)**  
(Lám. 2, fig. 12)

*Material:* 938D (pigido).

*Procedencia:* Desconocida.

*Posición estratigráfica:* Formación La Vid.

**"Scutellum" sp.**

*Material:* 886D (pigido incompleto), 963D (cranio incompleto), 970D (pigido incompleto).

*Procedencia:* Colle (?).

Orden PTYCHOPARIIDA SWINNERTON, 1915  
Suborden HARPINA WHITTINGTON, 1959  
Familia HARPEDIDAE HAWLE & CORDA, 1847

**Harpes sp.**  
(Lám. 2, fig 1)

*Material:* 483D (cefalón).

*Procedencia:* Colle (León).

*Posición estratigráfica:* Formación La Vid, Emsiense inferior.

*Antigua identificación:* *Harpes inanocephalus* GOLDFUSS, *Harpes venulosus* (HAWLE & CORDA).

Orden ODONTOPLEURIDA WHITTINGTON, 1959  
Familia ODONTOPLEURIDAE BURMEISTER, 1843  
Subfamilia ODONTOPLEURINAE BURMEISTER, 1843

**Leonaspis cf. maura ALBERTI, 1969**  
(Lám. 2, fig. 10)

*Material:* 887D (cefalón+tórax), 888D y 994D a 1000D (ejemplares incompletos).

*Procedencia:* Colle (León).

*Posición estratigráfica:* Formación La Vid, Emsiense inferior.

**Leonaspis sp.**  
(Lám. 2, figs. 2-4)

*Material, procedencia y posición estratigráfica:* 488.1D (ejemplar incompleto) y 488.2D (tórax+pigido) del Emsiense inferior (Formación La Vid) de Colle, León. 489.1-2D (ejemplares incompletos), del Emsiense inferior (Fm. La Vid) de Salamón (León). 889D (pigido) de Colle (?); y 944D (cranidio incompleto), de localidad desconocida.

*Antigua identificación:* *Acidaspis derelicta* BARROIS (488.1-2D y 489.1-2D).

Orden PROETIDA FORTEY & OWENS, 1975  
Superfamilia PROETACEA SALTER, 1864  
Familia PROETIDAE SALTER, 1864

**Cornuproetus (Cornuproetus) cf. chouberti ALBERTI, 1964**

*Material:* 960.2D (cranidio).

*Procedencia:* Colle (León).

*Posición estratigráfica:* Formación La Vid, Emsiense inferior.

**Cornuproetus (Cornuproetus) sp.**

*Material:* 947D (ejemplar incompleto).

*Procedencia:* Desconocida.

*Posición estratigráfica:* Formación La Vid.

**"Proetus" sp.**  
(Lám. 2, fig. 6)

*Material:* 473.1D (cefalón+tórax), 473.2D (tórax+pigido), 981.2D, 1006D a 1012D y 1014D a 1020D (pigidios), 1013D y 1021D (cranidios), 1056D (cefalón+tórax fragmentario).

*Procedencia:* Valdoré (León) (473D y 1056D); resto Colle (León).

*Posición estratigráfica:* Formación Huergas, Eifeliense (473D y 1056D); resto, Formación La Vid, Emsiense inferior.

**Proetidae indet.**

*Material, procedencia y posición estratigráfica:* 1022D (pigido incompleto), 1023D-1045D (pigidios), 1046D-1053D (cranidios), del Emsiense inferior (Formación La Vid) de Colle (León). 1055D (pigido), 1057D-1061D (ejemplares incompletos), de la Formación Huergas (?).

Familia AULACOPLEURIDAE ANGELIN, 1854

**Otarion sp.**  
(Lám. 2, fig. 5)

*Material:* 892D y 1001D a 1005D (cefalones).

*Procedencia:* Colle (León) (892D con dudas).

*Posición estratigráfica:* Formación La Vid, Emsiense inferior.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a A. PRIEUR (Centro Nacional de Colecciones Paleontológicas francesas, Universidad Claude-Bernard, Lyon) por las informaciones acerca del material original del

trabajo de VERNEUIL (1850), así como a Uly MARTIN y al Departamento de Paleontología de la Universidad Complutense de Madrid por la realización de las fotografías que acompañan a este trabajo.

## REFERENCIAS

ARBIZU, M. (1978): Trilobites Synphoriidae del Devónico de la Cordillera Cantábrica: Malladaiainae nov. subfam. *Trabajos de Geología* Universidad de Oviedo, **10**, 37-73.

ARBIZU, M. (1979): Asteropyginae (Trilobita) du Dévonien des Montagnes Cantabriques (Espagne). *Bulletin de la Société géologique et minéralogique de Bretagne* (C), **9** (2), 59-102.

ARBIZU, M. (1982): Trilobites Homalonotinae del Devónico de la Cordillera Cantábrica (NO de España). *Trabajos de Geología* Universidad de Oviedo, **12**, 243-250.

BARRANDE, J. (1873): Collection paléontologique de M. Edouard de Verneuil léguée à l'Ecole de Mines de Paris. *Annales de Mines*, **1873** (4), 327-338.

MALLADA, L. (1875): Sinopsis de las especies fósiles que se han encontrado en España. Terreno paleozoico. *Boletín de la Comisión del Mapa Geológico de España*, **2**, 1-160.

MALLADA, L. (1891): Catálogo general de las especies fósiles encontradas en España. *Boletín de la Comisión del Mapa Geológico de España*, **18**, 1-253.

PRADO, C. de. (1850): Note géologique sur les terrains de Sabero et de ses environs dans les montagnes de León (Espagne). *Bulletin de la Société géologique de France* (2<sup>e</sup> Ser.), **7**, 137-155.

PRADO, C. de (1861): *Mapa geológico estratigráfico de las montañas de la provincia de Palencia (1857)*. Comisión de Estadística general del Reino, Madrid, Litografía de G. Pfeiffer.

SMEENK, Z. (1983): Devonian trilobites of the Southern Cantabrian Mountains (Northern Spain) with a systematic description of the Asteropyginae. *Leidse Geologische Mededelingen*, **52**, 383-511.

VERNEUIL, E. de (1850): Note sur les fossiles dévoniens du district de Sabero (León). *Bulletin de la Société géologique de France* (2<sup>e</sup> Ser.), **7**, 20-50.

Original recibido: Diciembre 1995.

Original aceptado: Enero 1996.

# El enlace y la paleogeografía neógena entre las Cuencas del Duero y del Ebro en La Bureba (Burgos).

Por A. PINEDA VELASCO (\*)

## RESUMEN

El análisis de la cartografía geológica reciente de las facies neógenas del Noreste de la Cuenca del Duero, y su enlace con las de La Bureba, conduce a atribuir, para las segundas, una edad más antigua que la admitida hasta ahora.

La distribución de facies y otros datos sedimentológicos indican, durante el Mioceno inferior, la existencia de un área lacustre en La Bureba (Facies Gris-blanca y Cerezo), y quizá en la mayor parte de la Cuenca del Ebro, con un golfo occidental en el centro y Noreste de la Cuenca del Duero (Facies Dueñas). En el Mioceno medio, el área lacustre queda restringida a La Bureba-Ebro, lo que determina un exorreísmo en la Cuenca del Duero (Facies fluviales de Tierra de Campos, etc., cuyo equivalente en La Bureba occidental es la Facies Pedraja). Muy probablemente, el fin de la colmatación endorreica en La Bureba (calizas del Puerto de La Brújula), y quizá también en la Cuenca del Ebro, es de edad Astaraciense (Aragoniense) superior.

Durante el Mioceno superior prosigue la sedimentación endorreica en la Cuenca del Duero (Facies Cuestas y Páramos), facilitada por inclinación tectónica en el umbral de La Bureba. En ésta última zona domina probablemente un régimen erosivo, quizá en relación con el exorreísmo definitivo de la Cuenca del Ebro hacia el Mediterráneo.

**Palabras clave:** Cuenca del Duero, Cuenca del Ebro, Bureba, Neógeno, Correlaciones, Paleogeografía, Endorreísmo, Culminación, Exorreísmo.

## ABSTRACT

Recent geological mapping of the Neogene facies of the NE part of the Cuenca del Duero basin and its connection with the La Bureba tertiary facies, leads one to attribute, for the latter, an older age than previously considered.

Facies distribution and other sedimentological data suggest, during the Lower Miocene, the existence of a lacustrine area in La Bureba (Gris blanca and Cerezo facies), and perhaps in the whole Ebro basin, with a western "gulf" in the centre and north-eastern part of the Duero basin (Dueñas facies). In the middle Miocene, this lake was restricted to the La Bureba-Ebro basin: this establishes an exorreic regime for the Duero basin (Tierra de Campos fluvial facies, etc., equivalent to the Pedraja facies in western Bureba). The culmination of the endorreic infilling at La Bureba (represented by the Puerto de la Brújula limestones) and, perhaps also at the Ebro basin, is of Upper Astaracian (Aragonian) age.

During the Upper Miocene, ensuing endorreic sedimentation at the Duero basin (Cuestas and Paramos facies) was facilitated by tectonic dipping towards west in the La Bureba threshold. In the latter area, there was probably an erosive regime, related possibly to the definitive exorreic regime of the Cuenca del Ebro extending to the Mediterranean sea.

**Key words:** Duero basin, Ebro basin, La Bureba area, Neogene, Correlations, Palaeogeography, Endorreic regime, Culmination of infilling, Exorreic regime.

(\*) EPTISA, Arapiles 14, 28015 Madrid.

## INTRODUCCION

Las Cuencas del Duero y del Ebro constituyen dos de las grandes depresiones interiores de la Península Ibérica, rellenas en ambiente continental durante una buena parte del Terciario. Se les ha considerado individual e independientemente endorreicas, es decir, con un régimen de sedimentación cuyos depósitos evolucionaban desde facies fluviales de borde hacia facies lacustres en cada uno de sus respectivos centros (JULIVERT *et al.* 1974; ALONSO *et al.* 1983; RIBA *et al.* 1983).

Sin embargo, las dos Cuencas se conectan a través de la comarca de La Bureba (provincia de Burgos), entre la Cordillera Cantábrica y la terminación noroccidental del Sistema Ibérico (figura 1). Este enlace obliga a considerar de forma conjunta la historia evolutiva de ambas, al menos durante el Neógeno, que es la edad de las facies y unidades aflorantes implicadas en dicha conexión. El Neógeno de La Bureba ha sido atribuido, en gran parte, al Mioceno superior (RIBA *et al.* 1983; OLIVE *et al.* 1987), correlacionándolo con los depósitos culminantes de la Cuenca del Duero (Facies Cuestas y Páramos) (POL y CARBALLEIRA 1983).

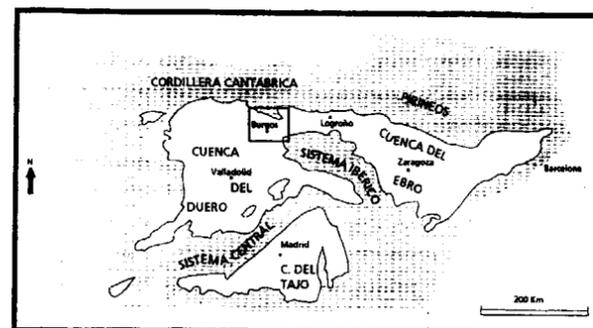


Figura 1. Situación geográfica del área de estudio en la zona de enlace entre las Cuencas del Duero y del Ebro.

El presente artículo tiene por objeto, por una parte, precisar la correlación entre las facies neógenas del NE de la Cuenca del Duero y de La Bureba, con datos cartográficos. Ello lleva a resultados distintos de los admitidos anteriormente y a una atribución de edad más antigua para las segundas. Después, al situar la mencio-

nada correlación en el contexto paleogeográfico de las facies implicadas, se deduce la evolución de la intercomunicación entre ambas Cuencas, contemplando la posibilidad de que, en algún momento de su historia, una de ellas (la del Duero) haya sido exorreica hacia la otra. Finalmente, algunas implicaciones paleogeográficas y morfoestructurales conducen a plantear que la colmatación terciaria haya finalizado antes en la Cuenca del Ebro que en la del Duero.

Los datos cartográficos mencionados fueron obtenidos mediante la participación del autor en la realización de diversas Hojas 1/50.000 del Proyecto MAGNA en el área.

## EL NEOGENO DEL NORESTE DE LA CUENCA DEL DUERO

En toda la parte nororiental, y en general en todo el centro de la Cuenca del Duero, se distinguen varias facies neógenas, clásicamente conocidas en la literatura regional: Facies Dueñas, Tierra de Campos, Cuestas y Páramos (HERNANDEZ-PACHECO 1915; del OLMO *et al.* 1978; PORTERO *et al.* 1979; PORTERO *et al.* 1983, MEDIAVILLA y DABRIO, 1986), cuyas relaciones entre sí y con otras facies contemporáneas se indican en la figura 2. En dicha figura se observa también que la sucesión de facies y la posición de las paleoalteraciones presentes a diversas alturas de la columna estratigráfica, configuran cuatro ciclos sedimentarios principales que, en general, comienzan por depósitos fluviales y finalizan con calizas lacustres.

EADAES		NO. FACIES Y LITOLOGIAS	SE.	PALEOALTERACIONES	ETAPAS
MIOCENO	PILOCENO	FACIES DEL PARAMO 2 O SUP.			4
	TUROLIEN.				
	SUPERIOR	VALLE-SIENSE	CALIZAS DEL PARAMO 1 O INF.		3
			F. LA SERNA	F. CUESTAS	F. TORDOMAR
MEDIO	ASTARA-CIENSE	F. GRIJALBA-VILLADIEGO	CALIZAS DE BIVALVOS	F. TIERRA DE CAMPOS	2
				F. SANTA MARIA DEL CAMPO	
INFERIOR	ARAGONIENSE			CALIZAS DEL TECHO DE DUEÑAS	1
	ORLEANSIENSE	F. VILLATORO			
	AGENIEN.	F. PEDRAJA	F. DUEÑAS	LIMOS ROJOS	

Figura 2. Facies, unidades litológicas y otros datos del Neógeno del Noreste de la Cuenca del Duero.

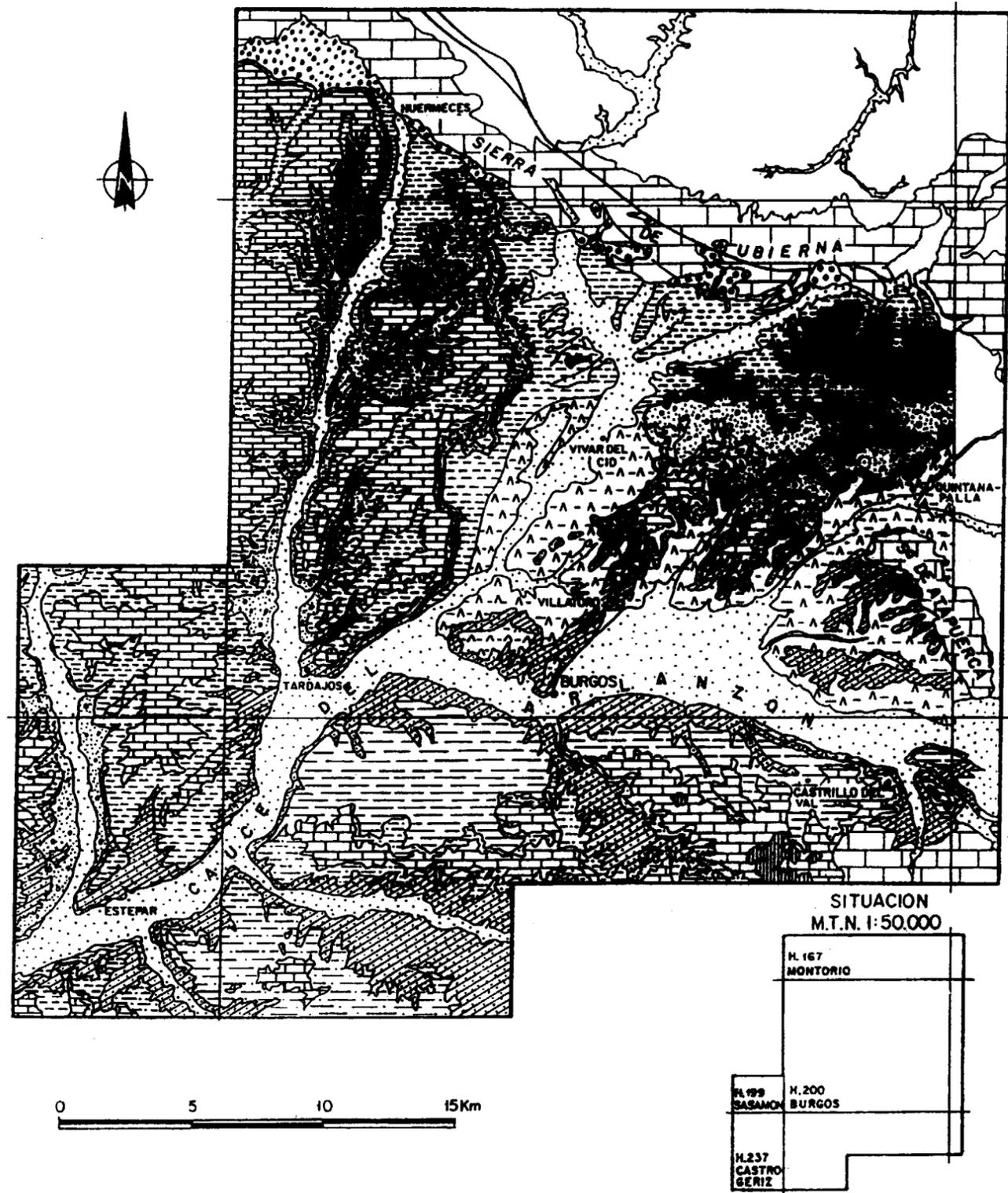


Figura 3. Esquema cartográfico del Noreste de la Cuenca del Duero (provincia de Burgos) (tomado de ARCE, 1990; GARCIA DE DOMINGO y CABRA, 1992; PAVON *et al.*, 1975, con algunas modificaciones; PINEDA, 1991; y PINEDA y ARCE, 1990).

A continuación se describen los rasgos principales de las diversas facies. En la figura 3 se presenta un esquema cartográfico del Noreste de la Cuenca del Duero, donde aflora la mayor parte de ellas.

**Facies Dueñas y equivalentes**

La Facies Dueñas (del OLMO *et al.* 1978) está constituida fundamentalmente por margas y arcillas, blancas y verdosas, aflorando en el conjunto de la Cuenca del Duero en dos áreas principales:

- Area central (Valladolid-Palencia), donde se encuentra su localidad "tipo". Aflora siempre en la parte más baja de los valles, alcanzando una potencia máxima visible de 20 m. Sus límites noreste y norte de afloramiento (al ser recubierta por facies suprayacentes) son las localidades de Estépar (Burgos) (figura 3) y

Astudillo (Palencia) (PAVON *et al.*, 1975), siguiendo los valles de los ríos Arlanzón y Pisuerga, respectivamente.

- Area nororiental, al NE de Burgos (PINEDA y ARCE, 1990).

Entre ambas áreas, el cauce del Arlanzón, en unos 15 km, no ha profundizado aún la base de las formaciones terrígenas (F. Tierra de Campos y equivalentes) que la recubren.

La Facies Dueñas contiene yesos, particularmente en el área nororiental (donde constituye la facies denominada Villatoro, PINEDA y ARCE, 1990, que aflora también en Quintanapalla, Castrillo del Val y otras localidades), y suele intercalar, en su parte alta, bancos calcáreos, tanto más abundantes cuanto más al Noreste, alcanzando 35 m de serie calizo-margosa en las proximidades de Riocerezo (fig. 3).

En partes centrales de la Cuenca del Duero, la Facies Dueñas presenta ciertos cambios laterales. Así, desde la zona de Valladolid y hacia el Sureste, pasa a la Facies de Pedraja del Portillo, fluvial y arcósica (PORTERO *et al.*, 1983). En los valles del Arlanza y del Duero, la Facies Dueñas intercala limos rojos, dominantes hacia el Este, donde llegan a contener paleocanales areniscosos (facies fluviales) a la altura de Villahoz (Burgos) (Hoja 1/50.000 nº 275).

La Facies Dueñas representa un ambiente lacustre con salinidad variable, que evoluciona hacia techo a facies calcáreas más someras, las cuales evidencian una retracción (SOLE, en PINEDA y ARCE, 1990), y el final de un ciclo sedimentario.

La Facies Pedraja del Portillo, y los limos y areniscas del valle del Arlanza representan los sistemas fluviales conexos con dicho aparato lacustre. La edad atribuible a la Facies Dueñas sería Mioceno inferior, a partir de datos paleontológicos de las facies suprayacentes.

El techo de la Facies Dueñas presenta frecuentemente, cuando es margoso, procesos de encostamiento calcáreo (caliches), y cuando es calizo, también de karstificación, observándose en otros puntos, incluso, fenómenos de erosión subaérea antes del depósito de las facies terrígenas suprayacentes (F. Tierra de Campos y

**LEYENDA**

- Cuaternario y rañas.
- Facies del Páramo 2.
- Calizas del Páramo 1.
- Facies Cuestas / F. Tordómar
- Facies Tierra de Campos / F. Sta. M<sup>a</sup> del Campo / (y calizas de bivalvos en la mitad NE de la hoja de Burgos).
- Conglomerados de Alar del Rey
- Calizas culminantes de la F. Dueñas.
- Facies Dueñas / F. Villatoro.
- Conglomerados Paleógenos
- Terciario de La Bureba
- Mesozoico
- Fallas

equivalentes) (figura 4). Todo ello testimonia, en conjunto, una interrupción en la sedimentación, en relación con el final del ciclo.

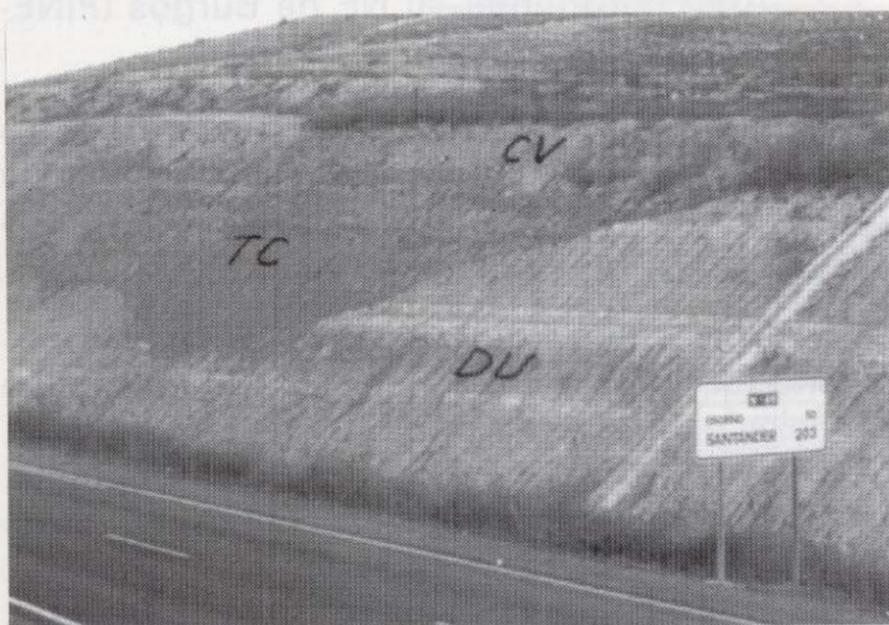


Figura 4. Paleorrelieve de pequeña envergadura labrado en la Facies Dueñas (DU), cubierto por la Facies Tierra de Campos (TC). Coluviones de ladera (CV) recubren el conjunto. Foto tomada 5 km. al SSE de Palencia.

### Facies terrígenas del Mioceno medio

Hay tres facies principales (figura 2), de unos 25-60 m de potencia, cuya distribución geográfica en el Noreste de la Cuenca del Duero se aprecia en la figura 3.

La Facies Tierra de Campos (HERNANDEZ-PACHECO, 1915), que domina en la parte central de la Cuenca, está constituida por arcillas y limos ocres con intercalaciones de paleocanales areniscosos, sobre todo, y paleosuelos calcimorfos, más abundantes a techo. Representa un sistema fluvial distal al que se ha atribuido una procedencia del Noroeste y Oeste, es decir del Macizo Hespérico. Se le asigna una edad Astaraciense (PORTERO *et al.*, 1979, y MEDIAVILLA *et al.* 1986), a partir de los abundantes yacimientos paleontológicos de vertebrados que contiene, distribuidos por toda la Cuenca.

La Facies Santa María del Campo (AEROSERVICE, 1967) equivale hacia el Sur a la Unidad Detrítica de Aranda de ARMENTEROS (1986), y a la Unidad Detrítica Inferior de GARCIA del CURA (1975). Está constituida por arcillas y limos rojos con intercalaciones de paleocanales areniscoso-conglomeráticos y a veces suelos calcimorfos. Sus facies de borde, al Este, han recibido diversos nombres (F. Covarrubias, ...,

etc.). Corresponde a una red fluvial procedente del Sistema Ibérico (SOLE, en GARCIA DE DOMINGO y CABRA, 1992). Su edad es Astaraciense (ARMENTEROS, 1986).

La Facies Grijalba-Villadiego (AEROSERVICE, 1967) está formada por lutitas rojas con intercalaciones de paleocanales areniscoso-conglomeráticos, siendo su facies de borde, al Norte, los conglomerados calcáreos de Alar de Rey. Se depositó en un contexto fluvial procedente del mesozoico cantábrico (SOLE, en ARCE, 1990, LOPEZ-OLMEDO *et al.*, 1990 y PINEDA 1990). Su edad es Astaraciense, según el yacimiento paleontológico de vertebrados de Sandoval de la Reina (Burgos) (ver PORTERO *et al.* 1979). De las tres facies, ésta es la única no representada en la figura 3, localizándose más al Noroeste.

Así pues, las tres facies son fluviales y procedentes de áreas madres diferentes, siendo la primera más distal que las segundas. Se interdigitan entre sí en una anchura de hasta 5 km en sus límites comunes.

### Paleosuelo y caliza a techo de las facies terrígenas

El techo de estas facies terrígenas presenta, por lo general, una alteración de espesor métrico, atribuida a un paleosuelo de tipo "pseudogley" (POZO *et al.*, 1984), con efectos de encharcamiento prolongado por instalación de la facies lacustre suprayacente (F. Cuestas) (ARMENTEROS, com. pers.). En general, este paleosuelo implica una interrupción sedimentaria (y, para algunos autores, un límite entre ciclos sedimentarios).

Además, y aproximadamente en toda la mitad nororiental de la Hoja de Burgos existe, tanto sobre la Facies Tierra de Campos como sobre la de Santa María del Campo, un tramo calcáreo lacustre, de espesor métrico o mayor, rico en bivalvos y gasterópodos (PINEDA y ARCE, 1990), lo que también indicaría un posible final de ciclo a techo de las facies terrígenas.

### Facies Cuestas y contemporáneas

Hay tres facies principales (figura 2) cuya distribución geográfica en el Noreste de la Cuenca

equivalentes) (figura 4). Todo ello testimonia, en conjunto, una interrupción en la sedimentación, en relación con el final del ciclo.



Figura 4. Paleorreliieve de pequeña envergadura labrado en la Facies Dueñas (DU), cubierto por la Facies Tierra de Campos (TC). Coluviones de ladera (CV) recubren el conjunto. Foto tomada 5 km. al SSE de Palencia.

**Facies terrígenas del Mioceno medio**

Hay tres facies principales (figura 2), de unos 25-60 m de potencia, cuya distribución geográfica en el Noreste de la Cuenca del Duero se aprecia en la figura 3.

La Facies Tierra de Campos (HERNANDEZ-PACHECO, 1915), que domina en la parte central de la Cuenca, está constituida por arcillas y limos ocreos con intercalaciones de paleocanales areniscosos, sobre todo, y paleosuelos calcimorfos, más abundantes a techo. Representa un sistema fluvial distal al que se ha atribuido una procedencia del Noroeste y Oeste, es decir del Macizo Hespérico. Se le asigna una edad Astaraciense (PORTERO *et al.*, 1979, y MEDIAVILLA *et al.* 1986), a partir de los abundantes yacimientos paleontológicos de vertebrados que contiene, distribuidos por toda la Cuenca.

La Facies Santa María del Campo (AEROSERVICE, 1967) equivale hacia el Sur a la Unidad Detrítica de Aranda de ARMENTEROS (1986), y a la Unidad Detrítica Inferior de GARCIA del CURA (1975). Está constituida por arcillas y limos rojos con intercalaciones de paleocanales arenicoso-conglomeráticos y a veces suelos calcimorfos. Sus facies de borde, al Este, han recibido diversos nombres (F. Covarrubias, ...,

etc.). Corresponde a una red fluvial procedente del Sistema Ibérico (SOLE, en GARCIA DE DOMINGO y CABRA, 1992). Su edad es Astaraciense (ARMENTEROS, 1986).

La Facies Grijalba-Villadiego (AEROSERVICE, 1967) está formada por lutitas rojas con intercalaciones de paleocanales arenicoso-conglomeráticos, siendo su facies de borde, al Norte, los conglomerados calcáreos de Alar de Rey. Se depositó en un contexto fluvial procedente del mesozoico cantábrico (SOLE, en ARCE, 1990, LOPEZ-OLMEDO *et al.*, 1990 y PINEDA 1990). Su edad es Astaraciense, según el yacimiento paleontológico de vertebrados de Sandoval de la Reina (Burgos) (ver PORTERO *et al.* 1979). De las tres facies, ésta es la única no representada en la figura 3, localizándose más al Noroeste.

Así pues, las tres facies son fluviales y procedentes de áreas madres diferentes, siendo la primera más distal que las segundas. Se interdigitan entre sí en una anchura de hasta 5 km en sus límites comunes.

**Paleosuelo y caliza a techo de las facies terrígenas**

El techo de estas facies terrígenas presenta, por lo general, una alteración de espesor métrico, atribuida a un paleosuelo de tipo "pseudogley" (POZO *et al.*, 1984), con efectos de encharcamiento prolongado por instalación de la facies lacustre suprayacente (F. Cuestas) (ARMENTEROS, com. pers.). En general, este paleosuelo implica una interrupción sedimentaria (y, para algunos autores, un límite entre ciclos sedimentarios).

Además, y aproximadamente en toda la mitad nororiental de la Hoja de Burgos existe, tanto sobre la Facies Tierra de Campos como sobre la de Santa María del Campo, un tramo calcáreo lacustre, de espesor métrico o mayor, rico en bivalvos y gasterópodos (PINEDA y ARCE, 1990), lo que también indicaría un posible final de ciclo a techo de las facies terrígenas.

**Facies Cuestas y contemporáneas**

Hay tres facies principales (figura 2) cuya distribución geográfica en el Noreste de la Cuenca

del Duero se presenta en la figura 3, y que interdigitan entre sí, con amplitud kilométrica, en sus límites comunes.

La Facies Cuestas (HERNANDEZ-PACHECO, 1915, MEDIAVILLA Y DABRIO, 1987 y 1988) es margocalcárea y yesífera, muy similar en todas sus características litológicas y sedimentológicas a la Facies Dueñas. Representa un ambiente lacustre (con salinidad variable), palustre, o de llanura fangosa, y su edad, por datos paleontológicos, es fundamentalmente Vallesiense inferior. Su potencia varía entre 100 y 10 m., y es progresivamente decreciente hacia el Noreste.

La Facies Tordómar está formada por arcillas rojas con intercalaciones de areniscas, margas blancas y niveles carbonatados, que representan un contexto palustre o de charcas, con influencias fluviales de muy baja energía procedentes del Sistema Ibérico (GARCIA DE DOMINGO y CABRA, 1992).

La Facies de La Serna (CARRERAS, 1978) es terrígena, ocre, fluvial y similar a la Facies Tierra de Campos, aunque con mayor abundancia de facies canalizadas, procedentes del Noroeste (LOPEZ-OLMEDO *et al.* 1990). Puede alcanzar los 130 m de espesor en la parte central de la provincia de Palencia, y su edad es Vallesiense, según datos paleontológicos. De las tres facies, ésta es la única no representada en la figura 3, ya que se localiza más al Noroeste.

**Calizas del Páramo 1**

La Facies Cuestas, sobre todo, y también Tordómar, presentan a techo, y gradualmente, mayor abundancia de intercalaciones calcáreas, que terminan por constituir las Calizas del Páramo 1 o inferior (5-25 m de espesor), reflejando, por tanto, un ambiente palustre-lacustre retractorio respecto a las facies infrayacentes. Su edad es Vallesiense superior.

El techo de la Caliza del Páramo 1 está afectado por procesos kársticos, con desarrollo de "terra rossa", sobre los que se sitúan las Facies del Páramo 2 o superior, correspondientes, a un nuevo ciclo sedimentario.

**Facies del Páramo 2**

Están preservadas sólo en determinados puntos

de la Cuenca del Duero y con más frecuencia en sus partes centrales. Comienzan con gravas y/o arenas fluviales y "terra rossa" resedimentada, siguen margas lacustres y, finalmente, calizas a techo (calizas del Páramo 2 o superior). Esta unidad calcárea, expansiva sobre las facies anteriores, es el depósito más reciente del relleno terciario de la Cuenca del Duero, siéndole atribuíble una edad Vallesiense-Turoliense o quizá Plioceno (ALBERDI *et al.* 1981; LOPEZ *et al.* 1979 y 1985; MEDIAVILLA *et al.* 1986, 1988 y 1989; y PORTERO *et al.* 1979).

**EL NEOGENO DE LA BUREBA**

Es considerado la parte más occidental de la Cuenca del Ebro y corresponde a rellenos fluviales desarrollados desde los bordes Norte (mesozoico vasco-cantábrico) y Sur (Sierra de La Demanda: Sistema Ibérico), que gradúan mediante series de transición a facies lacustres centrales. En la figura 5 se representan las diversas facies más próximas a la Cuenca del Duero, citadas en la literatura regional, sus relaciones mutuas y la edad atribuida hasta el momento (RIBA, 1954; PORTERO *et al.* 1978; OLIVE *et al.*, 1987); nótese además su división en dos ciclos sedimentarios que comienzan por facies fluviales y finalizan con calizas. Un esquema cartográfico del área tratada se presenta en la figura 6.

EDADES		FACIES Y LITOLOGIAS		CICLOS SEDIM.
ATRIBUIDAS ANTERIORMENTE		NO.	SE.	
MIOCENO	PLIOCENO	CONGLOM. CALC. Y ARC. ROJAS	CALIZAS Y MARGAS PTO. BRUJULA	2
	TUROLIENSE		FACIES PEDRAJA	
	VALLESIENSE		CALIZAS	
			FACIES GRIS BLANCA	ARC. Y LIMOS DE BELORADO DE S.
			FACIES CEREZO	
MIOCENO	ASTARACIENSE	F. CARCEDO		1
	ORLEANIENSE	F. BRIVIESCA	CAMENO	
				MIGUEL

Figura 5. Facies, unidades litológicas y otros datos del Neógeno de La Bureba.

**Facies fluviales de borde y transicionales**

En el borde Sur, los Conglomerados de San Miguel (con más de 100 m de espesor, y de com-

posición cuarcítica y pizarrosa) corresponden a depósitos de abanicos aluviales (*debris flow* y *mud flow*, con corrientes *braided* a techo). Pasan hacia el Norte a las arcillas y limolitas grises de Belorado (100 m pot.), interpretadas como facies distales de abanicos en transición a playas salinas (OLIVE *et al.* 1987).

En el borde Norte, las Brechas de San Pedro de la Hoz y los Conglomerados marginales de la Facies Bureba (hasta 175 m de pot.) son de tonos rojos y composición carbonatada. Pasan hacia el Sur y Este a la Facies Bureba (más de 200 m de potencia de limos y arcillas rojos con paleocanales arenoso-conglomeráticos, fluviales). Esta, a su vez, pasa a las Facies Briviesca y Carcedo (alternancias de 200 m de potencia de areniscas calcáreas, limos y arcillas verde-rojizas, y margas grises, con intercalaciones calcáreas o de caliche) y a la Facies Cameno (60 m de potencia de alternancia de areniscas rojas con cemento yesífero, arcillas y margas rojizas y niveles de yeso) (PORTERO *et al.* 1978). En esta última facies se encontraron restos de mamíferos de edad posible "Vindoboniense" (CRUSA-FONT *et al.* 1966).

#### Facies Gris-blanca, Facies Cerezo y sus calizas culminantes

La Facies Gris-blanca se localiza, sobre todo, al Norte de la Sierra mesozoica de Santa Casilda (figura 6), donde alcanza los 250 m de potencia. Se compone de margas grises y blancas, con algunas intercalaciones calcáreas (PORTERO *et al.* 1978). Determinaciones de ostrácodos en su parte basal indican una posible edad Orleaniense (OLIVE *et al.* 1987). La Facies Cerezo, evaporítica, con yesos y niveles de glauberita, es un paso lateral de la anterior, y alcanza los 200 m de espesor, situándose al Sur de dicha Sierra (figura 6). Por último, una serie calizo-margosa (denominada por RIBA *et al.*, 1983: Calizas de los Páramos de Santa Casilda), que puede alcanzar los 100 m de potencia, culmina las anteriores, con carácter expansivo o translapante, llegando a apoyarse directamente sobre el Mesozoico. Todas estas facies corresponden a ambientes lacustres, testimoniando las calizas culminantes la somerización final, de edad atribuida Vallesiense (OLIVE *et al.* 1987).

#### Calizas del Puerto de la Brújula, Facies Pedraja y otras contemporáneas

Sobre las calizas culminantes anteriores se disponen, en la zona del Puerto de la Brújula (extremo occidental de La Bureba), limos y arcillas ocre con paleocanales conglomeráticos silíceos, coronados por margas y calizas (Calizas del Puerto de La Brújula). El conjunto de la serie, de 25-30 m de espesor, forma un nuevo ciclo sedimentario, que evolucionó, de abajo a arriba, de fluvial a lacustre, con retracción final.

Hacia el Norte, los limos y arcillas ocre inferiores pasan a conglomerados calcáreos y arcillas rojas, adosados al Mesozoico.

Hacia el Sureste, la Facies Pedraja está formada por limos y arcillas rojo-ocre con intercalaciones de cantos cuarcíticos, que alcanza hasta 150-200 m de espesor próxima a la Sierra de La Demanda, de donde procede. Su techo pasa hacia el Norte, por cambio lateral de facies (OLIVE *et al.* 1987), a las Calizas del Puerto de La Brújula.

La Facies Pedraja y las Calizas del Puerto de la Brújula son los depósitos terciarios más altos de La Bureba, estando conservados sólo en el Sur y Oeste, respectivamente, del área. Se les ha asignado, sin datos paleontológicos, una edad Vallesiense superior-Plioceno (OLIVE *et al.* 1987).

#### CORRELACION ENTRE EL NEOGENO DEL DUERO Y EL DE LA BUREBA

A la hora de asignar edades geológicas a las facies terciarias descritas en La Bureba, y ante la carencia generalizada de datos paleontológicos, probablemente debieron jugar un papel importante sus aspectos morfológicos y litológicos, considerándolos comparativamente con los de las facies de la Cuenca del Duero (mejor datadas paleontológicamente).

Así, las calizas culminantes de las Facies Cerezo y Gris-blanca suelen constituir mesetas y extensas plataformas estructurales ("páramos" con más de 1.000 m de altitud), aspecto que, conjuntamente con la presencia de margas y yesos infrayacentes, conforma un cuadro muy similar

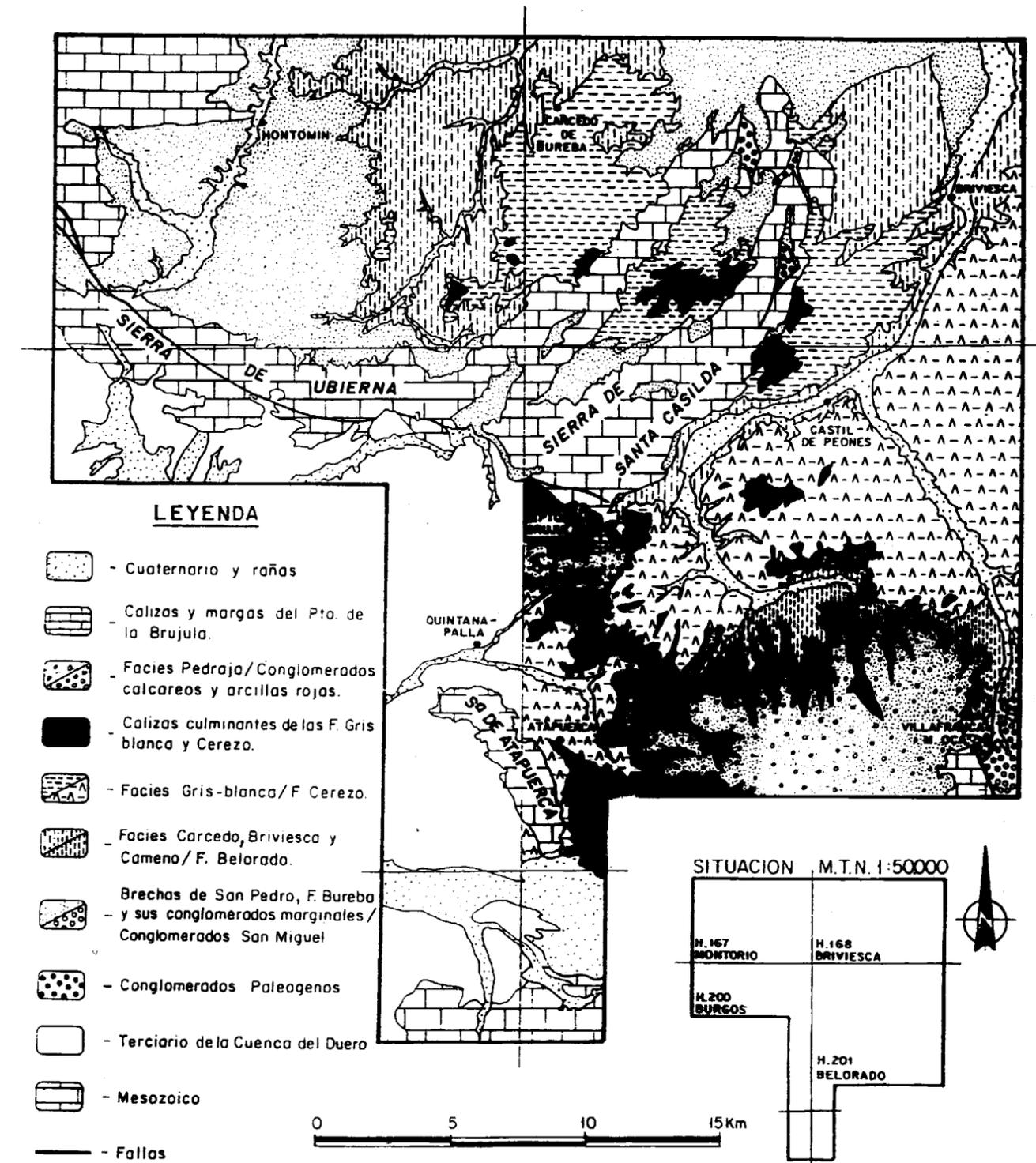


Figura 6. Esquema cartográfico de La Bureba (provincia de Burgos) (tomado de OLIVE *et al.*, 1987; PINEDA, 1991; y PORTERO *et al.*, 1978).

al que componen las Calizas del Páramo 1 y las Facies Cuestas en la Cuenca del Duero. Esta semejanza ha debido influir poderosamente al considerar (por RIBA *et al.* 1983 y POL y CARBALLEIRA, 1983) que ambas sucesiones debían ser las mismas, y, por tanto, en asignarles una edad fundamentalmente vallesiense por OLIVE *et al.* (1987).

Del mismo modo, los escasos y poco potentes retazos de Calizas del Puerto de La Brújula y serie detrítica infrayacente, sobre las calizas culminantes anteriores, ofrecen gran similitud litológica y morfológica con la disposición general del Páramo 2 en la Cuenca del Duero, razón probable por la cual se atribuyó una edad Turolense-Plioceno a los últimos depósitos carbonatados de La Bureba.

Además, las características de piedemonte que presenta la Facies Pedraja, descendiendo paulatinamente hacia el Noroeste desde el borde Norte de La Demanda (donde se presenta a 1.200 m de altitud), y su carácter "rañoid", debieron ser aspectos decisivos para suponerle, por otro lado y ocasionalmente, una edad pliocena (IGME, 1970).

Sin embargo, la cartografía reciente del Noreste de la Cuenca del Duero (PINEDA y ARCE, 1990) ha permitido el enlace cartográfico, detallado, de sus facies con las de La Bureba, pudiendo prescindir de comparaciones litológicas y morfológicas como las expuestas, a la hora de plantear la correlación y asignar edades.

El mencionado enlace cartográfico muestra que (compárense las figuras 3 y 6):

-Las calizas de techo de la Facies Dueñas/Villatoro del área de Burgos, son las calizas culminantes de la F. Grisblanca/Cerezo de La Bureba.

-La Facies Villatoro (facies yesífera de Dueñas) es la F. Cerezo, deduciéndose, por tanto, que la Facies Dueñas se corresponde con la F. Grisblanca.

-La Facies Tierra de Campos pasa lateralmente a los niveles detríticos infrayacentes a las Calizas del Puerto de La Brújula, y equivale, por tanto, a la F. Pedraja.

Son de más difícil correlación las Calizas del Puerto de La Brújula, debido a que forman pequeños retazos apenas respetados por la erosión, y a que no contactan cartográficamente con facies de la Cuenca del Duero. Por su posición suprayacente a Tierra de Campos/Pedraja, y de acuerdo con el dato suministrado por OLIVE *et al.* (1987) acerca de su cambio lateral de facies con esta última, deben corresponder al nivel calcáreo (calizas de bivalvos) que corona Tierra de Campos/Santa María del Campo en la parte Noreste de la Hoja de Burgos (figura 2).

El enlace cartográfico realizado y la correlación indicada entre las facies del Duero y de La Bureba obliga a considerar (compárense las figuras 2 y 5) una edad común para ambas. Puesto que las primeras están mejor datadas paleontológicamente, parece lógico adoptar esa datación de conjunto y concluir por tanto que las segundas son de edad más antigua que la admitida hasta ahora (figura 7), lo cual es más acorde con las relaciones tectónicas que se observan (cabalgamientos, fallas, etc.) entre las facies de La Bureba y los Mesozoicos próximos (ALVARO, com. pers.). Es de resaltar, la diferente edad de los niveles terciarios culminantes de ambas áreas: Astaraciense alto en La Bureba, y Turolense-Plioceno en la Cuenca del Duero (figura 7).

EIDADES		CI-CLIOS	DUERO	PRINCIPALES FACIES Y LITOLOGIAS BUREBA
PLIOCENO				
MIOCENO	TUROLIEN.	4		CULMINACION DEL TERCARIO EN LA CUENCA DEL DUERO
	VALLESIENSE	3	CALIZAS PARAMO 2 MARGAS ARENAS ARCELLAS CALIZAS PARAMO 1	CULMINACION DEL TERCARIO EN LA BUREBA
		2	F. CUESTAS	CALIZAS DEL TECHO DE DUEÑAS
	MEDIO	2	F. TIERRA DE CAMPOS	CALIZAS PTO. BRUJULA F. PEDRAJA
	INFERIOR	1		CALIZAS DEL TECHO DE DUEÑAS
		1	F. DUEÑAS	F. GRIS BLANCA
AGENIEN.		F. VILLATORO	F. CEREZO	

Figura 7. Equivalencias entre el Neógeno del Duero y el de La Bureba, y edades asignables.

En la figura 8 se presenta, en un corte geológico sintético, cómo es el enlace entre las unidades neógenas del Noreste de la Cuenca del Duero y de La Bureba.

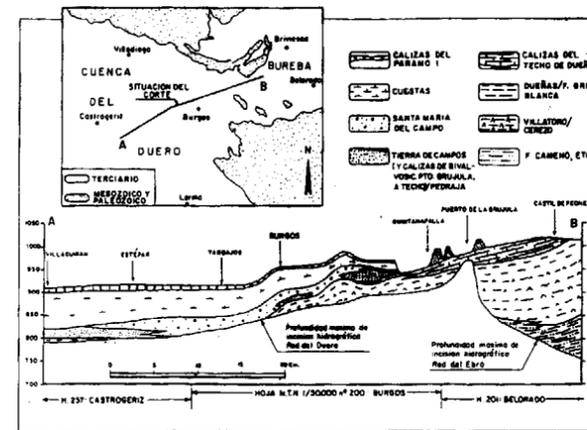


Figura 8. Corte geológico sintético, enlazando el Neógeno de la Cuenca del Duero y el de La Bureba.

INTERPRETACION PALEOGEOGRAFICA

En este apartado se analiza conjuntamente la paleogeografía de las Facies del Duero y de La Bureba, teniendo en cuenta todo lo anteriormente descrito y atendiendo, a grandes rasgos, a cuatro períodos principales: Mioceno inferior (F. Dueñas y contemporáneas), Mioceno medio (F. Tierra de Campos, etc.), Mioceno superior (F. Cuestas y Páramo inferior) y Mioceno superior-Plioceno (Páramo 2), coincidentes con los principales ciclos sedimentarios delimitados (figura 7).

Mioceno inferior

La disposición de facies indica para esta época un área lacustre en el Noreste de la Cuenca del Duero (F. Dueñas) alimentada por aparatos fluviales procedentes del Este (limos rojos y paleocanales del área de Villahoz) del Sur/Suroeste (Facies arcósica de Pedraja del Portillo, PORTERO *et al.*, 1979), y probablemente también del Norte/Noroeste (puesto que, en estas zonas, la erosión no ha descubierto aún los niveles correspondientes). Este área lacustre se continúa, siendo progresivamente más yesífera (F. Villatoro y Cerezo), en La Bureba (figura 9). Sus calizas de techo (calizas "terminales" de la Facies Dueñas y culminantes de las Facies Cerezo) adquieren también su mayor desarrollo en el Noreste de la Cuenca del Duero y, sobre todo, en La Bureba (figura 10). No existe, pues,

un dispositivo paleogeográfico de relleno centrípeto para la Cuenca del Duero en el Mioceno inferior: el área lacustre no está en posición central sino localizada en el Noreste y más allá, en La Bureba, donde presenta mayor importancia.

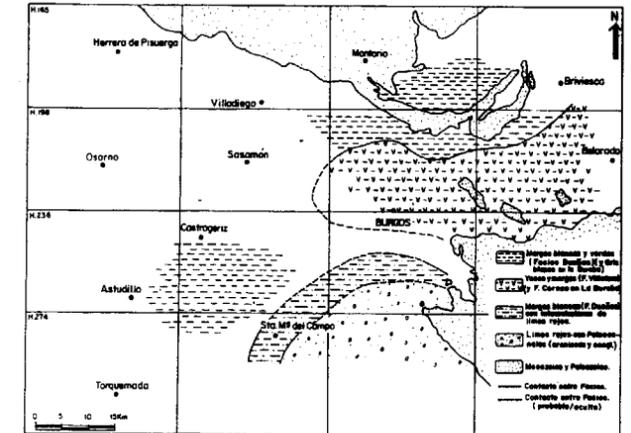


Figura 9. Distribución paleogeográfica de la Facies Dueñas y sus equivalentes.

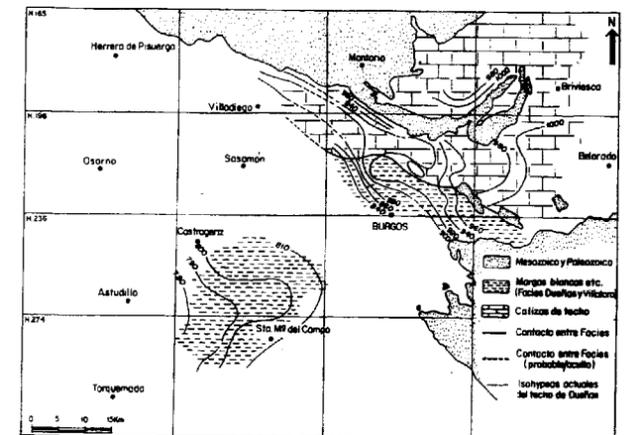


Figura 10. Naturaleza litológica y cotas topográficas del techo de la Facies Dueñas y equivalentes.

Mioceno medio

En el Noreste de la Cuenca del Duero existe exclusivamente sedimentación fluvial, correspondiente a aparatos procedentes de tres áreas principales: Oeste/Noroeste (F. Tierra de Cam-

pos), Norte (F. Grijalba-Villadiego) y Este (F. Santa María del Campo). En el conjunto de la Cuenca también se reconocen generalizadamente facies fluviales para esta época (ver PORTERO *et. al.* 1979, y PORTERO *et. al.*, 1983, particularmente su esquema para el Astaraciense Superior), lo cual es incompatible con el concepto centrípeto y endorreico de la Cuenca, que debería comportar facies lacustres centrales. La disposición de las medidas de paleocorrientes en el NE. de la Cuenca ofrece una explicación a esta problemática pues sugiere una escorrentía hacia La Bureba (figura 11) e indica, por tanto, que las facies lacustres podrían situarse fuera de la Cuenca del Duero, en la Bureba oriental y/o en la Cuenca del Ebro.

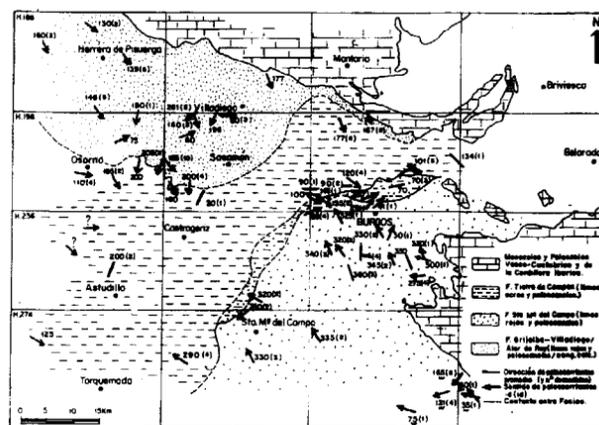


Figura 11. Distribución paleogeográfica de las facies terrígenas del Mioceno medio.

El nivel calcáreo con bivalvos y gasterópodos dulceacuícolas a techo de las Facies Tierra de Campos y Santa María del Campo, conocido sólo al Este de Burgos (=Calizas del Puerto de La Brújula, preservadas en La Bureba occidental) puede representar el techo (expansivo hacia el Suroeste) de dichas facies lacustres.

**Mioceno superior**

En el Noreste (y centro) de la Cuenca del Duero hay, durante el Vallesiense, un área de sedimentación lacustre (F. Cuestas), alimentada por aparatos fluviales procedentes del Noroeste (F. Serna) y Este/Sureste (F. Tordómar) (figura 12), que finaliza con una retracción (calizas del Páramo 1).

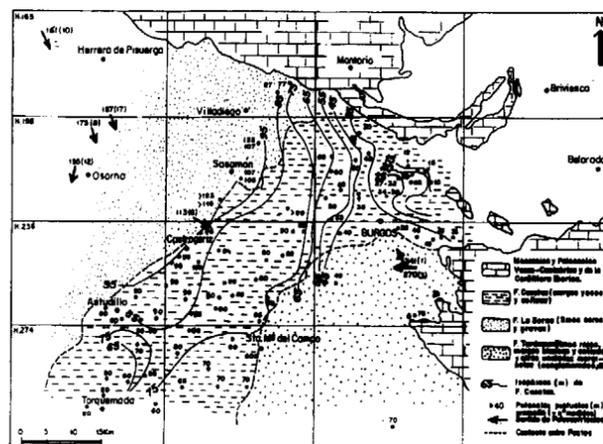


Figura 12. Distribución paleogeográfica de las facies Cuestas y equivalentes.

No se conocen sedimentos de esta edad en La Bureba, pudiendo suponerse que nunca se depositaron, como lo sugeriría el progresivo adelgazamiento hacia el Noreste que presenta la Facies Cuestas (figura 12). La ausencia de sedimentos puede indicar que el área de La Bureba estaba (o comenzaba a estar) sometida a erosión.

**Mioceno Superior-Plioceno**

Respecto de las facies del Páramo 2 o superior, depositadas en la Cuenca del Duero, se desconocen sus pautas paleogeográficas. Las calizas del Páramo 2 son el depósito lacustre más reciente de la Cuenca del Duero, y materializan su última (y definitiva) retracción endorreica lacustre.

Tampoco se conocen sedimentos de esta edad en La Bureba, lo cual indicaría la persistencia de las condiciones erosivas apuntadas para el ciclo anterior.

**LA EVOLUCION NEOGENA ENTRE LA CUENCA DEL DUERO Y LA BUREBA, Y SUS CAUSAS**

La interpretación paleogeográfica realizada conjuntamente para el NE de la cuenca del Duero y La Bureba, en las sucesivas etapas del Neógeno, puede sintetizarse en una evolución representada en la figura 13, y que se describe a continuación. Esta evolución responde básicamente, a

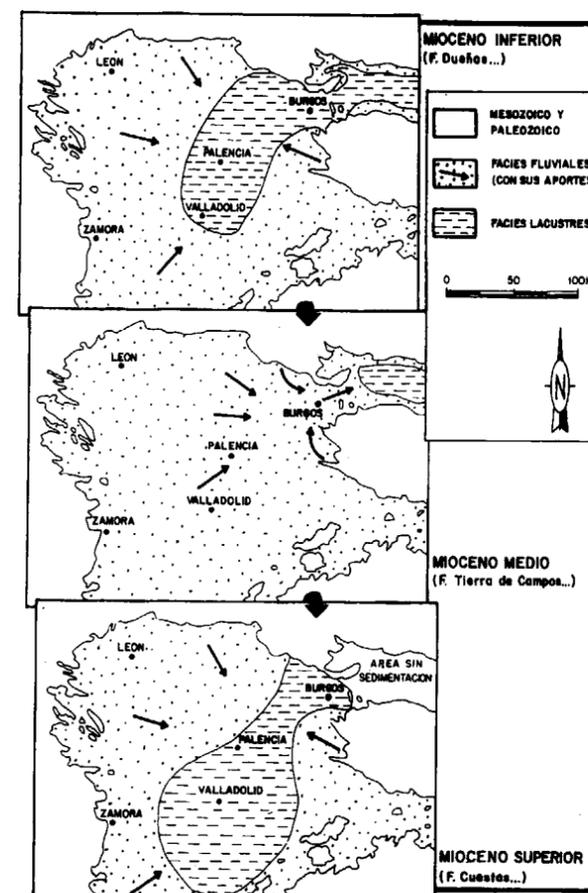


Figura 13. Evolución paleogeográfica durante el Mioceno, propuesta para la Cuenca del Duero y La Bureba.

una conexión o esquema de funcionamiento conjunto para ambas durante el Mioceno inferior y medio, y al fin de dicha conexión (con la individualización de eventos particulares para cada una) durante el Mioceno superior y épocas posteriores.

**La conexión Duero-Bureba durante el Mioceno inferior y medio**

Durante el Mioceno inferior, la facies Dueñas de la Cuenca del Duero representa un golfo de un área lacustre más importante, localizada al Noreste, en La Bureba, y que probablemente comprendería también la Cuenca del Ebro si, como se considera, aquélla representa la parte más occidental de ésta.

Dicha área lacustre sufre una retracción durante el Mioceno medio, y queda restringida a La Bureba-Ebro. Ello explica que la sedimentación de la Cuenca del Duero sea para esta época básicamente fluvial, y en relación con una red fluyendo hacia el Noreste, hacia áreas lacustres situadas en La Bureba oriental o en la parte central de la Cuenca del Ebro.

El límite superior del ciclo 1 (Dueñas) en la Cuenca del Duero es debido, por tanto, a la retirada del borde lacustre hacia el Noreste (acompañada de un ligero descenso del nivel de base) tras el depósito de la Facies Dueñas. Ello supone una exposición subaérea de ésta (con karstificación y calichificación asociadas) antes del depósito de las facies fluviales (Tierra de Campos, etc.) e incluso fenómenos de erosión moderada en las zonas más occidentales (figura 4), también durante el depósito de las mismas.

**El fin de la conexión: endorreísmo en el Duero, y erosión en La Bureba, desde el Mioceno superior**

Desde el inicio del Mioceno superior hay un cambio importante entre ambas áreas: en la Cuenca del Duero se instala un área lacustre (F. Cuestas y equivalentes), mientras que en La Bureba no existe sedimentación y sí, muy probablemente, erosión.

El endorreísmo de la Cuenca del Duero durante el Mioceno superior es el resultado de la creación de una zona deprimida, como se observa en el corte de la figura 8, donde las diversas particularidades morfo-estructurales son apreciables gracias a la gran diferencia de escalas vertical y horizontal con que se ha construido.

Es patente, en primer lugar, la inclinación (de 0,2°, deducibles topográficamente) de la parte occidental del Terciario de La Bureba, y el engrosamiento progresivo de la Facies Cuestas hacia el Suroeste, hechos ambos que testimonian lo antedicho. A la mencionada inclinación le es atribuible por tanto una edad, básicamente Mioceno superior, si se tiene en cuenta no sólo la edad del relleno correlativo sino, también que afecta a la Facies Tierra de Campos (Mioceno medio), inclinándola en sentido contrario al del paleoflujo fluvial que representa.

Respecto del paleosuelo desarrollado a techo de la Facies Tierra de Campos y equivalentes en la Cuenca del Duero, parecería, en principio, difícil de asumir que pueda representar un límite entre ciclos sedimentarios, ya que dicha facies fluvial integra la base de una sucesión que evoluciona hacia techo de forma aparentemente lógica (F. Cuestas, lacustre y finalmente, Calizas del Páramo 1, retractivas), y porque no es el único paleosuelo presente (la F. Tierra de Campos contiene varios en la vertical). Sin embargo, queda patente, en la evolución paleogeográfica presentada, cómo la Facies Tierra de Campos y equivalentes conforman un ambiente fluvial con nivel de base en La Bureba (-Ebro), mientras que la Facies Cuestas corresponde a una sedimentación lacustre propia de la Cuenca del Duero (lo que sí puede implicar una exposición subaérea y el desarrollo del paleosuelo importante entre ambos fenómenos): es en este contexto paleogeográfico y no en el del modelo centrípeto para la Cuenca del Duero, manejado tradicionalmente, cuando sí queda mejor justificada la existencia de un límite de ciclo a techo de la F. Tierra de Campos.

#### **Evolución y fin del endorreísmo mioceno superior en la Cuenca del Duero**

El área lacustre representada por la Facies Cuestas y equivalentes sufre una primera retracción en el Vallesiense (calizas del Páramo 1). Luego prosigue (probablemente con extensión más restringida) hasta finalizar definitivamente en el Tuoliense-Plioceno (Calizas del Páramo 2). El fin del endorreísmo en la Cuenca del Duero ha sido atribuido al inicio de su vaciado erosivo debido a la acción remontante, y erosión asociada, de la red hidrográfica atlántica.

La mayoría de autores supone que el límite entre los ciclos Páramo 1 y 2 es debido a débiles movimientos tectónicos en los bordes de la Cuenca (ver ALONSO *et al.*, 1983). En el corte de la figura 8 se observa como las calizas del Páramo 1 están afectadas por un muy débil plegamiento, que podría guardar relación con dicho límite entre ciclos, y obedecer a reajustes alpinos póstumos del área, zona compleja en la que, además de verificarse el enlace entre las

Cuencas del Duero y del Ebro-Bureba, finaliza el Sistema Ibérico, y se cruzan posibles fallas, en dirección, NE-SO (PINEDA y ARCE, 1990), con otras NO-SE (CAMARA, 1989).

#### **SOBRE EL FIN DEL ENDORREISMO, Y SU EDAD, EN LA CUENCA DEL EBRO**

Anteriormente se ha visto como, en La Bureba, la edad atribuible a los sedimentos lacustres más recientes (calizas del Puerto de La Brújula), y por tanto al fin del endorreísmo local, es Mioceno medio, estando este área, probablemente desde entonces, sometida a erosión. Puesto que La Bureba es considerada como la parte más occidental de la Cuenca del Ebro, ¿pueden ser extrapoladas las conclusiones anteriores a la totalidad de ésta?

Ello exigiría, entre otras cosas, una revisión de las edades asignadas a las diversas formaciones y unidades, al igual que ha sido realizado, en este artículo, para La Bureba.

En la parte central de la Cuenca del Ebro, las unidades terciarias más modernas (calizas "terminales" de Alcubierre, La Muela, Borja, etc.), han sido atribuidas tradicionalmente al "Pontiense" (Mioceno superior) (RIBA *et al.* 1983), con lo que, en este supuesto, el fin del endorreísmo en la Cuenca del Ebro habría tenido lugar, aproximadamente, en una época similar a la que se atribuye para el mismo fenómeno en la Cuenca del Duero.

No obstante, dichas calizas "terminales" pueden ser más antiguas, como lo sugiere la edad Aragoniense medio, obtenida por vertebrados, en un paleocanal bajo las calizas culminantes de la Muela de Borja (AZANZA, 1983). Con esta consideración, el fin del endorreísmo en la parte central de la Cuenca del Ebro habría tenido lugar, al igual que en La Bureba, en el Mioceno medio. Por tanto, esta edad podría ser la del fin de la sedimentación lacustre para la totalidad de la Cuenca del Ebro, final atribuible al inicio de su vaciado erosivo.

Este planteamiento es verosímil, pues podría explicar el mayor vaciado erosivo que, comparativamente, presenta esta Cuenca respecto de

las otras peninsulares (donde el fin del endorreísmo/inicio del vaciado habrían acaecido más tarde: en el Mioceno superior-Plioceno), apreciable en cualquier mapa físico de la Península. Asimismo, podría explicar su mayor grado de encajamiento hidrográfico (compárense, a este respecto, los 190 m a que se encuentra el Ebro en Zaragoza, desde los 810 m de las calizas de Alcubierre-Muela de Borja, con los 690 m del Duero en Valladolid desde los 860 m de los Páramos cercanos). Y es que el fin del endorreísmo en las grandes cuencas internas peninsulares debió depender, más que por razones tectónicas, del momento en que, por erosión remontante, llegaron hasta ellas los ríos que actualmente las drenan y vacian (para más detalles sobre esta problemática, véase MARTÍN-SERRANO, 1991). Lógicamente, ese momento no tuvo por qué ser (y no debió ser) el mismo para todas ellas: el camino recorrido por el bajo Ebro seccionando la Cordillera costera catalana (65 km), es notablemente más corto que los realizados por el Duero (290 km) o el Tajo (260 km) atravesando el Macizo Hespérico.

#### **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a EPTISA (Estudios y Proyectos Técnicos e Industriales, S.A.), en la persona de Ramón Roldán, el soporte material y técnico facilitado para la realización de este trabajo, a E. Piles los intercambios de ideas, y a A. Martín-Serrano su crítica. Mi reconocimiento al Instituto Tecnológico GeoMinero de España (ITGE), que autorizó el uso de datos aún inéditos, obtenidos durante el Proyecto MAGNA en el área de Burgos.

#### **REFERENCIAS**

- AEROSERVICE Ltd. (1967): *Mapa Geológico de la Cuenca del Duero, escala 1:250.000*. Inst. Nac. Coloniz. e Inst. Geol. y Min. España.
- ALBERDI, M. T.; LOPEZ, N.; MORALES, J.; SESE, C. y SORIA, D. (1981): *Bioestratigrafía y biogeografía de la fauna de mamíferos de los Valles de Fuentidueña (Segovia)*. Est. Geol. 37, pp. 503-511.
- ALONSO, G.; ARMENTEROS, I.; CARBALLEIRA, J.; CORROCHANO, A.; DABRIO, C.; JIMENEZ, E.; LOPEZ, N.;

OLIVE, A.; OLMO, P. del; POL, C.; y PORTERO, J. M. (1983): *La Depresión del Duero*. Geol. de España. Lib. Jub. J.M. Ríos, tomo II, pp. 487-489. Inst. Geol. y Min. de España.

ARCE, J. M. (1990): *Mapa Geológico de España 1/50.000. Hoja (y memoria explicativa) nº 199 (Sasamón)*. Inst. Tecnol. Geomin. España.

ARMENTEROS, I. (1986): *Estratigrafía y sedimentología del Neógeno del sector suroriental de la Depresión del Duero*. Publ. Diputación Salamanca. Serie Castilla-León. 426 págs.

AZANZA, B. (1983): *Estudio geológico y paleontológico del Mioceno del sector oeste de la comarca de Borja*. Tesis Lic. 150 págs. Dpto. Paleontología. Universidad de Zaragoza.

CAMARA, P. (1989): *La terminación occidental de la Cuenca Vasco-Cantábrica*. Libro Homenaje a Rafael Soler. Asoc. Geol. y Geof. Esp. Petróleo, pp. 27-35.

CARRERAS, F. (1978): *Mapa Geológico de España 1/50.000. Hoja (y memoria explicativa) nº 16-10 (Carrión de los Condes)*. Inst. Geol. y Min. España.

CRUSAFONT, M.; TRUYOLS, J.; y RIBA, O. (1966): *Contribución al conocimiento de la Estratigrafía del Terciario continental de Navarra y Rioja*. Not. y Com. Inst. Geol. y Min. Esp. nº 90, pp. 53-76.

GARCIA DE DOMINGO, A.; y CABRA, P. (1992): *Mapa Geológico de España 1/50.000. Hoja (y memoria explicativa) nº 238 (Villagonzalo-Pedernales)*. Inst. Tecnol. Geomin. España.

GARCIA DEL CURA, A. (1975): *Contribución al conocimiento litoestratigráfico del Terciario continental de la Cuenca del Duero (Zona Oriental)*. Actas I Col. Int. Bioestratigr. Cont. Neóg. Sup. Cuat. Inf. (Ed. por M.T. Alberdi y E. Aguirre), pp. 77-81.

HERNANDEZ-PACHECO, E. (1915): *Geología y Paleontología del Mioceno de Palencia*. Mem. Com. Inv. Paleont. Prehist. T. 5, p. 75.

IGME (1970): *Mapa Geológico de España 1/200.000. Hoja (y memoria explicativa) nº 20 (Burgos)*. Inst. Geol. y Min. de España.

JULIVERT, M.; FONTBOTE, J. M.; RIBEIRO, A.; y CONDE, L. (1974): *Mapa Tectónico (y memoria explicativa) de la Península Ibérica y Baleares*. 113 págs. Inst. Geol. y Min. de España.

LOPEZ MARTINEZ, N.; GARCIA MORENO, E.; y ALVAREZ SIERRA, M. A. (1985): *Paleontología y Bioestratigrafía (micromamíferos) del Mioceno medio y superior del sector central de la Cuenca del Duero*. Stud. Geol. Salmant. XXII; p.p 191-212.

LOPEZ, N. y SANCHIS, F. B. (1979). *Los primeros micro-*

vertebrados de la Cuenca del Duero. Listas faunísticas preliminares e implicaciones bioestratigráficas y paleosiográficas. Temas geol. mín. 6 (1), pp. 341-353.

LOPEZ-OLMEDO, F.; CABRA, P.; y ENRILE, A. (1990): *Mapa Geológico de España 1/50.000. Hoja (y memoria explicativa) n° 198 (Osorno)*. Inst. Tecnol. Geomin. España.

MARTIN-SERRANO, A. (1991): *La definición y el encajamiento de la red fluvial actual sobre el Macizo Hespérico en el marco de su geodinámica alpina*. Rev. Soc. Geol. España 4(3-4), pp. 337-351.

MEDIAVILLA, R. M. y DABRIO, C. J. (1986): *La sedimentación continental del Neógeno en el sector centro-septentrional de la depresión del Duero (Prov. de Palencia)*. Studia Geológica XXII. pp. 111-132.

MEDIAVILLA, R. M. y DABRIO, C. J. (1987): *Tectonics as a major control of sedimentation and facies distribution in the neogene of the Duero basin (Spain)*. Int. Ass. Sedim. STH Reg. Meeting of sedimentology. Abstr. pp. 346-347.

MEDIAVILLA, R. M. y DABRIO, C. J. (1988): *Controles sedimentarios neógenos en la Depresión del Duero (Sector Central)*. Rev. Soc. Geol. España. Vol. 1 (1-2). pp. 187-195.

MEDIAVILLA, R. M. y DABRIO, C. J. (1989): *Análisis sedimentológico de los conglomerados de Tariego (unidad 4, Neógeno de la depresión del Duero)*. Studia Geológica Salm. V. 5, pp. 293-310 (Paleogeogr. Meseta N. Terciario).

OLIVE, A.; RAMIREZ, J. I.; y ORTEGA, L. I. (1987): *Mapa Geológico de España 1/50.000. Hoja (y memoria explicativa) n° 201 (Belorado)*. Inst. Tecnol. Geomin. Esp.

OLMO, P. del; y PORTERO, J. M. (1978): *Mapa Geológico de España 1/50.000. Hoja (y memoria explicativa) n° 311 (Dueñas)*. Inst. Geol. y Min. de España.

PAVON, J.; GARCIA ARGÜESO, J. M.; COLMENERO, J. R.; SANCHEZ DE LA TORRE, L.; y MANJON, M. (1975): *Mapa Geológico de España 1/50.000. Hoja (y memoria explicativa) n° 237 (Castrogeriz)*. Inst. Geol. y Min. España.

PAVON, J.; GARCIA ARGÜESO, J. M.; MANJON, M.; SANCHEZ DE LA TORRE, L.; y COLMENERO, J. R. (1975): *Mapa*

*Geológico de España 1/50.000. Hoja (y memoria explicativa) n° 236 (Astudillo)*. Inst. Geol. y Min. España.

PINEDA, A. (1990): *Mapa Geológico de España 1/50.000. Hoja (y memoria explicativa) n° 166 (Villadiago)*. Inst. Tecn. Geomin. España.

PINEDA, A. (1991): *Mapa Geológico de España 1/50.000. Hoja (y memoria explicativa) n° 167 (Montorio)*. Inst. Tecnol. Geomin. España.

PINEDA, A.; y ARCE, J. M. (1990): *Mapa Geológico de España 1/50.000. Hoja (y memoria explicativa) n° 200 (Burgos)*. Inst. Tecnol. Geomin. Esp.

POL, C.; y CARBALLEIRA, J. (1983): *El sector nororiental (de la Cuenca del Duero) y su enlace con el surco Ebro-Rioja*. Geol. de España, Lib. Jub. J.M. Ríos tomo II, pp. 507-513. Inst. Geol. y Min. de España.

PORTERO, J. M.; HERNANDEZ, A.; RAMIREZ DEL POZO, J.; y RIBA, O. (1978): *Mapa Geológico de España 1/50.000. Hoja (y memoria explicativa) n° 168 (Briviesca)*. Inst. Geol. y Min. de España.

PORTERO, J. M.; OLMO, P. del; y OLIVE, A. (1983): *El Neógeno de la transversal norte-sur de la Cuenca del Duero*. Libro jubilar J.M. Ríos "Geología de España", pp. 494-502. Inst. Geol. Min. Esp.

PORTERO, J. M.; OLMO, P. del; RAMIREZ, J.; y VARGAS, I. (1979): *Síntesis del Terciario continental de la Cuenca del Duero*. I Reunión sobre la Geología de la Cuenca del Duero. Salamanca 1979. Publ. Temas Geológico-Mineros, n° 6(2). Inst. Geol. Min. Esp.

POZO, M., RAMES, M. C. y FONOLLA, F. (1984): *Estudio mineralógico, geoquímico y paleontológico de los materiales de transición de facies fluviales a evaporíticas en el sector central de la Cuenca del Duero*. Univ. Compl. Madrid; Rev. Mat. Proc. Geol. 2, pp. 95-113.

RIBA, O. (1954): *El Terciario continental de La Rioja Alta y de La Bureba*. Ciepsa (Inédito).

RIBA, O.; REGUANT, S.; y VILLENA, J. (1983): *Ensayo de síntesis estratigráfica y evolutiva de la Cuenca terciaria del Ebro*. Geol. de España. Lib. Jub. J.M. Ríos, Tomo II, pp.131-159. Inst. Geol. y Min. de España.

Original recibido: Diciembre 1995.

Original aceptado: Enero 1996.

## Estudio del movimiento de sedimentos en la playa de "Regla" (Chipiona-Cádiz), mediante el uso de trazadores fluorescentes.

Por J. J. MUÑOZ PEREZ (\*); J. M. GUTIERREZ MAS (\*\*)  
y J. M. PARRADO ROMAN (\*\*)

### R E S U M E N

El conocimiento de la dinámica litoral es un importante objetivo de la ingeniería de costas, al ser causa de las variaciones rápidas que afectan a las playas. Durante los estudios de seguimiento de la playa de "Regla" (Chipiona-Cádiz), tras su regeneración, se realizó una siembra de trazadores fluorescentes para comprobar si el espigón construido era rebasable por el sedimento. Los resultados han mostrado la utilidad de los trazadores en el estudio cualitativo de la dinámica litoral, comprobándose la tendencia de algunos tamaños de grano a permanecer en ciertos sectores de la playa, mientras que otros son transportados rápidamente como carga de fondo o en suspensión. Las fracciones arena gruesa y muy fina se eliminaron rápidamente mar adentro y hacia el Norte, mientras que la arena media y fina permanecieron más tiempo. También se ha comprobado su utilidad en la determinación de corrientes residuales y en la determinación del tiempo de inversión del flujo de sedimentos al cambiar las condiciones hidrodinámicas. Los principales inconvenientes, derivaron de la preparación, detección y conteo de los trazadores.

*Palabras clave:* Trazadores fluorescentes, dinámica litoral, playas.

### A B S T R A C T

The littoral dynamic knowledge is a main topic in coastal ingeniery, due their influence in the fast beach variations. During the regeneration study of "Regla" beach in Chipiona (Cádiz, Spain), an injecting and pursuit of fluorescent tracers was made for testing if the sting constructed was rebasable by the sediments. The results shown the utility of the "tracers" in cualitative study about littoral dynamic. Same grain size fracctions remained ir. the beach, while others fractions were quickly transported as bed or suspension load. The coarse and very fine sand fractions were transported seaward and northward from the inject points in subtidal and intertidal zones. The medium an fine sand fractions remained more time in intertidal and subtidal zones before to be transported. The utility of tracers in determination of residual currents and flow inversion time by the sediment transported with changes of the surficial hydrodynamic conditions has been also verified. The main problems were derivated from detection, pursuit and counting of grains.

*Key words:* Fluorescent tracers, littoral dynamic, beaches.

### INTRODUCCION

El estudio del movimiento de sedimentos en las zonas litorales es complejo debido a las interacciones entre sedimento y agua, pudiendo ser medido de forma cuantitativa, como una tasa o

(\*) Dpto. de Física Aplicada.

(\*\*) Dpto. de Cristalografía y Mineralogía, Estratigrafía, Geodinámica, Petrología y Geoquímica. Facultad de Ciencias del Mar. Univ. de Cádiz. Pol. Río San Pedro, s/n.11540 Puerto Real, Cádiz, Spain.

concentración, o cualitativamente, determinando las direcciones de transporte y dispersión del sedimento, para lo cual puede resultar útil el empleo de trazadores (SASAKI y SAKURAMOTO, 1984). Un "trazador fluorescente" o "luminóforo", se puede definir como el resultado de marcar un determinado sedimento, natural o artificial, con un recubrimiento superficial formado por una solución de pintura fluorescente, una resina base y un endurecedor (FERNANDEZ-RAÑADA, 1982).

Debido a las dificultades de las técnicas requeridas, la aplicación de "trazadores fluorescentes" al estudio de la dinámica litoral se practica relativamente poco. Su utilización en el estudio del transporte longitudinal en playas se introdujo en base a la metodología desarrollada para el estudio del transporte fluvial (LEAN y CRICKMORE, 1963, CRICKMORE, 1967) y han sido utilizados por diferentes autores (INMAN y CHAMBER-LAIN, 1959; INGLE, 1965; ZENKOVICH, 1967; KOMAR e INMAN, 1970; KNOTH y NUMMEDAL, 1977; INMAN et al., 1980; KRAUS et al., 1982 y HORIKAWA, 1988, entre otros).

La ventaja del uso de trazadores radica en que en la naturaleza existen sedimentos (gravas y arenas) que pueden marcarse fácilmente y que su preparación, manejo y almacenaje son sencillos. Además, las pinturas fluorescentes utilizadas no presentan problemas sanitarios ni medio-ambientales y existe una amplia gama de colores en el mercado. La durabilidad del recubrimiento fluorescente puede ajustarse en función de la solubilidad media del ligante utilizado teniendo algunos una vida útil de varios meses.

El objetivo básico de un ensayo con "trazadores fluorescentes" es el seguimiento del sedimento marcado durante un período de tiempo, en un espacio determinado y, mediante el estudio de su comportamiento, conocer el movimiento del sedimento natural, lo que sólo es posible si el comportamiento hidrodinámico del trazador es similar al del sedimento que se pretende estudiar (FERNANDEZ-RAÑADA, 1982).

En el año 1992, la Demarcación de Costas de Andalucía-Atlántico procedió a la regeneración de la playa de "Regla" en Chipiona (Cádiz) (Fig. 1), consistente en la construcción frente al faro de la "Punta del Perro" de un espigón de escollera hasta una profundidad de -2 m, para proteger la playa de las corrientes que tienen lugar cerca de la desembocadura del río Guadalquivir, y de un vertido de 500.000 m<sup>3</sup> de arena, sobre una extensión de 1.500 m lineales de costa. Como complemento a los trabajos de ingeniería, se diseñó una campaña de control de la dinámica sedimentaria, mediante la siembra de "trazadores fluorescentes", con objeto de comprobar si el espigón era rebasable por el sedi-

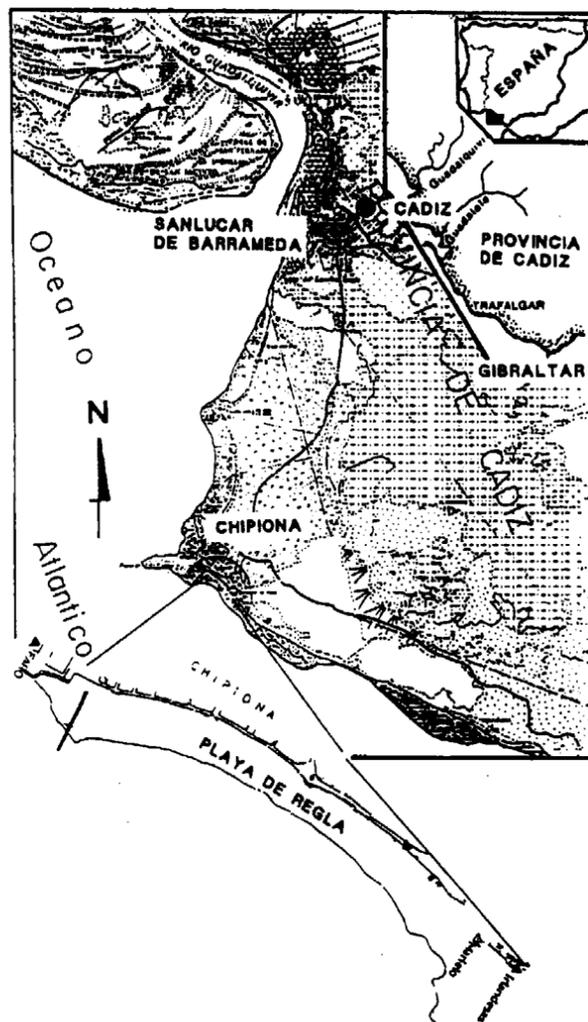


Figura 1. Situación geográfica de la zona de estudio

mento utilizado en la regeneración y establecer las direcciones de transporte y distribución de sedimentos en determinadas condiciones hidrodinámicas.

#### Características hidrodinámicas generales

Aunque el movimiento y transporte de sedimentos en las zonas litorales está controlado fundamentalmente por el oleaje y las corrientes derivadas de éste (AI-MANSI, 1990), en el mismo, convergen diversos factores como,

velocidad y dirección del viento, dirección y altura de las olas, amplitud de las mareas y características del fondo, que actúan en las zonas costeras.

La playa de "Regla" se encuentra en el extremo noroccidental de la provincia de Cádiz, junto a la desembocadura del río Guadalquivir, con una orientación general de NO a SE y presenta un carácter disipativo de la energía del oleaje, debido a su amplitud y a su pendiente relativamente suave. La existencia de una amplia plataforma rocosa a lo largo de la misma, y que emerge en los extremos norte y sur de la playa, facilitan el asentamiento de la arena y controla en buena parte el oleaje, colaborando a la estabilidad del sedimento y a su permanencia.

En este sector del Golfo de Cádiz, los vientos del NO, debido a la orientación de la costa de cara a los temporales de esta dirección, generan una corriente hacia el SE, mientras que los vientos del SO, S y SE, dan lugar a corrientes litorales hacia el N y NO. La frecuencia de olas de altura superior a 0,25 m, tomada del Atlas de Clima Marítimo del Litoral Español (R.O.M. 0.3-91, Area IV) para el período 1982-1990, indica para el oleaje tipo "sea" (mar de viento) un enfrentamiento Levante-Poniente, con predominio de la componente E, mientras que para el oleaje tipo "swell" (mar de fondo), predomina la componente O. En cuanto al rango de mareas, la zona tiene un claro carácter mesomareal, con una amplitud máxima de 3,7 m.

#### METODOLOGIA

El empleo de "trazadores fluorescentes" requiere técnicas de preparación especializadas: en primer lugar se selecciona arena de características granulométricas similares a la de la zona activa de la playa que se pretende estudiar. Los trazadores seleccionados deben tener buena luminosidad, para facilitar su detección con luz ultravioleta, el recubrimiento fluorescente debe ser completo y resistente a la fricción, y estar perfectamente disgregado, para que no aparezcan aglomeraciones de granos que modifiquen el tamaño y la distribución de tamaños del sedimento natural.

Tras el lavado de la arena natural con agua dulce y su secado, se recubre ésta con resina sintética y pintura fluorescente. Posteriormente se tamiza para calibrar la granulometría comprobándose si se ha alterado significativamente la distribución de tamaños.

Se emplearon tres coloraciones: rodamina (rojo), 225 kg; auramina (amarillo), 225 kg y uvitex (blanco), 50 kg, que se sembraron en diversos sectores de la playa: la rodamina se vertió desde una embarcación en la zona submareal, a -3 m de profundidad respecto del cero hidrográfico, en el sector central de la playa; la auramina se vertió en la zona intermareal central, en la cota +2 m, y el uvitex en la zona intermareal al norte del espigón de escollera, en la cota +2 m.

La siembra se realizó el 21 de Mayo de 1993, y el seguimiento consistió en el rastreo diario con luz ultravioleta, durante las bajamares nocturnas, hasta el día 24 de Junio del mismo año. El estudio se ha completado con dos campañas de muestreo, a los 12 y 32 días de la siembra, con objeto de determinar la proporción de trazadores en las diferentes fracciones de tamaño de grano y conocer la evolución de los diversos sectores de la playa durante este período. Las campañas incluyeron 65 desmuestras en 13 perfiles de playa perpendiculares a la orilla, desde la cota +3 m a la de -2 m. Posteriormente, las muestras fueron tamizadas para conocer su distribución granulométrica, realizándose también el conteo de partículas trazadas presentes en cada fracción de tamaño.

#### RESULTADOS Y DISCUSION

##### Seguimiento de los trazadores

Los dos primeros días la situación fue de viento del NO, con una altura de olas entre 0,3 y 0,4 m, que dió lugar a un transporte de sedimentos hacia el SE (Fig. 2A). El tercer día la situación cambió a viento del SO, con olas de 0,2 a 1 m de altura, iniciándose un flujo de granos hacia el N (Fig. 2B), registrándose no obstante un flujo residual hacia el SE, que se sostiene hasta el quinto día de rastreo (Fig. 2B) y que pone de

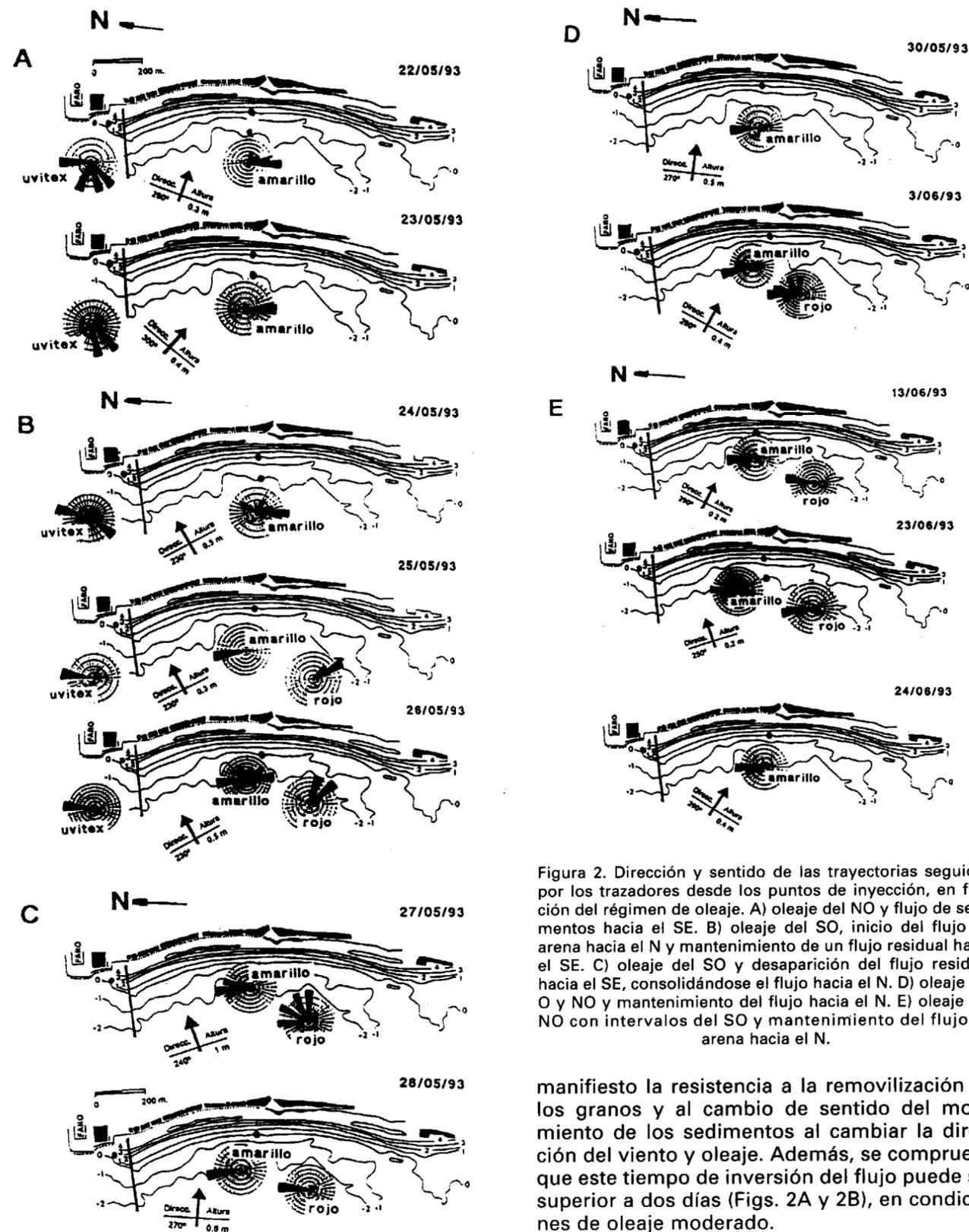


Figura 2. Dirección y sentido de las trayectorias seguidas por los trazadores desde los puntos de inyección, en función del régimen de oleaje. A) oleaje del NO y flujo de sedimentos hacia el SE. B) oleaje del SO, inicio del flujo de arena hacia el N y mantenimiento de un flujo residual hacia el SE. C) oleaje del SO y desaparición del flujo residual hacia el SE, consolidándose el flujo hacia el N. D) oleaje del O y NO y mantenimiento del flujo hacia el N. E) oleaje del NO con intervalos del SO y mantenimiento del flujo de arena hacia el N.

manifiesto la resistencia a la removilización de los granos y al cambio de sentido del movimiento de los sedimentos al cambiar la dirección del viento y oleaje. Además, se comprueba que este tiempo de inversión del flujo puede ser superior a dos días (Figs. 2A y 2B), en condiciones de oleaje moderado.

Durante días sucesivos, persistió la situación de oleaje del SO, con ligeros intervalos del O y NO, sosteniéndose el flujo de arena hacia el N, que se mantuvo estable prácticamente hasta el final del seguimiento, cuando la situación vuelve a ser del NO (Figs. 2C, 2D y 2E). Los cortos intervalos de oleaje del NO que tuvieron lugar durante este período, no alteraron el flujo hacia el N, mostrando que la tendencia general de las corrientes litorales y del movimiento de sedimentos en este sector del litoral, es desde el S hacia el N.

### Comportamiento hidrodinámico del sedimento y de las partículas trazadas

Los resultados de la primera campaña de muestreo, realizada a los 12 días de la siembra, indican que la playa se encuentra diferenciada en sectores o tramos de granulometría diferente (Fig. 3A), apareciendo los límites entre materiales de diferente granulometría perpendicularmente a la orilla. La arena muy fina (0,18-0,063) aparece al N de la playa, junto al espigón, incrementándose progresivamente el tamaño de grano hacia el S. Tras la segunda campaña de

muestreo, realizada a los 32 días de la siembra, los resultados muestran la pérdida de la fracción arena muy fina y casi toda la gruesa (>1 mm), estabilizándose los tamaños medios (Fig. 3B).

El análisis de la distribución espacial de los trazadores en relación con los diferentes tamaños de grano, ha permitido establecer las trayectorias seguidas por cada fracción de tamaño presente en el sedimento y determinar las interacciones entre la zona intermareal y submareal, a través del intercambio de sedimentos de diferente granulometría.

### 1ª Campaña de muestreo.

a) El comportamiento del **trazador rojo** (rodamina), indica también el de la masa de los sedimentos que se encuentran inicialmente en la zona submareal, donde se vertió. La **arena gruesa** fue transportada hacia el O, mar adentro y hacia el N, paralelamente a la orilla (Fig. 4A), apareciendo la mayor concentración de trazador al O del punto de vertido, entre 0 y -2 m, sin ascender a la zona intermareal; la **arena media**, se desplazó hacia el N, paralelamente a la orilla, por la zona intermareal y submareal, alcanzándose la máxima concentración de partículas a -2 m; la **arena fina**, se desplaza hacia el N a lo largo de la playa y mar adentro, encontrándose trazas en la zona intermareal y acumulaciones cerca del espigón hasta +4 m; la **arena muy fina** sufrió transporte hacia el N y mar adentro y no se incorporó a la zona intermareal, excepto en un sector junto al espigón, entre 0 y +3 m.

b) El comportamiento del **trazador amarillo** (auramina), indica el de la masa de sedimentos que se encuentran inicialmente en la zona intermareal, donde se vertió. La **arena gruesa**, no aparece en la zona intermareal, a pesar de estar inicialmente en algunos sectores (Fig. 4B), lo que indica un transporte rápido hacia mar adentro o bien, por acción eólica hacia tierra o lateralmente; la **arena media**, fue transportada hacia el N, paralelamente a la orilla por la zona intermareal y también mar adentro, hacia la zona submareal, entre 0 y -1 m; la **arena fina**, tiene un comportamiento similar a la arena media, mientras que la **arena muy fina**, desaparece en buena parte, observándose parches de alta concentración de trazador, que indican un tipo de transporte intermitente hacia mar adentro.

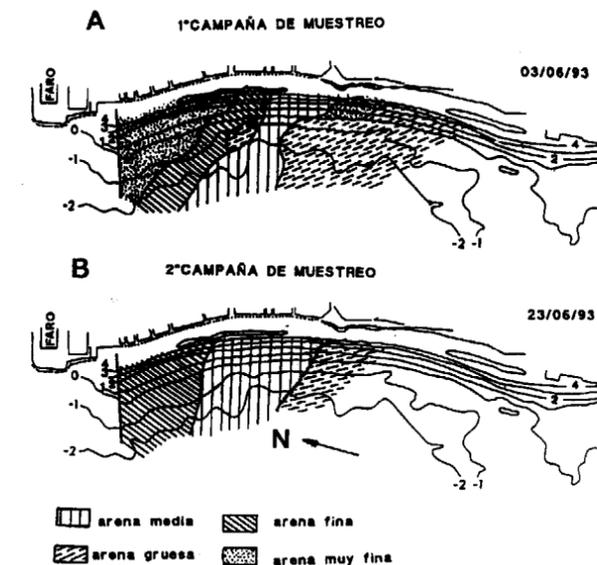


Figura 3. Distribución de facies granulométricas en la playa de "Regla" a partir de los resultados obtenidos de la primera y segunda campaña de muestreo. A) a los 12 días de la siembra; B) a los 32 días de la siembra.

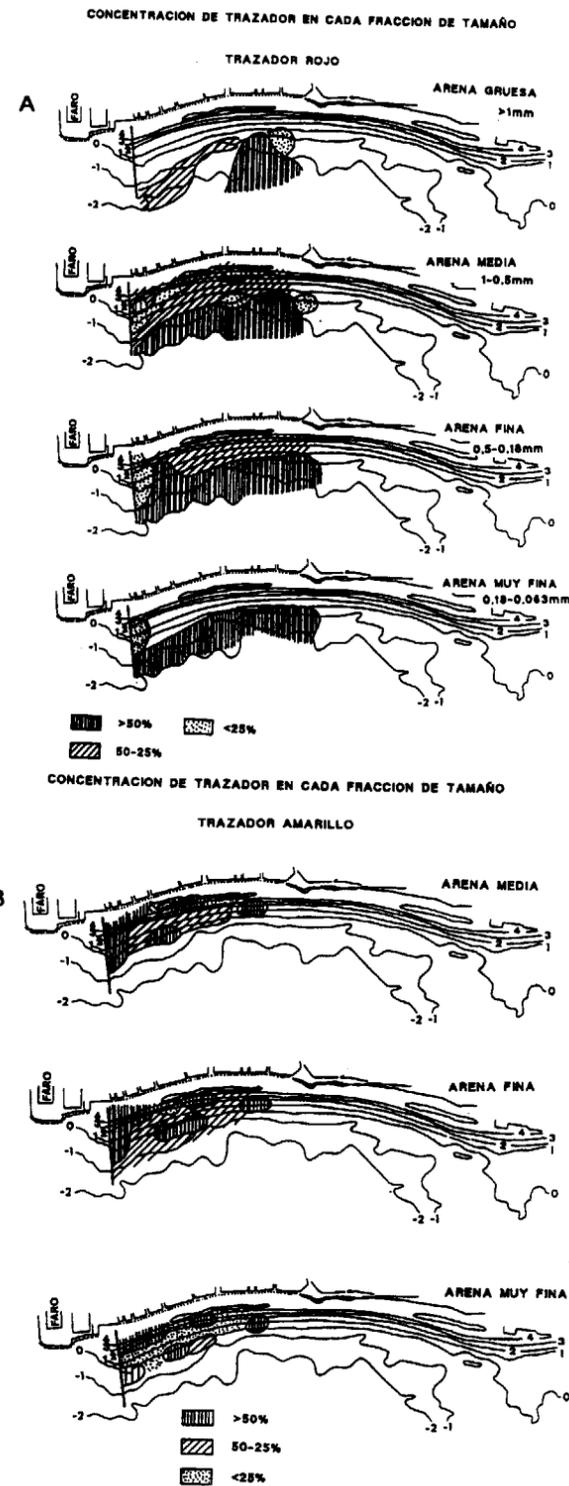


Figura 4. Comportamiento hidrodinámico y trayectorias de los granos de arena, a partir de los datos de concentración de trazador en las diferentes fracciones de tamaño, obtenidos en la primera campaña de muestreo. A) trazador rojo. B) trazador amarillo.

c) El seguimiento del **trazador blanco** (uvitex), aparte de su difícil localización, mostró su rápida dispersión por acción de las corrientes de retorno y las mareas y prácticamente desaparece de la zona de estudio.

**2ª Campaña de muestreo.**

En esta segunda fase, se observa una gran disminución de la proporción de partículas trazadas en el sedimento, debido al efecto del transporte, la dispersión y al enterramiento.

El comportamiento del **trazador rojo** permite deducir que la arena gruesa desaparece (Fig. 5A), mientras que la arena media y fina aparece sólo en la zona submareal, desapareciendo casi totalmente de la intermareal, excepto en un sector junto al espigón, al N de la playa. Las partículas de arena muy fina desaparecen tanto de la zona intermareal como de la submareal.

En cuanto al **trazador amarillo**, se observa la desaparición de la arena gruesa y muy fina (Fig. 5B), mientras que las fracciones de arena media y parte de la fina descienden de la zona intermareal a la submareal.

Este transporte selectivo de los granos trazadores, se debe fundamentalmente al diferente comportamiento hidrodinámico de las distintas fracciones de tamaño presentes en el sedimento durante su desplazamiento a lo largo de la playa. EVANS (1939) y KOMAR (1977), mediante estudios experimentales, llegaron a la conclusión de que, el transporte por acción de la deriva litoral, de los granos de arena mayores, se realiza como carga de fondo y que, cuanto mayor es el tamaño de grano, mayor es la velocidad de transporte. Para el caso de la carga en suspensión, la tendencia es inversa, de forma que las partículas tienden a tener velocidades mayores cuanto menor es su tamaño (KOMAR, 1977).

BITTENCOURT et al. (1991), en la bahía de "Todos os Santos" (Brasil), demuestran que, en la zona del "shoreface", la arena gruesa y media se mueven continuamente como carga de fondo, mientras que la arena muy fina lo hace en suspensión y la arena fina sufre un retraso respecto a las otras fracciones probablemente porque es transportada en saltación.

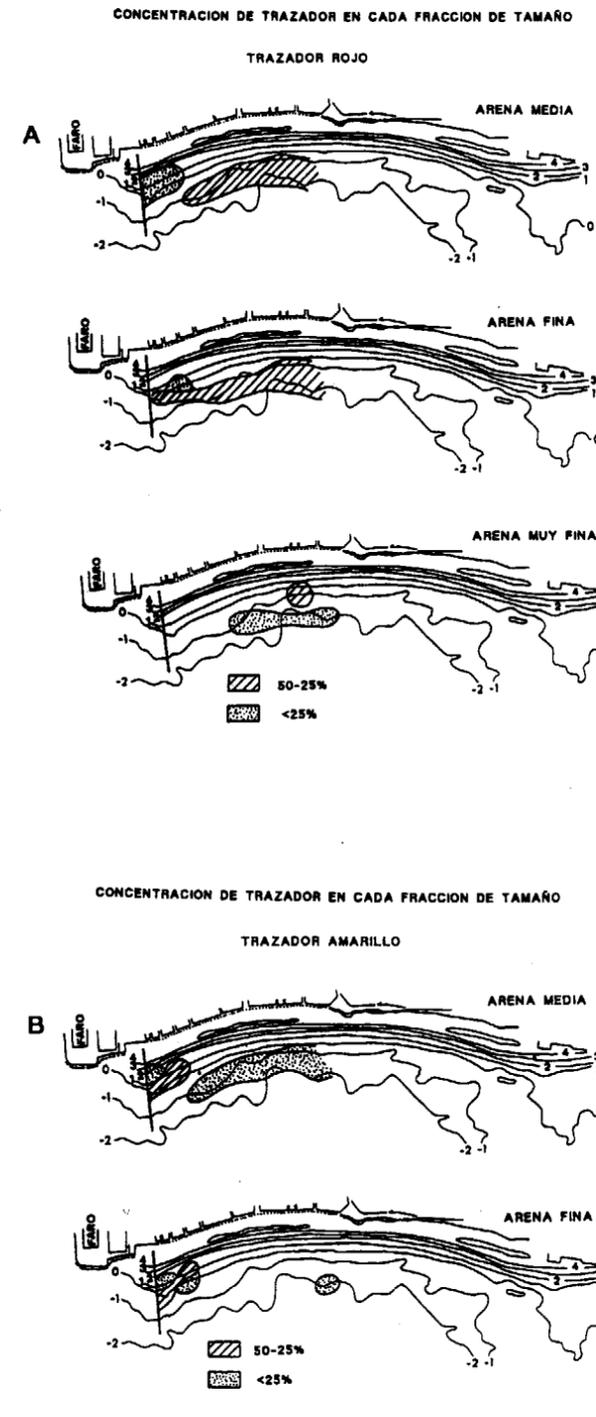


Figura 5. Comportamiento hidrodinámico y trayectorias de los granos de arena, a partir de los datos de concentración del trazador en las diferentes fracciones de tamaño, obtenidos en la segunda campaña de muestreo. A) trazador rojo. B) trazador amarillo

Estos datos justifican la rápida eliminación de la arena gruesa en la playa de "Regla", tanto en la zona intermareal como en la submareal, al ser transportada en su mayor parte como carga de fondo rápidamente hacia mar adentro, por acción de las corrientes de resaca, y lateralmente, por las corrientes de deriva litoral, sin llegar a ascender a la zona intermareal, al menos en las condiciones de oleaje descritas (Fig. 6).

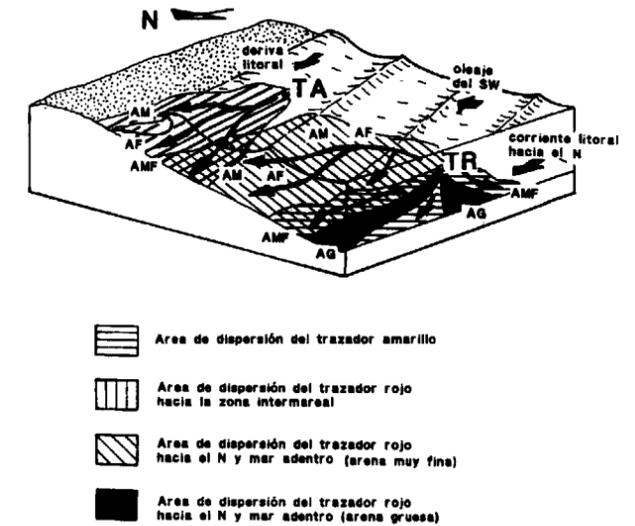


Figura 6. Dispersión de las distintas fracciones de tamaño de las partículas trazadas desde los puntos de inyección. TA: punto de inyección del trazador amarillo (zona intermareal); TR: punto de inyección del trazador rojo (zona submareal); AG: arena gruesa; AM: arena media; AF: arena fina; AMF: arena muy fina.

La arena media es transportada también como carga de fondo, aunque más lentamente que la gruesa, como muestra su mayor tiempo de permanencia, desplazándose hacia el N paralelamente a la orilla y también perpendicularmente a ésta, intercambiándose entre las zonas intermareal y submareal.

La arena fina, presenta una velocidad de transporte menor que la arena gruesa y media, debido a que sufre un retardo al ser transportada en saltación, y por tanto, presenta un mayor tiempo de permanencia en todos los sectores de la playa, especialmente en la zona submareal.

En el caso de la arena muy fina, transportada como carga en suspensión, no llega a ascender a la zona intermareal y es eliminada finalmente de la zona submareal, aunque a menor velocidad que la arena gruesa.

#### Acción de las corrientes

A partir de los datos proporcionados por las direcciones de dispersión de los trazadores y del comportamiento hidrodinámico de éstos, se ha deducido el sistema de corrientes residuales que afectan al transporte de sedimentos en la playa de "Regla", en una situación hidrodinámica similar a la encontrada durante el período de estudio (Fig. 7), entendiéndose como tal aquella cuya duración es superior a un ciclo de mareas (HORIKAWA, 1988):

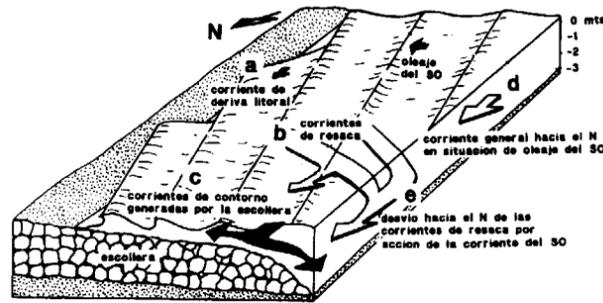


Figura 7. Sistema de corrientes responsables del transporte de sedimentos en la playa de Regla. a) corriente de deriva litoral; b) corrientes de resaca; c) corriente de contorno generada por el choque con la escollera; d) corriente litoral hacia el N en situación de oleaje del SO; e) desvío hacia el N de las corrientes de resaca.

a) Una corriente de deriva litoral generada por la incisión de los frentes de olas sobre la orilla, responsable del transporte hacia el N de los sedimentos, efectuado paralelamente a la orilla, por la zona intermareal.

b) Una corriente de retorno (rip current) producida por el incremento del gradiente de altura del agua en la orilla por acumulación de olas, responsable del transporte mar adentro de las fracciones más gruesas y más finas, junto con el refluo mareal.

c) Corrientes de contorno de diversa dirección, generadas por el choque de las corrientes de deriva litoral y de retorno contra el espigón de escollera ubicado al norte de la playa, responsable de la acumulación de sedimento en el sector N de la playa, especialmente en la zona intermareal y en la playa seca, y del transporte mar adentro en la zona submareal.

d) Una corriente litoral hacia el NO generada en este sector del Golfo de Cádiz en condiciones de viento y oleaje del S y SO.

e) Desvío de las corrientes de retorno (rip current) hacia el NO, por acción de la corriente litoral al NO generada en situación de oleaje del SO, responsables del transporte de la masa de sedimentos lateralmente, hacia el N, paralelamente a la orilla, por la zona submareal (shoreface).

#### CONCLUSIONES

Los resultados muestran la utilidad de los "trazadores fluorescentes" en la estimación cualitativa de la dinámica litoral, especialmente en el control del movimiento de la arena en relación con las condiciones hidrodinámicas, habiéndose podido establecer el flujo de sedimentos en las zonas intermareal y submareal en relación con los cambios de dirección de viento y oleaje.

Se verifica que el transporte de sedimentos está controlado fundamentalmente por el oleaje y las corrientes derivadas, habiéndose establecido que el tiempo de removilización del sedimento, al cambiar las condiciones hidrodinámicas en superficie, en condiciones de altura media de olas, es de 1 a 2 días, tras el cambio, debido a la permanencia durante cierto tiempo de un flujo residual.

El comportamiento hidrodinámico de los granos muestra que, la arena gruesa es transportada rápidamente como carga de fondo mar adentro y hacia el N paralelamente a la orilla, mientras que la arena media y fina son más estables y permanecen más tiempo en la zona intermareal y submareal antes de sufrir transporte como

carga de fondo y en saltación respectivamente. A su vez, la arena muy fina es retirada relativamente rápida como carga en suspensión.

Asimismo, se ha establecido el sistema de corrientes que afectan al movimiento de sedimentos en el litoral: una corriente de deriva litoral por choque de los frentes de olas con la orilla; una corriente de retorno (rip current), por aumento del gradiente de altura del agua en la orilla; una corriente de contorno por choque de las corrientes de retorno y deriva con la escollera, una corriente litoral hacia el NO en situación de oleaje del SO y el desvío hacia el NO de las corrientes de retorno, por acción de la corriente litoral hacia el NO.

Los inconvenientes del uso de "trazadores fluorescentes", derivaron de la dificultad de su preparación, calibrado de la distribución de tamaños y problemas de detección, recogida y conteo de partículas, por lo que los pigmentos utilizados deben poseer buena luminosidad para facilitar su detección con luz ultravioleta, debiendo comprobarse que el comportamiento hidrodinámico sea lo más parecido posible al del sedimento natural de la zona a estudiar.

#### REFERENCIAS

- AL-MANSI, A. (1990): *Wave refraction patterns and sediments transport in Monifieth Bay, Tay Estuary, Scotland*. *Marine Geology*, Vol. 91, pp: 299-312.
- BITTENCOURT, A.; BOAS, G.; AZEVEDO, A. y FARIAS, F. (1991): *Taxas de transporte seletivo para diferentes tamanhos de partículas ao longo de uma praia: repercussao no registro sedimentar*. *Rev. Brasileira de Geociencias*, 21 (2), pp: 121-126.
- CRICKMORE, M. J. (1967): *Measurement of sand transport in rivers with special reference to tracer methods*. *Sedimentology*, Vol. 8, pp: 175-228.
- EVANS, O. F. (1939): *Sorting and transportation of material in the swash and backwash*. *Journ. Sed. Pet.* 9. 28-31.

FERNANDEZ-RAÑADA DE LA GANDARA, J. C. (1982), *Trazadores fluorescentes: utilización en el estudio del movimiento de sedimentos en las proximidades del litoral*. MOPU. CEDEX. Cuadernos de Investigación (C4), 35 pp

HORIKAWA, K. (1988): *Nearshore dynamics and coastal processes. Theory, Measurement, and Predictive Models*. Univ. Of Tokyo. Press. 522 pp.

INGLE, J. C. (1965): *The movement of beach sand*. Elsevier, 221 pp.

INMAN, D. L. y CHAMBERLAIN, T. K. (1959): *Tracing sand movement with irradiated quartz*. *J. Geophys. Res.*, Vol. 64, pp: 41-47.

INMAN, D. L.; ZAMPOL, J. A.; WHITE, T. E.; HAVES, D. M.; WALDORF, B. W. y KASTENS, K. A. (1980): *Field measurements of sand motions in the surf zone*. *Proc. 17th Coastal Eng. Conf., ASCE*, pp: 1215-1234.

KNOTH, J. S. y NUMMEDAL, D. (1977): *Longshore sediment transport using fluorescent tracers*. *Proc. Coastal Sediment*, 77, ASCE, pp: 382-398.

KOMAR, P. D. e INMAN, D. L. (1970): *Longshore sand transport on beaches*. *J. Geophys. Res.*, Vol. 75, pp: 5914-5927.

KOMAR, P. D. (1977): *Selectiva longshore transport rates of different grain-size fraction within a beach*. *Journ. Sed. Pet.* 47, pp: 1444-1453.

KRAUS, N. C.; ISOBE, M.; IGARASHI, H.; SASAKI, T. y HORIKAWA, K. (1982): *Field experiments on longshore sand transport in the surf zone*. *Proc. 18th Coastal Eng. Cong., ASCE*, pp: 969-988.

LEAN, G. H. y CRICKMORE, M. J. (1963): *Method for measuring sand transport using radioactive tracers*. In: *Longuet-Higgins, M.S.; D.E. Cartwright and N.D. Smith, 1963: Observations of the directional spectrum of sea waves using the motions of a floating buoy*. *Ocean Wave Spectra*, Prentice-Hall, Engle-wood Cliff, New Jersey, pp: 111-136.

SASAKI, T. y SAKURAMOTO, H. (1984): *Effect of rip current barrier on harbor shoaling*. *Proc. 15th Coastal Eng. Conf., ASCE*, pp: 626-644.

ZENKOVICH, V. P. (1967): *Processes of Coastal Development*. Oliver and Boyd. Edimburg, 738 pp.

Original recibido: Noviembre 1995.

Original aceptado: Enero 1996.

## GEOLOGIA

# Caracterización del género *Acer* Linné (Magnoliophyta) en el Vallesiense (Neógeno) de la comarca de la Cerdaña (Lérida, España).

Por E. BARRON (\*)

## RESUMEN

Se realiza un estudio sistemático de los restos fósiles asignables al género *Acer* L., que se han colectado en los yacimientos de la cuenca lacustre del Vallesiense de la Cerdaña (Lérida, España), tras el cual se identifican y describen tres especies: *A. integerrimum* (VIVIANI) MASSALONGO, *A. pyrenaicum* REROLLE y *A. subcampestre* GOEPPERT, a partir de restos macroscópicos. Además, se describen otros restos asignables a *Acer* entre los que se encuentran: sámaras, una flor y palinomorfos.

*Palabras clave:* Paleobotánica, *Acer*, Estudio sistemático, Vallesiense, Neógeno, la Cerdaña, Lérida, España.

## ABSTRACT

Fossil remains assigned to the genus *Acer* L. have been collected in the Vallesian (Neogene) outcrops from the Cerdaña region (Lérida province, Spain). Three species have been identified and described, *A. integerrimum* (VIVIANI) MASSALONGO, *A. pyrenaicum* REROLLE and *A. subcampestre* GOEPPERT on the basis of megaremaines. Moreover, the genus *Acer* has also been detected through samari, a flower and some palynomorphs.

*Key words:* Palaeobotany, *Acer*, Systematic study, Vallesian, Neogene, Cerdaña, Lérida, Spain.

## INTRODUCCION

Los representantes actuales del género *Acer* son fanerófitos andromonóicos, androdioicos o dióicos que se caracterizan por presentar generalmente las hojas simples y palmadas, aunque algunos de ellos las tienen compuestas; poseen el fruto en esquizocarpo, dando comúnmente una doble sámara (CRONQUIST, 1981; HEYWOOD, 1985). *Acer* integra la familia Aceraceae junto con el género *Dipteronia* OLIV., que presenta una distribución tropical. Los primeros restos fósiles asignables a la familia Aceraceae son frutos y hojas del Maastrichtiense de Alberta (Canadá), agrupados en el complejo "*Acer*" *arcticum* (WOLFE & TANAI, 1987).

El género *Acer*, el cual presenta en la actualidad unas 140 especies (WOLFE, 1981), es hoy en día uno de los principales integrantes de las formaciones arbóreas Hemisferio Norte. Sus distintas especies se desarrollan en ecosistemas muy diferentes que van desde la taiga hasta los bosques tropicales (WOLFE & TANAI, 1987).

Asimismo, el género *Acer* tuvo una extensa representación durante el Terciario, como lo atestigua el abundante registro que ha dejado en Europa, Asia y América (WALTHER, 1972; TANAI, 1983; WOLFE & TANAI, 1987). Se han descrito leños atribuibles a *Acer* o semejantes a éste del Cretácico al Neógeno (SUZUKI, 1982; TAKAHASHI & SUZUKI, 1988). No obstante, WOLFE & TANAI (1987), expresaron que los primeros registros del género *Acer* proceden del Paleoceno superior y Eoceno inferior de Alaska, tratándose de restos foliares y frutos (WOLFE &

TANAI, 1987), que confirman que se trata de un género típicamente arctoterciario, según lo expresado por ENGLER (1883).

Los primeros palinomorfos indudablemente asignables al género que nos ocupa proceden del Oligoceno inferior de la Columbia Británica (Canadá), siendo referidos por MULLER (1981) al tipo *Acer campestre* L.

En el Mioceno Superior de la Cerdaña hemos encontrado representado el género *Acer* tanto por macrorrestos, de una forma muy abundante, como por palinomorfos.

En el presente trabajo se describen y analizan un conjunto de restos fósiles tanto macroscópicos como microscópicos atribuibles al género *Acer*, colectados en los afloramientos de la cuenca de la Cerdaña, lo que incrementa el conocimiento paleobotánico de la cuenca y nos ayuda a comprender el origen y las tendencias evolutivas de algunas de las especies actuales y fósiles de arces euroasiáticos.

## ANTECEDENTES

El primero en detectar la presencia de ejemplares asignables al género *Acer* en los afloramientos del Vallesiense de la Cerdaña fue REROLLE (1884-1885) a partir de restos foliares y frutos. Este autor describió en la cuenca 8 especies, 3 de ellas por primera vez: *A. trilobatum* (STERNB.) AL. BR., *A. magnini* RER., *A. subrecognitum* RER., *A. pseudocreticum* ETT., *A. pyrenaicum* RER., *A. decipiens* AL. BR., *A. laetum* C.A.M. var. *pliocenicum* SAP. y *Acer* sp.

Autores posteriores (VILLALTA y CRUSAFONT, 1945; MENENDEZ AMOR, 1955; ALVAREZ RAMIS y GOLPE-POSSE, 1981), a partir de otros ejemplares morfológicamente idénticos a los de REROLLE, citaron otras 6 especies en la cuenca ceretana: *A. trilobatum* var. *productum* HR., *A. cf. campestre* L., *A. angustilobum* HR., *A. triangulilobum* GOEPP., *A. brachyphyllum* HR. y *A. cf. rubrum* L.

En total se describieron en la cuenca 14 especies a partir de restos foliares y de sámaras.

Ultimamente, BARRON (1992), realizó un estudio preliminar de los macrorrestos asignables a los arces fósiles ceretanos realizando una comparación con especies actuales euroasiáticas.

En 1985, BESSEDIK señaló la presencia puntual a partir de granos de polen del género que nos ocupa en las minas de Sanavastre y Sampsor.

## MATERIAL Y METODOS

Los macrorrestos estudiados consisten en restos foliares y sámaras que aparecen siempre en forma de impresiones y compresiones sin restos cuticulares conservados, en el sentido propuesto por BARRON (1993). Estos ejemplares integran las colecciones del Museo Geominero (MGM), Museo de Geología de Barcelona (MGB), Museo Nacional de Ciencias Naturales (CSIC) (MNCN), Museo del Seminario de Barcelona (MGSB) y Departamento de Paleontología de la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid (UCM); colecciones particulares, como son las de los señores J. Lladó Fuster (CLF) y E. Aguilar (CA); así como a ejemplares colectados por nosotros en diferentes campañas de campo.

Los restos foliares se han analizado siguiendo las normas propuestas por HICKEY (1973), utilizándose para describir su nerviación la clasificación propuesta por TAKHTAJAN (1991). Por su parte, en la descripción de las sámaras se han tenido en cuenta los esquemas aportados por TANAI (1983) y WOLFE & TANAI (1987).

Tanto a las sámaras como a las hojas, las hemos comparado con ejemplares actuales, para lo cual hemos tomado como referencia los pliegos que se guardan en el Real Jardín Botánico de Madrid (CSIC), así como otros restos fósiles que se encuentran en los museos y colecciones ya mencionados.

Por su parte, la separación de los palinomorfos fue llevada a cabo usando las técnicas de PHIPPS & PLAYFORD (1986), basadas en tratamiento ácido (HCl, HF y HNO<sub>3</sub>); y su concentración final fue estimada tras pasar el residuo resultante a través de tamices de 500, 250, 75, 50

(\*) Dpto. Paleontología-U.E.I. de Paleontología. Instituto de Geología Económica (CSIC): Fac. CC. Geológicas, U.C.M. 28040-Madrid.

y 12µm. La nomenclatura seguida para la descripción de los palinomorfos es la que se utiliza en el texto de SAENZ DE RIVAS (1978).

#### CONTEXTO GEOLOGICO Y GEOGRAFICO

La Cerdaña es una antigua cuenca lacustre situada en los Pirineos orientales entre Francia y España (Fig. 1). Actualmente constituye una llanura alargada de 25-30 km de longitud por 5-7 de ancho, cruzada en su parte norte por el río Segre, que encuentra a unos 1.100 m sobre el nivel del mar.

Esta cuenca fue formada durante los movimientos dextrales NE-SO de la Falla de la Tet (CABREIRA et al., 1988). JULIA (1984) diferencia dos cubetas: la de Bellver, con una importante etapa lacustre profunda, y la de Sanavastre, con una fuerte influencia fluvial.

El relleno sedimentario de la Cerdaña está integrado por potentes sucesiones detríticas y se organiza en dos grandes unidades estratigráfi-

cas: la Unidad Neógena Inferior (Vallesiense medio-superior) formada por la interacción de procesos aluviales y lacustres; y la Unidad Neógena Superior (post-Vallesiense), constituida exclusivamente por depósitos aluviales (ROCA, 1986).

Los restos fósiles que se estudian en este trabajo han sido obtenidos en las dos cubetas anteriormente mencionadas, en los materiales correspondientes a la Unidad Neógena Inferior. Según ANADON et al. (1989), esta Unidad se puede dividir en tres tramos (Fig. 2). En el tramo B se han obtenido los restos vegetales que se estudian en este trabajo, encontrándose constituido por diatomitas y mudstones. Estos materiales afloran en barrancos producidos por erosión de tipo pluvial (barranco de Salanca, Prats, San Salvador, Can Vilella), torrentes (torrente de Vilella, Riu de Santa María, torrente de la Bavosa) y cortes debidos a obras civiles (afloramientos de Coll de Saig, camino de Balltarga a Bor, Beders, vertedero de Sampsor, Oliá, Santa Eugenia) o a explotaciones mineras (minas de lignito de Sanavastre y Sampsor) (Fig. 1).

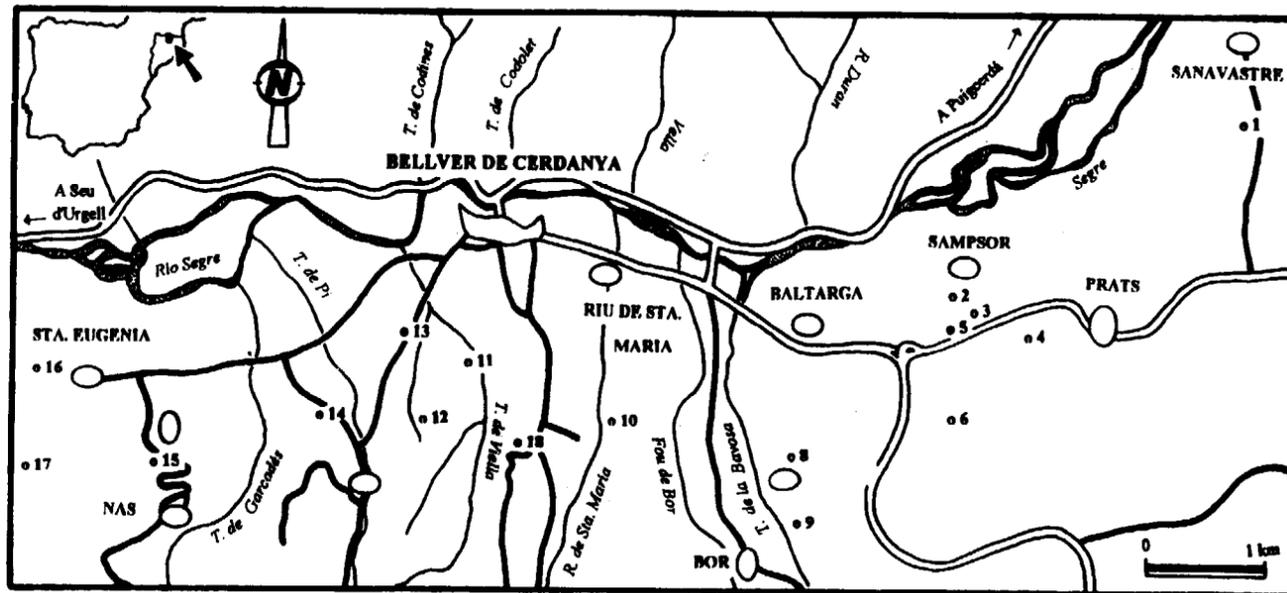


Figura 1. Situación geográfica de los afloramientos en donde se ha encontrado registro fósil del género *Acer*. 1. Mina de Sanavastre, 2. Mina de Sampsor, 3. Vertedero de Sampsor, 4. Prats, 5. Coll de Saig, 6. San Salvador, 7. Camino de Balltarga a Bor, 8. Beders, 9. Torrente de la Bavosa, 10. Riu de Santa María, 11. Torrente de Vilella, 12. Barranco de Salanca, 13. Carretera de Bellver de Cerdanya a Pi, 14. Gravera de Pi, 15. Oliá, 16. Santa Eugenia, 17. Camino al serrat de Nas, 18. Can Vilella.

#### SISTEMATICA

Orden SAPINDALES Bentham & Hooker, 1862  
Familia ACERACEAE A. L. de Jussieu, 1789  
Género *Acer* Linné, 1753

*Acer integerrimum* (VIVIANI) MASSALONGO,  
1859  
(Lám. I, figs.4-7)

- 1833 - *Acerites integerrima*, VIVIANI, pág. 131, lám. II, fig. 6.  
1850 - *Acerites integerrimus*, UNGER, pág. 452.  
1856 - *Acer trachyticum*, KOVATS, pág. 32, lám. VII, figs. 1-2.  
\*1859 - *Acer integerrimum*, MASSALONGO et SCARABELLI, pág. 3341-342, lám. XVIII, fig. 3.  
1859 - *Acer sphendaminum*, MASSALONGO et SCARABELLI, págs. 343-344, lám. XIX, fig. 5.  
1859 - *Acer triaenium*, MASSALONGO et SCARABELLI, págs. 330-334, lám. XV-XVI, fig. 6, lám. XX, fig. 2, lám. XX, fig. 2, lám. XXXVIII, fig. 6.  
1859 - *Populus bianconii*, MASSALONGO et SCARABELLI, págs. 247-248, lám. XXXVII, fig. 7.  
1876 - *Acer laetum*, C. A. MEY. (*pliocenicum*), SAPORTA et MARION, págs. 280-282, lám. XXXIV, figs. 2-3.  
1892 - *Acer laetum*, BOULAY, pág. 87, lám. IX, fig. 1.  
1884 - *Acer laetum pliocenicum*, SAPORTA, pág. 97, lám. IX, fig. 1.  
1884-1885 - *Acer decipiens*, REROLLE, pág. 298, lám. XII, fig. 1.  
1884-1885 - *Acer laetum* C. A. MEY., *pliocenicum*, REROLLE, págs. 374-377, lám. XIV, fig. 2.  
1903 - *Acer decipiens*, MARTY, pág. 56, lám. XI, fig. 1.  
1903 - *Acer laetum pliocenicum*, MARTY, pág. 57, fig. 3.  
1904-1905 - *Acer laetum* C. A. MEY., *pliocenicum*, LAURENT, págs. 192-194, lám. XV, figs. 1-2, lám. XVI, fig. 7.  
1908 - *Acer laetum* C. A. MEY. var. *pliocenicum*, LAURENT, pág. 56.  
1922 - *Acer laetum* C. A. MEY. *pliocenicum*, DEPAPE, pág. 186, lám. XV, fig. 7.

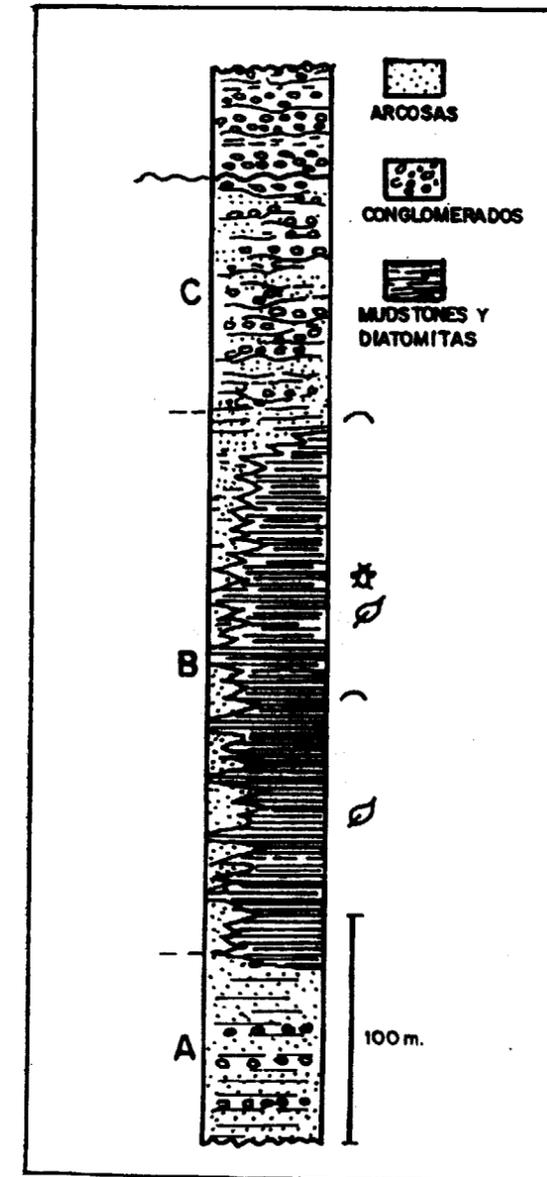
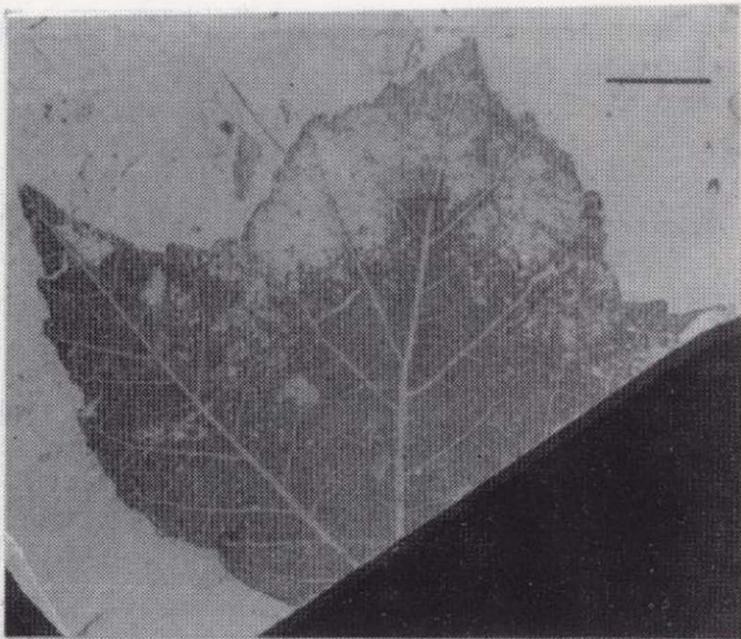


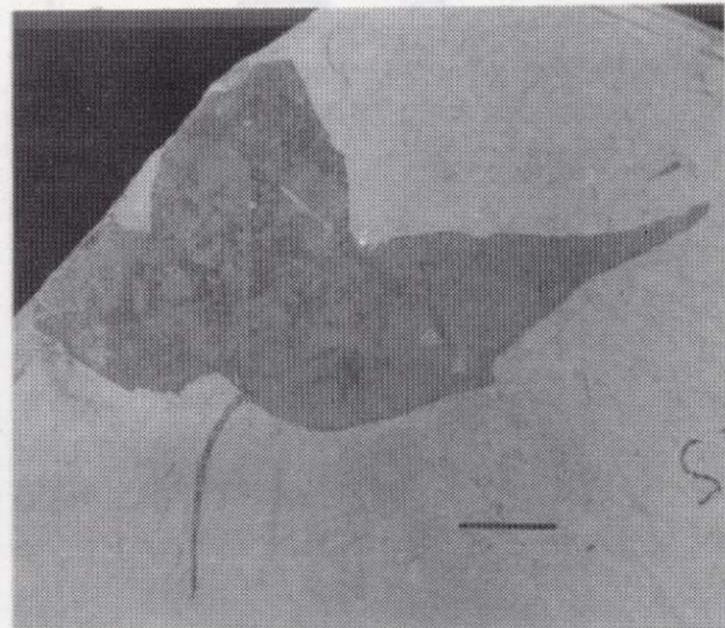
Figura 2. Columna estratigráfica sintética de la Unidad Neógena Inferior, según ANADON et al. (1989).

Por otra parte, en este trabajo se nombran un conjunto de afloramientos históricos en donde se colectaron macrorrestos asignables a *Acer*. Estos son: Can Pilbre, Pedrá y Alp, y seguramente desaparecieron al haberse realizado obras públicas en el lugar en donde se encontraban. Los ejemplares que corresponden a estas localidades se encuentran depositados en los distintos museos citados anteriormente.

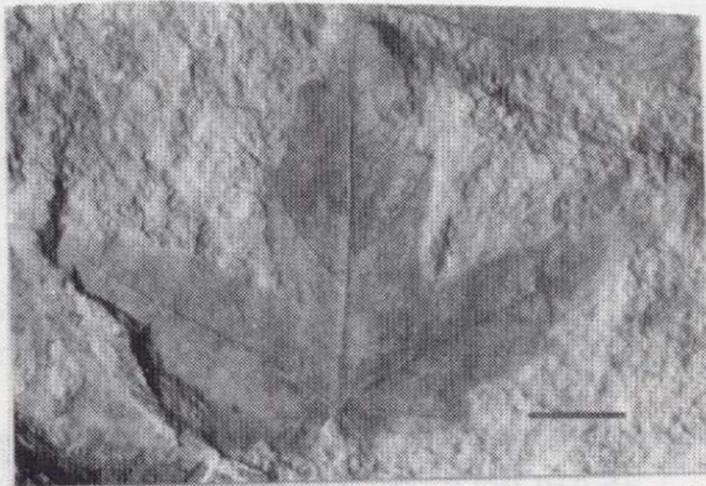
## LAMINA I



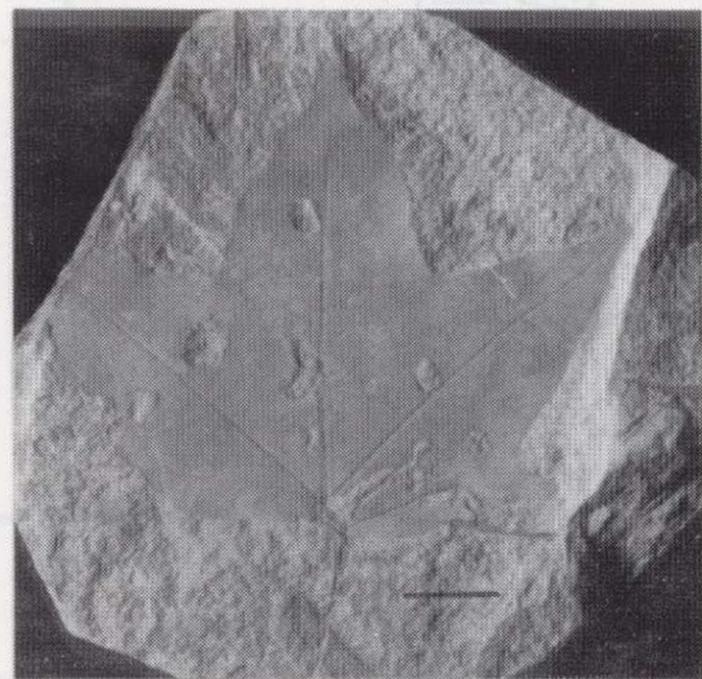
1



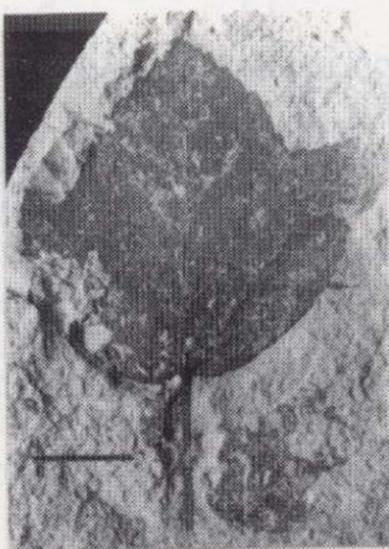
4



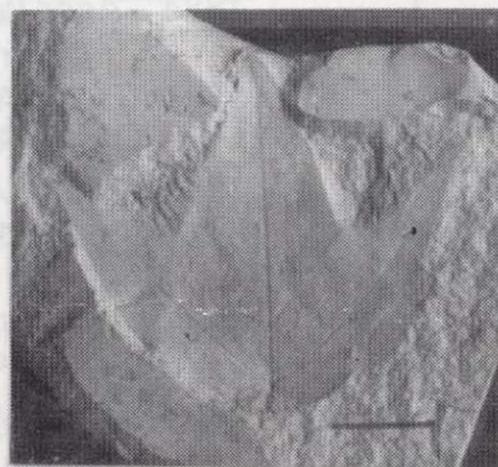
2



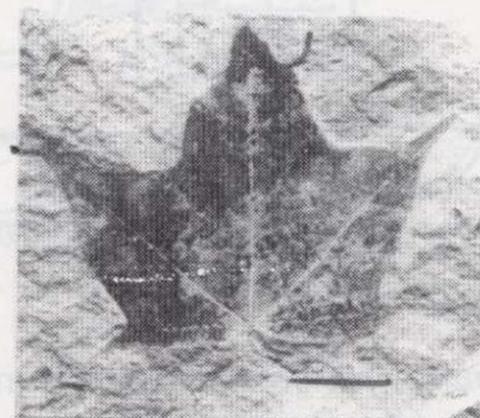
5



3



6



7

Fig. 1. *Acer pyrenaicum* Réolle. MGM-1076M. Coll de Saig.

Fig. 2. *Acer pyrenaicum* Réolle. MNCN-V-367. Sin localidad.

Fig. 3. *Acer pyrenaicum* Réolle. MNCN-V-6684. Torrente de Vilella.

Fig. 4. *Acer integerrimum* (Viviani) Massalongo. MGM-230M. Santa Eugenia.

Fig. 5. *Acer integerrimum* (Viviani) Massalongo. MGM-1075M. Coll de Saig.

Fig. 6. *Acer integerrimum* (Viviani) Massalongo. MNCN-V-4676. Coll de Saig.

Fig. 7. *Acer integerrimum* (Viviani) Massalongo. MNCN-V-6685. Torrente de Vilella.

Escala gráfica: 1 cm

## LAMINA I

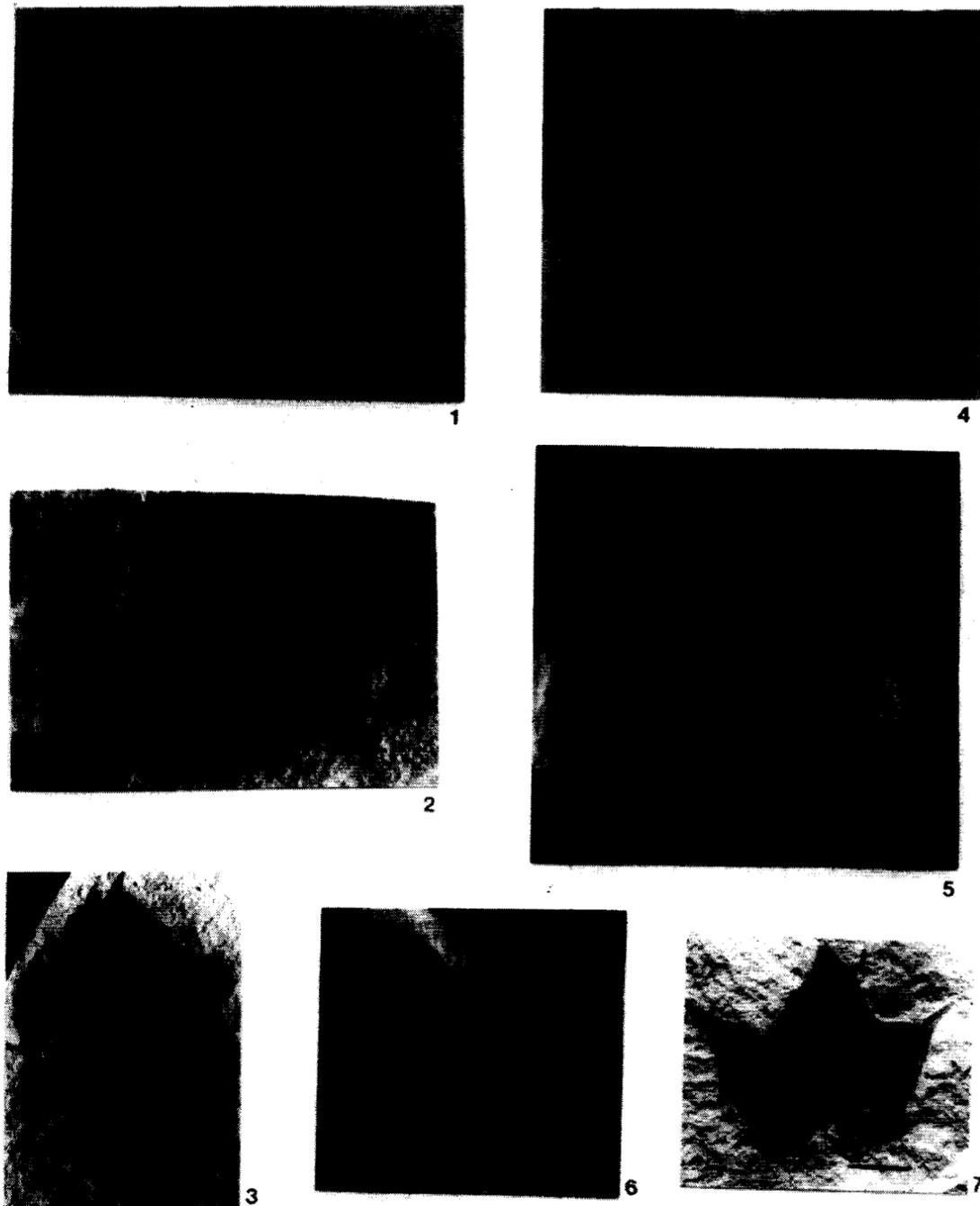


Fig. 1. *Acer pyrenaicum* Rérolle. MGM-1076M. Coll de Saig.  
 Fig. 2. *Acer pyrenaicum* Rérolle. MNCN-V-367. Sin localidad.  
 Fig. 3. *Acer pyrenaicum* Rérolle. MNCN-V-6684. Torrente de Vilella.  
 Fig. 4. *Acer integerrimum* (Viviani) Massalongo. MGM-230M. Santa Eugenia.  
 Fig. 5. *Acer integerrimum* (Viviani) Massalongo. MGM-1075M. Coll de Saig.  
 Fig. 6. *Acer integerrimum* (Viviani) Massalongo. MNCN-V-4676. Coll de Saig.  
 Fig. 7. *Acer integerrimum* (Viviani) Massalongo. MNCN-V-6685. Torrente de Vilella.

Escala gráfica: 1 cm

- 1936 - *Acer laetum*, MARTY et GLANGEAUD, pág. 28, lám. C, fig. 7, lám. D, fig. 8.  
 1945 - *Acer decipiens*, VILLALTA y CRUSAFONT, pág. 345, lám. V, lám. IX, lám. X.  
 1947 - *Acer decipiens*, SOLE y LLOPIS, pág. 94, lám. XI.  
 1953 - *Acer trachyticum*, GRANGEON, págs. 313-314, text.-lám. II, figs. 1-2.  
 1955 - *Acer decipiens*, MENENDEZ AMOR, pág. 150, lám. XL, fig. 3.  
 1955 - *Acer laetum* C. A. MEY. var. *pliocenicum*, MENENDEZ AMOR, págs. 151-152, lám. XL, fig. 4.  
 1955 - *Lygodium gaudini*, MENENDEZ AMOR, pág. 38, lám. XV, fig. 3.  
 1958 - *Acer decipiens* aff. *Acer longipes*, GRANGEON, págs. 188, 190-191, lám.-text. XXXIV, figs. 1-3, 5,7, lám. XVI, fig. 7.  
 1959 - *Acer* cfr. *cappadocicum*, ANDREANSZKY, pág. 159, lám. XLVII, fig. 2.  
 1972 - *Acer laetum*, VILLALTA y VICENTE, pág. 126.  
 1972 - *Acer platanooides*, VILLALTA y VICENTE, pág. 126.  
 1980a - *Acer laetum* C. A. MEY. var. *pliocenicum*, SANZ DE SIRIA, pág. 48, fig. 7.  
 1982 - *Acer laetum*, SANZ DE SIRIA, pág. 11, lám. I, fig. 19.

**Material:** Se han estudiado 35 ejemplares preservados en forma de impresión o compresión de hojas sin trazas cuticulares, por lo general en buen estado de conservación, procedentes de los afloramientos de Coll de Saig, Santa Eugenia, Can Pilbre, Pedrá, Beders y torrente de Vilella: CLF-017, MGB-G-A-87, MGB-V-9452, MGB-V-9519, MGB-V-9684, MGB-V-9729, MGB-V-9734, MGB-V-10479, MGB-V-10518, MGB-V-11718, MGB-V-11726, MGM-230M, MGM-1075M, MGM-1079M, MGSB-31205, MGSB-40407, MGSB-47026, MNCN-V-329, MNCN-V-332, MNCN-V-365, MNCN-V-372, MNCN-V-3289, MNCN-V-3529, MNCN-V-3550, MNCN-V-3557, MNCN-V-3583, MNCN-V-4658, MNCN-V-4661, MNCN-V-4676, MNCN-V-4678, MNCN-V-4682, MNCN-V-4684, MNCN-V-4686, MNCN-V-4871, UCM-CBEDERS-16.

**Descripción:** Restos foliares peciolados; longitud del peciolo: 2,7-2,2 cm; forma palmada con 3 (lám. I, fig. 6) ó 5 lóbulos; cuando existen 5,

los dos basales se encuentran poco desarrollados (Lám. I, figs. 5, 7), en algunas ocasiones aparecen restos foliares con lóbulos basales incipientes (Lám. I, fig. 4); longitud del limbo: 3,8-2,6 cm; anchura máxima del limbo: 5,1-3,1 cm; distancia de la zona de máxima anchura a la base: 1,8-0,9 cm; ápices agudos; base cordada; margen liso; nerviación rectipalmada; alrededor de 5 pares de nervios secundarios curvipinnados curvándose uniformemente con ángulo de divergencia  $\approx 45^\circ$ ; presencia de nervios intersecundarios; nerviación terciaria percurrente, con curso derecho o ahorquillado formando ángulos rectos con los nervios secundarios; no se observa nerviación de rango inferior.

**Discusión:** Los ejemplares que fueron descritos en el pasado como *A. trachyticum* KOV., *A. trienium* MASS., *A. laetum* C.A.M. y *A. laetum pliocenicum* SAP. et MAR. presentan todas las características morfológicas enunciadas, por lo que, de momento, a falta de datos anatómicos deben considerarse sinónimas de *A. integerrimum*.

Por otra parte, se han atribuido de forma errónea restos de la especie que estamos estudiando a las especies *Populus bianconii* MASS. y *Lygodium gaudini* HR. (MASSALONGO et SCARABELLI, 1859; MENENDEZ AMOR, 1955). Además, se han asignado un buen número de restos de la especie que nos ocupa a *A. decipiens* AL. BR. Según WALTHER (1972), esta última especie al presentar siempre hojas trilobuladas y sus ápices no acuminados se debe comparar con la especie actual *A. monspessulanum* L. y no con *A. integerrimum*. Los restos ceretanos atribuidos a *A. decipiens* son hojas de pequeño tamaño, trilobuladas y con ápices muy acuminados (Lám. I, fig. 6) que debieron desarrollarse en las ramas terminales de la planta, como le ocurre a la especie actual *A. cappadocicum* GLED.

Las especies fósiles con las que se podría relacionar a *A. integerrimum* son *A. integrilobum* WEB. sensu WALTHER, del Mioceno de Europa Central; *A. rotundatum* HUZIOKA, del Mioceno del Este de Asia; y *A. scottiae* MACGINITIE, del Mioceno Superior del Oeste de Norteamérica;

todos ellos pertenecientes, como la especie que nos ocupa, de la sección *Platanoideae* PAX del género *Acer* (WALTHER, 1972; TANAI, 1983; WOLFE & TANAI, 1987). A diferencia de *A. integerrimum*, la especie europea y la norteamericana presentan limbos más anchos y, en el caso de la norteamericana, ápices poco acuminados. Desgraciadamente, hasta el momento no ha sido posible realizar estudios cuticulares de ninguna de estas especies de arce, por lo que no podemos corroborar el parentesco apuntado por los autores anteriormente citados. Por su parte, *A. rotundatum* presenta una morfología idéntica a la de *A. integerrimum*, por lo que es posible que ambas se encuentren filogenéticamente relacionadas, lo que podría indicarnos un parental común. También es posible que *A. integerrimum* y *A. rotundatum* debieran considerarse una misma especie. Sin embargo, para poder afirmar esto habría que realizar un estudio más profundo sobre el tema comparando material asiático y europeo y desarrollando estudios cuticulares, que hasta el momento no se han llevado a efecto en ninguna de las dos especies fósiles.

*A. integerrimum* se encuentra morfológicamente relacionada con las especies actuales *A. cappadocicum* y *A. mono* MAXIM. (= *A. pictum* THUMB.). La primera habita en el Este de la región mediterránea, Cáucaso, Armenia, Himalaya y el Este de China Central; la segunda en Japón, China, Manchuria y Corea (VERNET, 1981). Volvemos a apuntar la idea de un parental euroasiático común que dio lugar a *A. integerrimum* en Europa, y a *A. rotundatum* en el Este de Asia que posteriormente originaron respectivamente a las especies actuales *A. cappadocicum* y *A. mono*.

**Distribución:** Esta especie presenta una amplia distribución estratigráfica que va desde el Mioceno Inferior (VERNET, 1981) hasta el Pliopleistoceno (VERNET, 1981; ROIRON, 1983). Hasta el momento únicamente ha sido detectada en Europa, encontrándose bien representado en el Mioceno Medio y Superior de Europa Central Europa Central (STUR, 1867; KNOBLOCH, 1969; WALTHER, 1972; GIVULESCU, 1990), y en el Mioceno Superior y Plioceno de Europa Occidental (MASSALONGO et SCARA-

BELLI, 1859; SAPORTA et MARION, 1876; DEPAPE, 1922; GRANGEON, 1958). Hasta el momento, en la Península Ibérica, *A. integerrimum* solamente se encontraba representado en la flora del Plaisanciense de Ciurana (SANZ DE SIRIA, 1982) y en la del Pliopleistoceno de Crespiá (VILLALTA & VICENTE, 1972; ROIRON, 1983).

*Acer pyrenaicum* REROLLE, 1884-1885  
(Lám. I, figs. 1-3; Lám. II, 1-6)

- 1884-1885 - *Acer magnini*, REROLLE, págs. 370-371, lám. XIII, figs. 1-3.  
 \*1884-1885 - *Acer pyrenaicum*, REROLLE, pág. 368-370, lám. XII, figs. 2-6.  
 1884-1885 - *Acer pseudocreticum*, REROLLE, págs. 373-374, lám. XIV, fig. 1.  
 1884-1885 - *Acer subrecognitum*, REROLLE, págs. 371-372, lám. XIII, figs. 1-3.  
 1884-1885 - *Acer trilobatum*, REROLLE, pág. 297, lám. XI, fig. 5.  
 1884-1885 - *Acer* sp., REROLLE, págs. 372-373, lám. XIII, fig. 5.  
 1884-1885 - *Acer* sp., REROLLE, págs. 375-377, lám. XIV, figs. 4-8.  
 1884-1885 - *Populus tremula* L. *pliocenica*, REROLLE, lám. XI, fig. 7.  
 1890- *Acer nicolai*, BOULAY, págs. 44-45, lám. VI, figs. 13-14.  
 1922 - *Acer nicolai*, DEPAPE, pág. 189, lám. XII, figs. 6-8.  
 1945 - *Acer magnini*, VILLALTA y CRUSAFONT, pág. 345, lám. IV, lám. X.  
 1945 - *Acer pseudocraeticum*, VILLALTA y CRUSAFONT, pág. 345, lám. III.  
 1945 - *Acer subrecognitum*, VILLALTA y CRUSAFONT, pág. 345.  
 1945 - *Acer trilobatum*, VILLALTA y CRUSAFONT, pág. 345, lám. V, lám. IX.  
 1945 - *Acer trilobatum* var. *productum*, VILLALTA y CRUSAFONT, pág. 345, 350.  
 1947 - *Acer pseudocreticum*, SOLE y LLOPIS, pág. 94, lám. XI.  
 1948 - *Acer triangulilobum*, MENENDEZ AMOR, págs. 784-785, fig. 1c.  
 1952 - *Acer trilobatum*, TEIXEIRA, pág. 59, est. VI, fig. 6, est. VII, figs. 1-3.  
 1955 - *Acer laetum* C. A. MEY. var. *pliocenicum*, MENENDEZ AMOR, págs. 151-152, lám. XL, fig. 3.

## LAMINA II

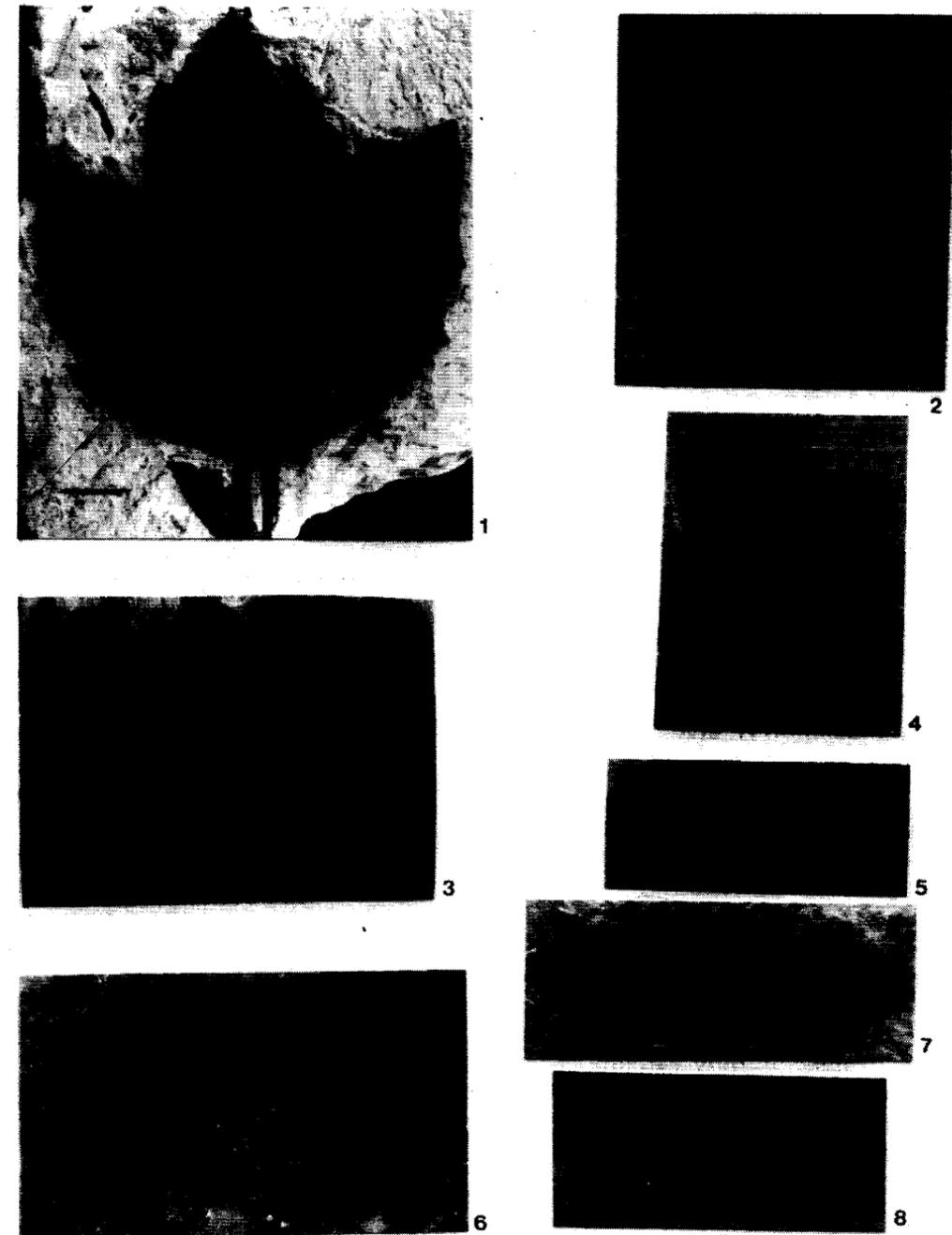
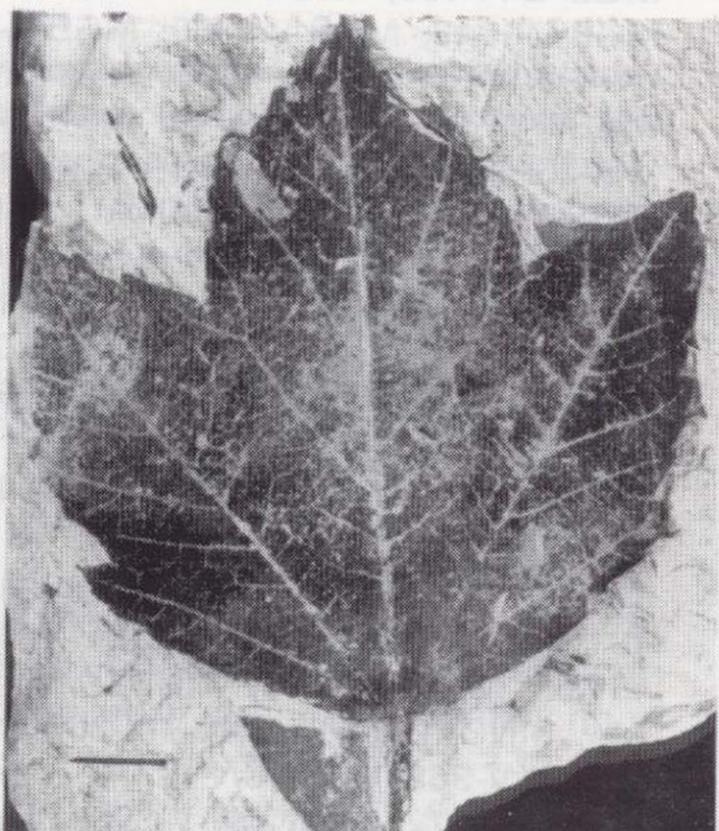
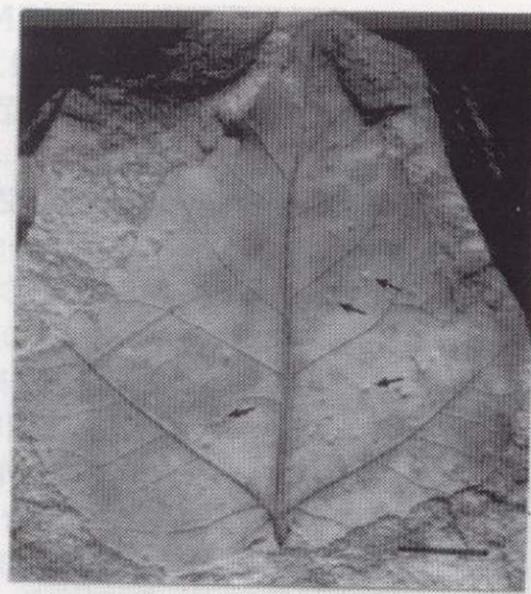


Fig. 1. *Acer pyrenaicum* Rérolle. MGB-V-9504. Coll de Saig.  
 Fig. 2. *Acer pyrenaicum* Rérolle. MGM-1077M. Coll de Saig. Las flechas indican agallas producidas por ácaros.  
 Fig. 3. *Acer pyrenaicum* Rérolle. MGM-1097M. Coll de Saig. Las flechas indican agallas producidas por ácaros.  
 Fig. 4. *Acer pyrenaicum* Rérolle. MGM-1081M. Coll de Saig.  
 Fig. 5. *Acer pyrenaicum* Rérolle. Sámara. MGM-1099M. Coll de Saig.  
 Fig. 6. *Acer pyrenaicum* Rérolle. MNCN-V-363. Beders. Detalle de la venación del ala de una sámara.  
 Fig. 7. *Acer pyrenaicum* Rérolle. Sámara. MNCN-V-708. Coll de Saig.  
 Fig. 8. *Acer pyrenaicum* Rérolle. Sámara. MGM-1080M. Coll de Saig.  
 Escalas gráficas: figs. 1, 2, 3, 4, 5, 7 y 8: 1 cm; fig. 6: 1 mm

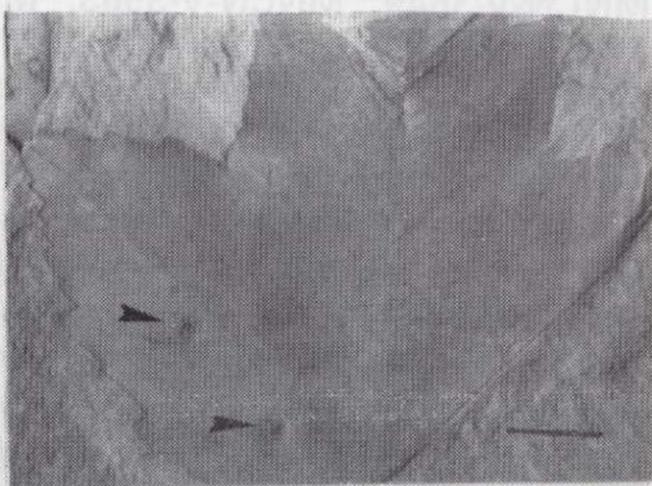
LAMINA II



1



2



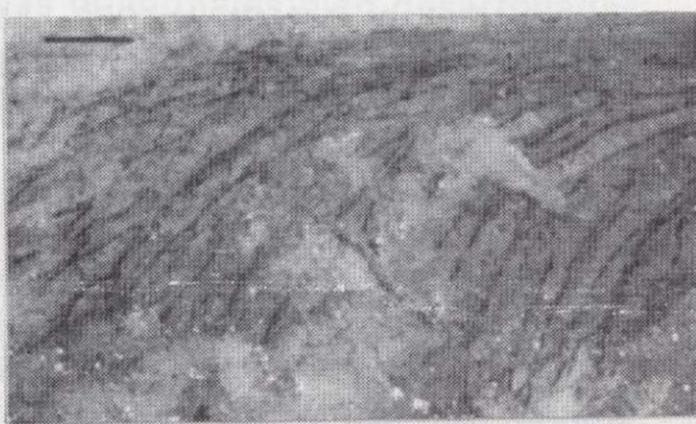
3



4



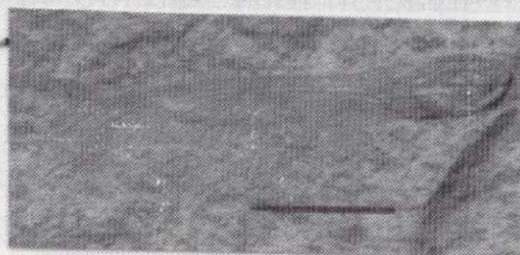
5



6



7



8

Fig. 1. *Acer pyrenaicum* Rérolle. MGB-V-9504. Coll de Saig.  
 Fig. 2. *Acer pyrenaicum* Rérolle. MGM-1077M. Coll de Saig. Las flechas indican agallas producidas por ácaros.  
 Fig. 3. *Acer pyrenaicum* Rérolle. MGM-1097M. Coll de Saig. Las flechas indican agallas producidas por ácaros.  
 Fig. 4. *Acer pyrenaicum* Rérolle. MGM-1081M. Coll de Saig.  
 Fig. 5. *Acer pyrenaicum* Rérolle. Sámara. MGM-1099M. Coll de Saig.  
 Fig. 6. *Acer pyrenaicum* Rérolle. MNCN-V-363. Beders. Detalle de la venación del ala de una sámara.  
 Fig. 7. *Acer pyrenaicum* Rérolle. Sámara. MNCN-V-708. Coll de Saig.  
 Fig. 8. *Acer pyrenaicum* Rérolle. Sámara. MGM-1080M. Coll de Saig.  
 Escalas gráficas: figs. 1, 2, 3, 4, 5, 7 y 8: 1 cm; fig. 6: 1 mm

- 1955 - *Acer magnini*, MENENDEZ AMOR, págs. 152-153, lám. XLI, figs. 2-3.  
 1955 - *Acer pseudocreaticum*, MENENDEZ AMOR, pág. 153, lám. XLI, fig. 1.  
 1955 - *Acer subrecognitum*, MENENDEZ AMOR, pág. 156.  
 1955 - *Acer triangulilobum*, MENENDEZ AMOR, págs. 156-157.  
 1955 - *Acer trilobatum*, MENENDEZ AMOR, págs. 157-159, lám. XL, fig. 1.  
 1955 - *Sassafras ferretianum*, MENENDEZ AMOR, pág. 118-119, lám. XXXIV, fig. 4.  
 1970 - *Acer cf. magnini*, FERNANDEZ MARRON, pág. 142, lám. II, fig. 3.  
 1977 - *Acer pseudocreaticum*, SANZ DE SIRIA, pág. 27.  
 1977 - *Acer trilobatum*, SANZ DE SIRIA, pág. 27.  
 1979 - *Acer nicolai*, BALLELIO et al., pág. 246, lám. 1, figs. 6-7.  
 1980a - *Acer magnini*, SANZ DE SIRIA, pág. 47.  
 1980a - *Acer trilobatum*, SANZ DE SIRIA, pág. 48.  
 1980b - *Acer pseudocreaticum*, SANZ DE SIRIA, pág. 23, lám. III, fig. 13c.  
 1980b - *Acer trilobatum*, SANZ DE SIRIA, págs. 23-24, lám. III, fig. 12c.  
 1981 - *Acer cf. obtusum* W. et K. (*Acer cf. opalus* MILL.), VERNET, pág. 46.  
 1981 - *Acer opalus* MILL. (*Acer opulifolium* VILL.), VERNET, pág. 46, lám. I, 13.  
 1983 - *Acer opalus*, ROIRON, pág. 698, fig. 7, nº 4-8.

**Material:** Se han estudiado 179 ejemplares referidos a hojas y sámaras que no se encuentran en conexión orgánica. Se trata de impresiones y compresiones sin la cutícula preservada, siendo su grado de conservación muy variado ya que se han hallado algunos especímenes en un estado excelente y otros muy deteriorados. Los afloramientos donde se han obtenido fósiles referibles a la especie que nos ocupa son: Beders, Coll de Saig, camino de Balltarga a Bor, carretera de Bellver de Cerdanya a Pi, barranco de Salanca, Alp, Pedrá y torrente de Vilella. Los ejemplares analizados se exponen en la siguiente relación:

- Hojas: CA-8960-1, CA-8960-2, CLF-016, CLF-018, MGB-3980, MGB-G-A-1, MGB-G-A-2, MGB-G-A-4, MGB-G-A-9, MGB-G-A-95, MGB-G-A-126,

MGB-G-A-129, MGB-G-A-133, MGB-G-A-134, MGB-G-A-135, MGB-G-A-136, MGB-G-A-137, MGB-V-1715, MGB-V-9480, MGB-V-9498, MGB-V-9499, MGB-V-9503, MGB-V-9504, MGB-V-9692, MGB-V-9695, MGB-V-9700, MGB-V-9728, MGB-V-9735, MGB-V-9738, MGB-V-9746, MGB-V-9896, MGB-V-10482, MGB-V-10494, MGB-V-10572, MGB-V-10574, MGB-V-11711, MGB-V-11712, MGB-V-11715, MGB-V-11717, MGB-V-11734, MGB-V-s/nº, MGM-1076M, MGM-1078M, MGM-1080M, MGM-1081M, MGM-1097M, MGM-1099M, MGSB-21771<sub>1-2</sub>, MGSB-31198, MGSB-31225, MGSB-31315, MGSB-40414, MGSB-40444<sub>1-4</sub>, MGSB-40451, MGSB-48126, MGSB-47027, MGSB-48127, MGSB-48128, MGSB-48129, MGSB-48130, MGSB-48131, MGSB-48132, MGSB-48133, MGSB-48471, MNCN-V-144, MNCN-V-329, MNCN-V-366, MNCN-V-368, MNCN-V-369, MNCN-V-370, MNCN-V-371, MNCN-V-372, MNCN-V-373, MNCN-V-796, MNCN-V-799, MNCN-V-822, MNCN-V-3087, MNCN-V-3649, MNCN-V-3503, MNCN-V-3504, MNCN-V-3525, MNCN-V-3527, MNCN-V-3533, MNCN-V-3542, MNCN-V-3553, MNCN-V-3566, MNCN-V-3588, MNCN-V-3591, MNCN-V-3608, MNCN-V-3614, MNCN-V-3615, MNCN-V-4258, MNCN-V-4353, MNCN-V-4357, MNCN-V-4656, MNCN-V-4657, MNCN-V-4659, MNCN-V-4663, MNCN-V-4665, MNCN-V-4666, MNCN-V-4667, MNCN-V-4668, MNCN-V-4669<sub>1-2</sub>, MNCN-V-4670, MNCN-V-4671, MNCN-V-4672, MNCN-V-4675, MNCN-V-4677, MNCN-V-4679, MNCN-V-4680, MNCN-V-4681, MNCN-V-4683, MNCN-V-4685, MNCN-V-4687, MNCN-V-4688, MNCN-V-4854, MNCN-V-4868, MNCN-V-4869, MNCN-V-4870, UCM-CBI-6, UCM-CBII-005, UCM-CBII-006, UCM-CBII-14, UCM-CCS-27, UCM-CCS-67, UCM-CS-001, UCM-CTV-32, UCM-CTV-35, UCM-CTV-37, UCM-CTV-45, UCM-CTV-46.

- Sámaras: CA-8961-1, CA-8961-2, MGB-G-A-79, MGB-G-A-110, MGB-V-9511, MGB-V-9516, MGB-V-9690, MGB-V-9717, MGB-V-9797, MGB-V-10480, MGSB-31210, MGSB-36199, MGSB-40452<sub>1-4</sub>, MGSB-47035, MGSB-48145, MNCN-V-319, MNCN-V-362, MNCN-V-363, MNCN-V-364, MNCN-V-755, MNCN-V-3085, MNCN-V-3292, MNCN-V-3501, MNCN-V-3513, MNCN-V-3515, MNCN-V-3526, MNCN-V-3539, MNCN-V-3543, MNCN-V-3545, MNCN-V-3546, MNCN-V-3547, MNCN-V-3549, MNCN-V-3588, MNCN-V-3593,

MNCN-V-3633, MNCN-V-4607, MNCN-V-4660, MNCN-V-4662, UCM-CCS-57, UCM-CCS-62.

**Descripción:** Restos foliares largamente peciolados; longitud del peciolo: 6,4-0,6 cm; forma rectipalmada con tres lóbulos por lo general (Lám. I, figs. 1, 3; Lám. 2, figs. 2-4), aunque no son raros los ejemplares que tienen cinco (Lám. I, fig. 2; Lám. II, fig. 1), siendo los más basales pequeños (a veces los lóbulos son desiguales presentándose el del medio mucho más desarrollado que los laterales); longitud del limbo: 7,9-2,9 cm; anchura máxima del limbo: 9,3-2 cm; distancia de la zona de máxima anchura a la base: 4,5-1 cm; ápices agudos; base de redondeada (Lám. II, fig. 1) a cordada (Lám. I, fig. 3); margen aserrado irregularmente; a veces, en el lóbulo medio aparecen dos únicos dientes muy desarrollados y patentes (MGB-G-A-134), en otras ocasiones solamente hay un diente, quedando la hoja con forma asimétrica (MNCN-V-373); nerviación palmada; alrededor de 5-6 pares de nervios secundarios rectipinnados simples con curso derecho o uniformemente curvado y ángulo de divergencia por lo general  $\geq 45^\circ$  (a veces existe variación en el ángulo de divergencia, siendo  $>45^\circ$  en base y ápice, y  $\approx 45^\circ$  en el resto del limbo, o apareciendo únicamente con el ángulo de divergencia  $<45^\circ$  en el ápice); presencia de nervios intersecundarios; nerviación terciaria percurrente (Lám. I, fig. 1), con curso derecho o ahorquillado formando ángulos rectos con los nervios secundarios; nerviación de rango inferior reticulada ortogonalmente constituyendo areolas poligonales bien desarrolladas sin venillas, cuando existen éstas no se encuentran ramificadas, este tipo de areolas incluyen a *A. pyrenaicum* en el segundo grupo morfológico propuesto por TANAI (1978).

Sámaras de 4,2-3,2 cm de longitud; nueces elípticas (Lám. II, figs. 5, 7-8), sin quilla, de 1,2-0,9x0,7-0,5 cm, recorridas longitudinalmente por venas; ángulo que forma la nuez con el basamento del ala  $\approx 30-40^\circ$ ; sulco poco pronunciado; venación de la nuez continuada de forma paralela por la parte proximal del ala formando un basamento, el cual está recorrido en su totalidad por venas que surgen de él curvándose (Lám. II, fig. 6), dividiéndose dicotómicamente, anastomosándose entre ellas, recorriendo en su

totalidad la parte cóncava de la estructura membranosa. El ala puede rodear en parte o no a la semilla.

**Discusión:** Esta especie presenta una heterofilia muy marcada, por esta razón REROLLE (1884-1885) describió seis especies diferentes de *Acer* y una de *Populus* a partir de restos foliares del tipo de los descritos en el apartado anterior. La división de estas especies las realizó a partir de aspectos exclusivamente morfológicos, fundamentalmente tamaño y número de lobulaciones. La descripción de *A. pyrenaicum* es la más perfecta y recoge todas las diferentes características morfológicas que produce el polimorfismo foliar. Es decir, *A. pyrenaicum* es la especie de *Acer* descrita por REROLLE (1884-1885), que tiene en cuenta todos los caracteres expuestos en el apartado anterior para los ejemplares ceretanos. Por esta razón, consideramos válida *A. pyrenaicum*, siendo, pues, sinónimas de ésta *A. magnini*, *A. pseudocreaticum* y *A. subrecognitum* descritas también por REROLLE (1884-1885), a partir de restos foliares polimórficos de la especie que nos ocupa. Por las mismas razones, creemos que *A. nicolai*, descrito por BOULAY (1890) en el Plioceno de Théziers, tampoco presenta valor taxonómico, siendo especie sinónima de *A. pyrenaicum*. No consideramos válidas las citas de *A. cf. rubrum* L. y *Acer* sp., realizadas sobre material ceretano atribuible a la especie que estamos estudiando.

La presencia de restos foliares idénticos a *A. tricuspidatum* AL. BR. & AGASSIZ (= *A. trilobatum* STBR.), sugirieron a varios autores (REROLLE, 1884-1885; MENENDEZ AMOR, 1955; SANZ DE SIRIA, 1980a; ALVAREZ RAMIS y GOLPE-POSSE, 1981) su presencia en el Mioceno de la Depresión Ceretana. Sin embargo, aunque hasta el momento no se han hallado restos foliares con la cutícula preservada, los de la Cerdaña se diferencian por las siguientes características:

- 1- ápices por lo general no acuminados.
- 2- presencia de cinco lóbulos.
- 3- limbos más anchos con lobulaciones más largas.

Esto no es generalizable para todos los ejemplares hallados, ya que aparecen restos foliares

morfológicamente indiferenciables de *A. tricuspdatum*. Nosotros pensamos que estas formas se deben al fenómeno de heterofilia anteriormente expuesto y apuntado por ECKENWALDER (1980) para el género. Esta es la razón de la aparición de un ejemplar con lóbulos estrechos (Lám. I, fig. 2) que MENENDEZ AMOR (1948) determinó como *A. triangulilobum*. Pensamos que no se trata más que de una morfología foliar más de *A. pyrenaicum*, ya que las restantes características típicas de la especie no varían en este ejemplar.

Los restos foliares descritos son idénticos a las hojas presentadas en la actualidad por la especie circunmediterránea *A. opalus* MILL. (BARRON, 1992), incluida en la sección *Goniocarpa* POJARK del género *Acer* (TANAI, 1978), por lo que pensamos pudiera encontrarse relacionado filogenéticamente con ella. Los ejemplares asignados a la especie fósil incorrectamente descrita como *Acer opulifolium* VILL. *pliocenicum* SAP., en la flora de Meximieux (SAPORTA et MARION, 1876), no nos parecen que deban ser relacionados con *A. opalus*, ya que éstos presentan morfologías idénticas a la especie actual *A. campestre*.

La especie que nos ocupa aparece en muchos casos parasitada por ácaros (Lám. II, figs. 2-3), como demuestran las agallas, seguramente producidas por los géneros *Artacris* y/o *Eriophyes* (DIEGUEZ et al., in press.).

Las sámaras colectadas no se diferencian de las que actualmente presenta *A. opalus* (BARRON, 1992). Por esta razón, y dado el parecido de los restos foliares, hemos asignado este tipo de sámaras a la especie *A. pyrenaicum*, estando así de acuerdo con lo expresado por LAURENT (1904-1905), quien relaciona este tipo de frutos con *A. opulifolium* especie sinónima de *A. opalus*.

MENENDEZ AMOR (1955), atribuye estas sámaras a *A. integerrimum*; a nuestro juicio esto es inexacto, ya que las especies de *Acer* de este tipo presentan frutos con características como las que se describirán más adelante.

**Distribución:** Los niveles más antiguos en donde se detecta la existencia de *A. pyrenaicum*

corresponden al Vallesiense de la Cerdaña. Esta especie tiene una distribución estratigráfica que ocupa el final del Neógeno: Mioceno Superior y Plioceno (MASSALONGO et SCARABELLI, 1859; BALLELIO et al., 1979), hasta comienzos del Cuaternario (ROIRON, 1983). Parece que es una especie típica de Europa Occidental, aunque PAMALAREV (1989) expuso que ejemplares de la especie *A. campylopterix* UNG., según él relacionables con *A. opalus*, y por lo tanto con la especie que estamos estudiando, se encuentran en el Mioceno y Plioceno de Checoslovaquia, Austria, Polonia y Yugoslavia.

*Acer subcampestre* GOEPPERT, 1855  
(Lám. III, figs. 1-2)

- \*1855 - *Acer subcampestre*, GOEPPERT, pág. 34, lám. 22, figs. 16-17.
- 1945 - *Acer* cf. *campestre*, VILLALTA & CRUSAFONT, pág. 345, 350, láms. VIII, IX.
- 1955 - *Acer campestre*, MENENDEZ AMOR, pág. 140, lám. XLI, fig. 4.
- 1958 - *Acer pseudocampestre*, GRANGEON, págs. 191, 194-195, lám.-text. XXXVI, figs. 6-7, 9, lám. I, fig. 14.
- 1959 - *Acer* cfr. *campestre*, ANDREANSKY, pág. 159, fig. 186.
- 1969 - *Acer obtusilobum*, KNOBLOCH, págs. 137-138, fig. 294, lám. LXVII, fig. 6, lám. LXIX, fig. 8.
- 1983 - *Acer campestre*, ROIRON, pág. 698, fig. 7, nº 1-3.

**Material:** Se han estudiado 10 ejemplares preservados como impresiones foliares en buen estado de conservación, procedentes de los afloramientos de Bellver de Cerdanya, Coll de Saig y Santa Eugenia: MGB-G-A-92, MGB-V-9476, MGB-V-10050, MGB-V-10483, MGB-V-10487, MGB-V-11714, MGB-V-11727, MNCN-V-367, MNCN-V-11734, MNCN-V-4673.

**Descripción:** Restos foliares peciolados; longitud del peciolo: 3-0,6 cm; limbo palmado, con 3 ó 5 lóbulos, cuando tienen 5, los dos basales se encuentran poco desarrollados (Lám. III, fig. 2); longitud del limbo: 5,04-2,6 cm; anchura máxima del limbo: 6,58-3,1 cm; distancia de la zona de máxima anchura a la base: 2,02-0,9 cm; ápi-

## LAMINA III

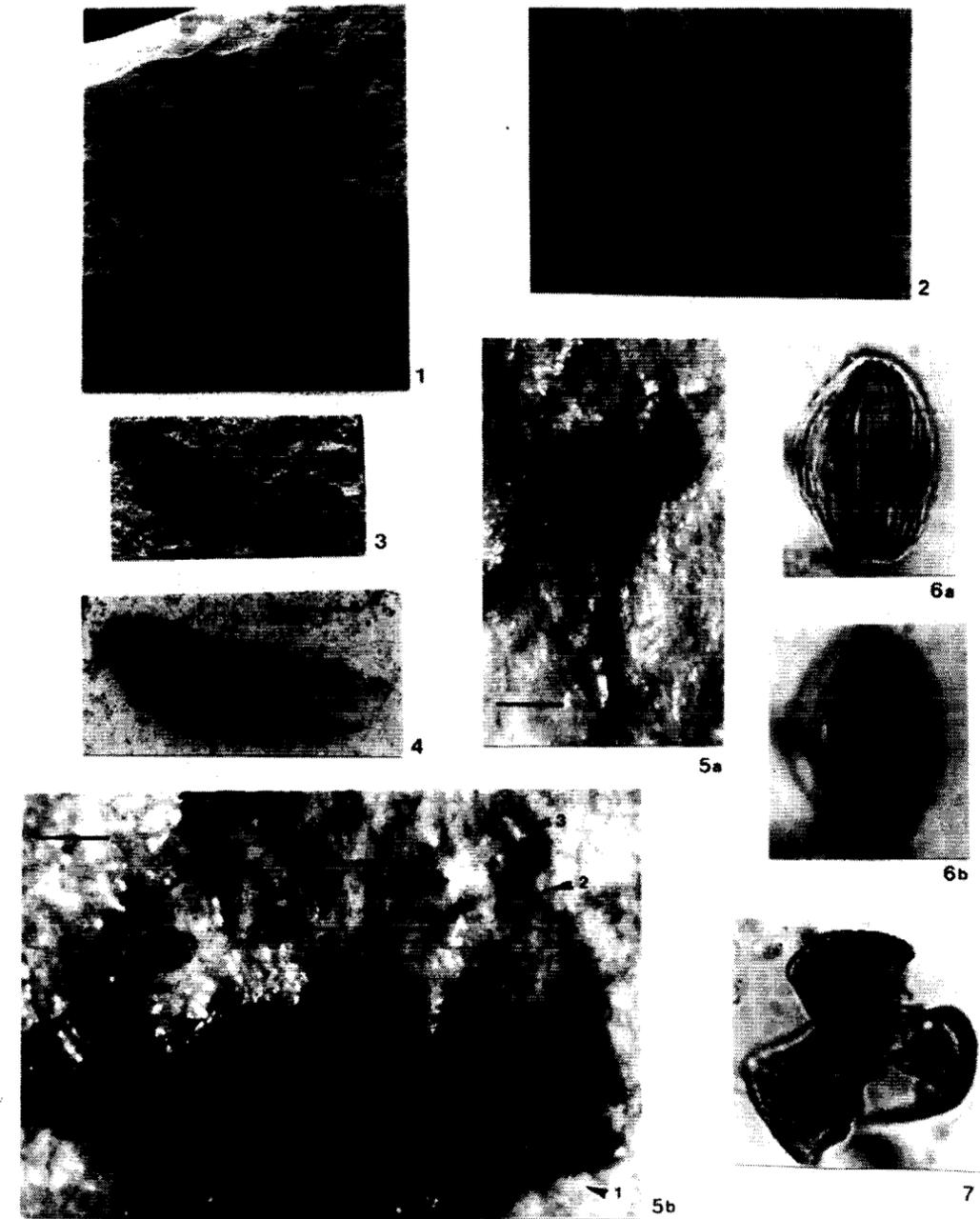


Fig. 1. *Acer subcampestre* Goeppert. MNCN-V-4673. Coll de Saig.  
 Fig. 2. *Acer subcampestre* Goeppert. MGB-G-A-92. Coll de Saig.  
 Fig. 3. *Acer* sp. 1 Sámaras. MNCN-V-4674. Torrente de Vilella.  
 Fig. 4. *Acer* sp. 1 Sámaras. MNCN-V-3290. Torrente de Vilella.  
 Fig. 5a. *Acer* sp. 2 Flor. MNCN-V-303. Sin localidad.  
 Fig. 5b. Detalle del ejemplar MNCN-V-303. 1- Cáliz, 2- filamento, 3- antera.  
 Fig. 6a. *Acer* sp. 3 Grano de polen en vista ecuatorial. Torrente de Vilella. x 1.250 aumentos.  
 Fig. 6b. Diferente enfoque del grano de polen en vista ecuatorial.  
 Fig. 7. *Acer* sp. 3 Grano de polen en vista polar. Mina de Sanavastre. x 1.250 aumentos.  
 Escalas gráficas: figs 1, 2, 3 y 4: 1cm; fig. 5a: 2 mm; fig. 5b: 0,5 mm

LAMINA III

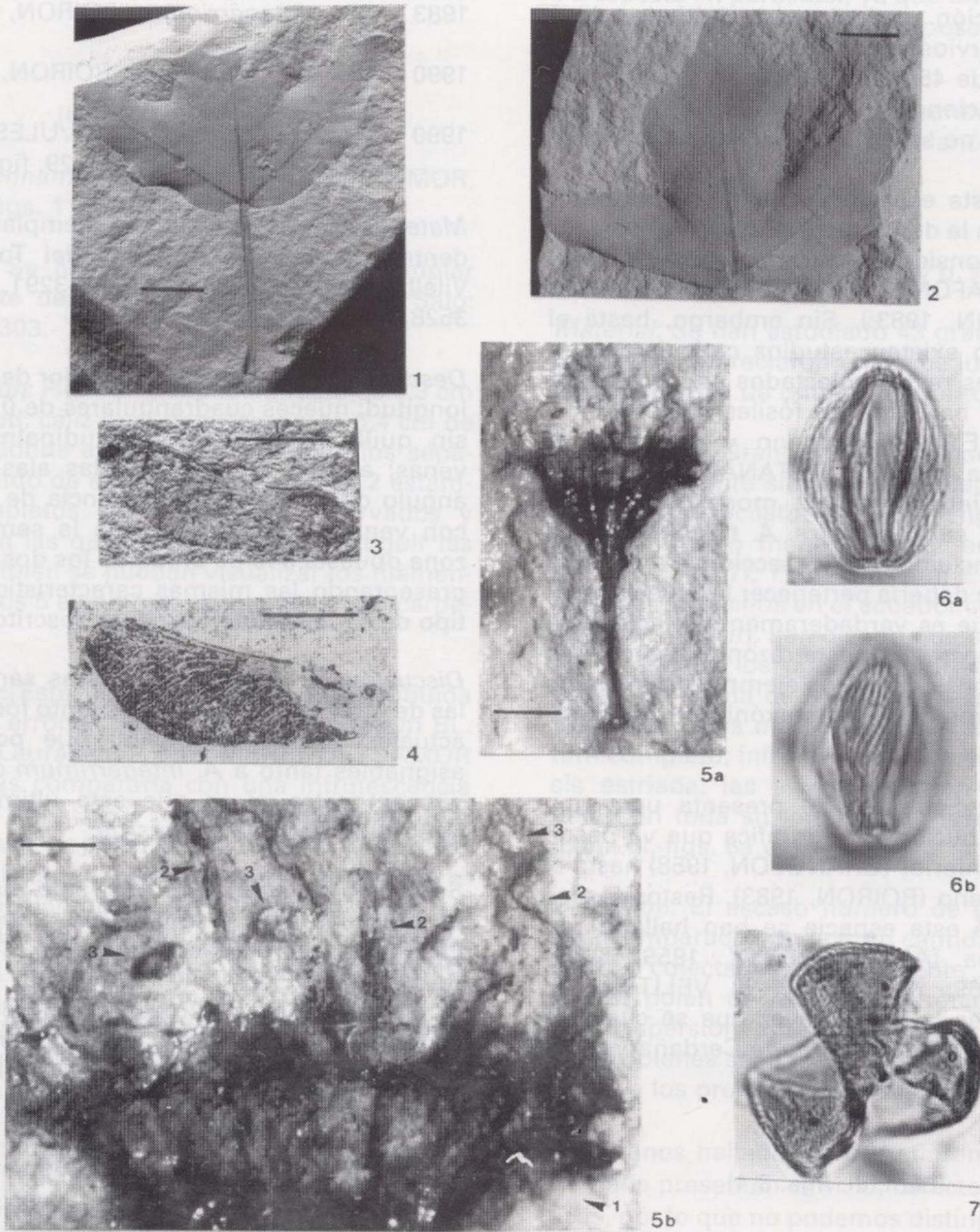


Fig. 1. *Acer subcampestre* Goeppert. MNCN-V-4673. Coll de Saig.  
 Fig. 2. *Acer subcampestre* Goeppert. MGB-G-A-92. Coll de Saig.  
 Fig. 3. *Acer* sp. 1 Sámara. MNCN-V-4674. Torrente de Vilella.  
 Fig. 4. *Acer* sp. 1 Sámara. MNCN-V-3290. Torrente de Vilella.  
 Fig. 5a. *Acer* sp. 2 Flor. MNCN-V-303. Sin localidat.  
 Fig. 5b. Detalle del ejemplar MNCN-V-303. 1- Cáliz, 2- filamento, 3- antera.  
 Fig. 6a. *Acer* sp. 3 Grano de polen en vista ecuatorial. Torrente de Vilella. x 1.250 aumentos.  
 Fig. 6b. Diferente enfoque del grano de polen en vista ecuatorial.  
 Fig. 7. *Acer* sp. 3 Grano de polen en vista polar. Mina de Sanavastre. x 1.250 aumentos.  
 Escalas gráficas: figs 1, 2, 3 y 4: 1cm; fig. 5a: 2 mm; fig. 5b: 0,5 mm

ces agudos; base cordada o lobada; margen irregularmente lobulado u ocasionalmente dentado; nerviación rectipalmada; alrededor de 4 pares de nervios secundarios con ángulo de divergencia de 45°-90° que acaban su recorrido en las lobulaciones; presencia de nervios intersecundarios; no se observa nerviación terciaria.

**Discusión:** Esta especie presenta una morfología idéntica a la de la actual *A. campestre* L., por lo que se la consideró sinónima de ésta (VILLALTA & CRUSAFONT, 1945; MENENDEZ AMOR, 1955; ROIRON, 1983;). Sin embargo, hasta el momento no existen estudios cuticulares que relacionen los restos colectados con la especie viviente. Así, hay especies fósiles como *A. tyrillense* SMILEY, del Mioceno y Plioceno de Norteamérica (WOLFE & TANAI, 1987), con ejemplares indistinguibles morfológicamente de los de *A. subcampestre*. *A. tyrillense* no se encuentra incluido en la sección *Campestris* PAX, a la que debería pertenecer la especie ceretana si es que es verdaderamente relacionable con *A. campestre*. Por esta razón, creemos más apropiado considerar a los ejemplares descritos con la denominación parataxónica *A. subcampestre*.

**Distribución:** Esta especie presenta una muy amplia distribución estratigráfica que va desde el Mioceno Inferior (GRANGEON, 1958) hasta el Plio-Pleistoceno (ROIRON, 1983). Restos fósiles asignables a esta especie se han hallado por toda Europa (ANDREANSZKY, 1959; KNOBLOCH, 1969; KNOBLOCH & VELITZELLOS, 1986). Esta es la primera vez que se cita esta especie en el Vallesense de la Cerdeña y en el conjunto del Terciario español.

*Acer* sp. 1  
(Lám. III, figs. 3-4)

- 1859 - *Acer sphendaminum*, MASSALONGO et SACARABELLI, págs. 343-344, lám. XIX, figs. 7-8.  
1892 - *Acer campestre*, BOULAY, págs. 90-91, lám. 10, fig. 3.  
1958 - Sámara de arces, GRANGEON, pág. 194, lám.-text. XXXV, figs. 3, 5, 7, 9.  
1973 - *Acer campestre*, GIVULESCU und OLOS, pág. 51, lám. XIX, fig. 9-10, 14.

- 1973 - *Acer laetum*, GIVULESCU und OLOS, pág. 51, lám. XIX, fig. 7-8.  
1983 - *Acer integerrimum*, ROIRON, pág. 698, fig. 6, nº 6.  
1990 - *Acer* sp., AMBERT et ROIRON, pág. 176, lám. 2, fig. 6-7.  
1990 - *Acer* cf. *campestre*, GIVULESCU, pág. 128, lám. 20, fig. 1, lám. 29, figs. 11-13.

**Material:** Se han estudiado 4 ejemplares procedentes de los afloramientos del Torrente de Vilella: MNCN-V-3290, MNCN-V-3291, MNCN-V-3528, MNCN-V-4674.

**Descripción:** Sámara de alrededor de 3,5 cm de longitud; nueces cuadrangulares de 0,8x0,8 cm, sin quilla, recorridas longitudinalmente por venas; ángulo de unión de las alas ≈ 75-80°; ángulo de la nuez ≈ 30°; ausencia de sulco; ala con venas que abarcan toda la semilla en la zona opuesta a la de unión de los dos aquenios, presentando las mismas características que el tipo de sámara anteriormente descrito.

**Discusión:** Si comparamos estas sámaras con las de otras especies de arces tanto fósiles como actuales, podemos concluir que podrían ser asignables tanto a *A. integerrimum* como a *A. subcampestre*, si es que esta última especie integró la sección *Campestris*.

Sámaras de este tipo han sido usualmente encontradas junto a hojas de *A. integerrimum*. Este es el caso del Messiniense de Murviel-Les-Beziers (AMBERT et ROIRON, 1990) y de otras localidades fósiles euroasiáticas y norteamericanas en donde aparecen restos foliares asignables a la sección *Platanoidae* (WALTHER, 1972; TANAI, 1983; WOLFE & TANAI, 1987).

Para poder atribuir sin lugar a duda este tipo de sámaras a una o a las dos especies citadas deberemos hallar sámaras en conexión orgánica con ramas que tengan hojas, o, en su defecto, encontrar restos foliares con la cutícula preservada para poder determinar la sección del género *Acer* a la que pertenecen verdaderamente *A. integerrimum* y *A. subcampestre*.

**Distribución:** Sámara con esta morfología han sido halladas en afloramientos de toda Europa

desde el Vallesense (MELLER, 1989), hasta el Plio-Pleistoceno (ROIRON, 1983).

*Acer* sp. 2  
(Lám. III, fig. 5a y b)

- 1955 - *Cinnamomum* sp., MENENDEZ AMOR, págs. 115-116, lám. XXXV, fig. 3.

**Material:** Se ha estudiado un único ejemplar procedente del afloramiento de Coll de Saig: MNCN-V-303.

**Descripción:** Flor con pedúnculo recto de 0,3 cm de longitud, cáliz muy deteriorado de 0,4 cm de anchura donde apenas se distinguen los sépalos. Saliendo de este cáliz se observan 2 estambres completos con filamentos recurvados y anteras en las que no se pueden distinguir las tecas; también se pueden visualizar los filamentos de otros 5 estambres; no se observan carpelos.

**Discusión:** Esta flor, en principio, fue atribuida de forma errónea al género *Cinnamomum* BL. (familia Lauraceae) por MENENDEZ AMOR (1955), tras compararla con una infrutescencia figurada por HEER (1856), procedente del Sarmatiense de Oehningen (Suiza). Los frutos de esta infrutescencia no presenta ningún parecido con el ejemplar que se describe en este trabajo ya que se trata de bayas, frutos típicos de la familia Lauraceae. Por su parte, HANTKE (1954) figuró un conjunto de flores, también del Sarmatiense de Oehningen, que asigna al género anteriormente citado. Estas flores tampoco presentan ninguna similitud con el ejemplar estudiado ya que poseen un perigonio muy marcado con 6 piezas, mientras que el ejemplar ceretano poseyó cáliz y, casi con seguridad, corola. Como hemos apuntado anteriormente, el cáliz todavía persiste aunque deteriorado; los pétalos de la corola debieron caer, no apareciendo en el fósil.

El género *Acer* presenta flores hermafroditas y unisexuales, sin embargo tras estudiar este ejemplar no podemos asegurar que se trate de una flor masculina, ya que se pudieron perder los carpelos durante el proceso de fosilización.

Este resto floral no puede ser atribuido a ninguna especie en particular, ya que un gran número de especies del género *Acer* poseen flores con estas características.

Es la primera vez que se describe una flor de estas características en el Terciario europeo.

*Acer* sp. 3  
(Lám. III, figs. 6a y b, 7)

**Material:** Se han estudiado 43 granos de polen, los cuales aparecieron en todos los afloramientos estudiados de una forma puntual.

**Descripción:** Granos 3-zonocolpados; isopolares; radialmente simétricos; prolotos o subprolotos en vista ecuatorial (Lám. III, figs. 6a y b); de aspecto más o menos circular en vista polar (Lám. III, fig. 7); P=30-43,6 μm; E=20-25,5 μm; colpos más anchos en el ecuador con aproximadamente 4,5 μm, pareciendo que se pueden llegar a unir en los polos, donde se hacen muy estrechos; exina de ≈1,5 μm de espesor; sexina unas dos veces más gruesa que la nexina; tectum completo; infratectum columelado; superficie estriada, las estrías recorren el grano de polen en toda su longitud de forma ondulada (Lám. III, figs. 6a y b).

**Discusión:** El escaso número de granos hallados, comparado con la gran cantidad de macrorestos colectados, seguramente es debido a que el polen de los arces ceretanos presentó una dispersión entomófila, sin descartar que estos pólenes sean menos resistentes que otros frente a los procesos de fosilización.

Los granos hallados en los afloramientos de la Cerdeña presentan al M. O. características idénticas, por lo que no podemos distinguir distintos morfotipos, a diferencia de lo que ocurre con los macrorestos. Posiblemente las especies ceretanas asignables al género *Acer* presentaron paliomorfos semejantes.

Los pólenes estudiados parecen ser relacionables con el tipo *A. campestre* L., propuesto por CLARKE & JONES (1978), y con la especie parataxónica descrita por NAGY (1985),

*Aceripollenites reticulatus*, detectada en el Egeriense, Karpatiense y Sarmatiense de Hungría.

## AGRADECIMIENTOS

Este estudio forma parte de mi Tesis Doctoral, dirigida por las Dras. Carmen Diéguez y Dolores Gil. A ellas, y a la ponente del trabajo, Dra. M.<sup>a</sup> Eugenia Ron, mi agradecimiento. Estos agradecimientos deben hacerse extensibles a la Dra. Isabel Rábano, Directora del Museo Geominero, y a Ana Rodrigo.

## REFERENCIAS

- ALVAREZ RAMIS, C. y GOLPE-POSSE, J. M. (1981): *Sobre la paleobiología de la cuenca de Cerdanya (depresiones pirenaicas)*. Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (Geol.), 79, pp. 31-44.
- AMBERT, P. et ROIRON, P. (1990): *Un travertin d'âge Messinien (Murvill-les-Beziers, Languedoc-France). Importance de sa macroflore dans le contexte paléogéographique régional*. Palaeobiol. Cont., 17, pp. 167-188.
- ANADON, P.; CABRERA, L.; JULIA, R.; ROCA, E. & ROSELL, L. (1989): *Lacustrine oil-shale basins in tertiary grabens from N.E. Spain (Western European Rift System)*. Palaeontogeogr. Palaeoclimat. Palaeoecol., 70, pp. 7-28.
- ANDREANSZKY, G. (1959): *Die Flora der Sarmatischen Stufe in Ungarn (Die paläoökologische und zöologische Beziehungen ihrerer Entwicklungsgeschichte)*. Geologische Übersicht von Zoltán Schréter, Budapest, 360 pp.
- BALLESIO, R.; MEON, M. et SAMUEL, E. (1979): *Un gisement à plantes des formations pliocènes des environs de Rasteau près Vaison-la-Romaine (Vaucluse): Stratigraphie, faune, étude des macrorestes végétaux, palynologie*. Geobios, 12(2), pp. 235-265.
- BARRON, E. (1992): *La presencia del género Acer, L. (Aceraceae, Sapindales, Rosidae) en el Mioceno Superior de la Depresión Ceretana (Lérida)*, pp. 543-551. In ALEMANY, A. (ed.): *Historia Natural '91*, Palma de Mallorca.
- BARRON, E. (1993): *Thaphonomic studies of the plant remains from the Ceretana Basin (Lérida, Spain)*. Kaupia, 2, pp. 127-132.
- BESSEDIK, M. (1985): *Reconstitution des environnements miocènes des régions nord-ouest méditerranéennes à partir de la Palynologie*. Thèse d'État. Académie de Montpellier. Université des Sciences et Techniques du Languedoc, 162 pp.
- BOULAY, N. (1890): *Flore pliocène des environs de Théziers (Gard)*. Librairie Paul Klincksieck, Paris, 70 pp.
- BOULAY, N. (1892): *Flore pliocène du Mont-Dore (Puy-du-Dôme)*. Chez F. Savy, Librairie. Paris. 115 pp.
- CABRERA, L.; ROCA, E. & SANTANACH, P. (1988): *Basin formation at the end of a strike-slip fault: the Cerdanya Basin (Eastern Pyrenees)*. J. Geol. Soc. London., 145, pp. 261-268.
- CLARKE, G. C. S. & JONES, M. R. (1978): *The Northwest European Pollen Flora, 17. Aceraceae*. Rev. Palaeobot. Palyn., 26 (NEPF), pp. 181-193.
- CRONQUIST, A. (1981): *An integrated system of classification of flowering plants*. Columbia University Press. New York, 1262 pp.
- DEPAPE, M. G. (1922): *Recherches sur la flore pliocène de la Vallée du Rhône. Flores de Saint-Marcel (Ardèche) et des environs de Théziers (Gard)*. Ann. Sc. Nat. Bot. Paris, (10), 4, pp. 73-266.
- DIEGUEZ, C.; NIEVES, J. L. & BARRON, E. (in press.): *Fossil galls (zoocécids) from Upper Miocene of la Cerdaña (Lérida, Spain)*. Review. Palaeobot. Palyn.
- ECKENWALDER, J. E. (1980): *Foliar heteromorphism in Populus (Salicaceae) a source of confusion in the taxonomy of Tertiary leaf remains*. Syst. Bot., 5(4), pp. 366-383.
- ENGLER, A. (1883): *Versuch einer Entwicklungsgeschichte der extratropischen florengebiete der nördlichen Hemisphäre*. Wilhelm Engelmann, Leipzig, 202 pp.
- FERNANDEZ MARRON, M. T. (1970): *Aportación al estudio paleobotánico y paleoecológico de la flora terciaria de Olocau (Valencia)*. Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (Geol.), 68, pp. 131-144.
- GIVULESCU, R. (1990): *Flora fosila a Miocenului Superior de la Chiuzbaia (Judetul Maramures)*. Editura Academiei Române, Bucuresti, 233 pp.
- GIVULESCU, R. und OLOS, E. (1973): *Paläobotanische studien im Tertiär Siebenbürgens*. Mem. Geol. Inst. Bukarest, 19, pp. 1-60.
- GOEPPERT, H. (1855): *Die tertiäre Flora von Schosnitz in Schlesien*. Görlitz, 52 pp.
- GRANGEON, P. (1953): *La flore pontienne de Gourgouras (Ardèche)*. Bull. Soc. Geol. Fr., (6), III, pp. 303-320.
- GRANGEON, P. (1958): *Contribution à l'étude de la paléontologie végétale du massif du Coiron (Ardèche) (Sud-Est du Massif Central français)*. Mém. Soc. Hist. Nat. Aubergne, 6, pp. 1-302.
- HANTKE, R. (1954): *Die fossile Flora der obermiozän Oehningen-Fundstelle Schrotzburg (Schienenberg, Süd-Baden)*. Denk. Schweiz. Natur Gesel. Zürich, 80(2), PP. 1-118.
- HEER, O. (1856): *Flora tertiaria helveticae. Die Tertiäre flora der Schweiz. Die apetalen Dicotyledonen*. Wurster & Comp., Winterthur, 110 pp.
- HEYWOOD, V. H. (1985): *Las plantas con flores*. Ed. Reverté, S. A. Barcelona, 322 pp.
- HICKEY, L. J. (1973): *Classification of the architecture of dicotyledonous leaves*. Amer. J. Bot., 60 (1), pp. 17-33.
- JULIA, R. (1984): *Síntesis geológica de la Cerdanya (Girona)*, pp. 95-98. In CSIC (ed.): *El Borde mediterráneo español: evolución del orógeno bético y Geodinámica de las depresiones neógenas*, Granada.
- KNOBLOCH, E. (1969): *Tertiäre Floren von Mähren*, Brno, 201 pp.
- KNOBLOCH, E. & VELITZELOS, E. (1986): *Die obermiozäne flora von Likudi bei Elassona/Thessalien Griechenland*. Doc. Nat., 29, pp. 5-20.
- KOVATS, J. (1856): *Fossile Flora von Erdöbénye*. Arb. Geol. Ges. Ung., 1, pp. 1-37.
- LAURENT, L. (1904-1905): *Flore pliocène des cinérites du Pas-de-la-Mougudo et de Saint-Vicent-la Sabie (Cantal)*. Ann. Mus. Hist. Nat. Marseille, Geol., 9, pp. 1-299.
- LAURENT, L. (1908): *Flore plaisancienne des argiles cinéritiques de Niac (Cantal)*. Ann. Mus. Hist. Nat. Marseille, Geol., 12, pp. 1-88.
- MARTY, P. (1903): *Flore miocène de Joursac (Cantal)*. Librairie, J. -B. Baillièrre & Fils, Paris, 92 pp.
- MARTY, P. et GLANGEAUD, L. (1936): *La formation d'âge Miocène supérieur de la Bourboule*. Mém. Soc. Géol. Fr., N. S., 28, pp. 1-50.
- MASSALONGO, A. et SCARABELLI, G. (1859): *Studii sulla flora fossile e geologia stratigrafica del Senigaliese*, Imola, 506 pp.
- MELLER, B. (1989): *Eine blatt-flora aus den obermiozänen Dinotherien-Sanden (Vallesium) von Sprendlingen (Rheinhessen)*. Doc. Nat., 54, pp. 1-104.
- MENENDEZ AMOR, J. (1948): *Notas preliminares al estudio sobre la flora terciaria de la Cerdaña española*. Las Ciencias, año 13, 4, pp. 782-787.
- MENENDEZ AMOR, J. (1955): *La depresión ceretana española y sus vegetales fósiles. Característica fitopaleontológica del Neógeno de la Cerdaña española*. Mem. R. Acad. Cien. exactas, fis: Nat. Madrid., ser. C. N., 18, pp. 1-344.
- MULLER, J. (1981): *Fossil pollen records of extant angiosperms*. Bot. Rev., 47, pp. 1-142.
- NAGY, E. (1985): *Sporomorphs of the Neogene in Hungary*. Geol. Hung. ser. Palaeont., 47, pp. 1-234.
- PAMALAREV, E. (1989): *Paleobotanical evidences of the Tertiary history and origin of the Mediterranean sclerophyll dendroflora*. Pl. Syst. Evol., 162, pp. 93-107.
- PHIPPS, D. & PLAYFORD, G. (1984): *Laboratory techniques for extraction of palynomorphs from sediments*. Pap. Dep. Geol. Univ. Qd., 11 (1), pp. 1-23.
- REROLLE, M. L. (1884-1885): *Études sur les végétaux fossiles de Cerdagne*. Rev. Scien. Nat. Montpellier., (3), 4, pp. 167-191, 252-298, 368-386.
- ROCA, E. (1986): *Estudi geologic de la fossa de la Cerdanya*. Tesis de Licenciatura. Dpto. de Geomorfología y Tectónica, Facultad de Geología, Universidad de Barcelona, 109 pp. (Inédita).
- ROIRON, P. (1983): *Nouvelle étude de la macroflore Pliocène de Crespià (Catalogne, Espagne)*. Geobios, 16 (6), pp. 687-715.
- SAENZ DE RIVAS, C. (1978): *Polen y esporas (Introducción a la Palinología y vocabulario palinológico)*. H. Blume Ediciones, Madrid, 219 pp.
- SAPORTA, G. de (1884): *Nouvelles observations sur la flore fossile de Mogi dans le Japon méridional*. Ann. Sc. Nat. (Bot.), (6), 17, pp. 73-106.
- SAPORTA, G. de et MARION, A. F. (1876): *Recherches sur les végétaux fossiles de Meximieux*. Arch. Mus. Hist. Nat. Lyon, 1, pp. 131-335.
- SANZ DE SIRIA, A. (1977): *Estudio de la flora terciaria de la cuenca de la Seu d'Urgell (Resumen de Tesis doctoral)*. Butll. Inf. Inst. Paleont. Sabadell, 9, pp. 25-29.
- SANZ DE SIRIA, A. (1980a): *Plantas miocénicas de Sanavastre (Gerona). Depresión de Cerdaña*. Butll. Inf. Inst. Paleont. Sabadell, 12, pp. 45-50.
- SANZ DE SIRIA, A. (1980b): *Estudio sistemático y paleoecológico de la flora miocénica de la cuenca de la Seo d'Urgell*. Paleont. Evol., 14, pp. 1-28.
- SANZ DE SIRIA, A. (1982): *La flora pliocénica de Siurana (Gerona)*. Paleont. Evol., 17, pp. 3-14.
- SOLE, L. y LLOPIS, N. (1947): *Mapa geológico de España. Escala 1:50.000. Explicación de la hoja nº 216*. Bellver. Tip. y lit. Coullaut, Madrid, 109 pp.
- STUR, D. (1867): *Beiträge zur Kenntnis der Flora der Sübwasserquarze, der Congerien-und Cerithiensichten im Wiener und Ungarischen Becken*. Jahrb. Geol. Reichsanst., 17, pp. 77-188.
- SUZUKI, M. (1982): *Some fossil woods from the Palaeogene of Northern Kyushu, II*. Bot. Mag. Tokyo, 95, pp. 281-294.
- TAKAHASHI, A. & SUZUKI, M. (1988): *Two new fossil woods of Acer and new combination of Prunus from the Tertiary of Japan*. Bot. Mag. Tokyo, 101, pp. 473-481.

TAKHTAJAN, A. (1991): *Evolutionary trends in flowering plants*. Columbia University Press, New York, 241 pp.

TANAI, T. (1978): *Taxonomical investigation of the living species of the genus Acer L., based on vein architecture of leaves*. J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., (4), 18 (3), pp. 243-282.

TANAI, T. (1983): *Revision of the Tertiary Acer from East Asia*. J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., (4), 20 (4), pp. 291-390.

TEIXEIRA, C. (1952): *Flora fóssil do Pliocénico de Vale de Santarém*. Com. Serv. Géol. Portugal, 33, pp. 51-64.

UNGER, F. (1850): *Genera et species plantarum fossilium*. Sumptibus Academiae Caesare. Vindobonae, 627 pp.

VERNET, J. L. (1981): *Recherches sur les macroflores plio-pleistocènes du Sud des Grandes Causses: les érables des diatomites de Bernasso (Lunas, Hérault)*. Paléobiol. Cont., 12 (1), pp. 43-51.

VILLALTA, J. F. y CRUSAFONT, M. (1945): *La flora miocénica de la depresión de Bellver*. Ilerda, 3(2), pp. 339-353.

VILLALTA, J. F. y VICENTE, J. (1972): *Una flora del Cuaternario antiguo en las cercanías de Crespià*. Acta Geol. Hisp., 7 (4), pp. 120-128.

VIVIANI, V. (1883): *Lettre à M. Pareto sur les restes de plantes fossiles trouvés dans les gypses tertiaires de la Stradella près de Pavie*. Mém. Soc. Géol. Fr., (1), 1, pp. 129-134.

WALTHER, W. (1972): *Studie über Tertiäre Acer Mitteleuropas*. Abh. Staatl. Mus. Mineral. Geol., Dresde, 19, pp. 1-309.

WOLFE, J. A. (1981b): *Vicariance Biogeography of Angiosperms in relation to Paleobotanical data*, pp. 413-445. In NELSON, G. & PASEN, D. E. (eds.): *Vicariance Biogeography. A critique*. Symposium of the Systematics discussion group of the American Museum of Natural History, Mai 2-4, 1979. Columbia University Press, New York.

WOLFE, J. A. & TANAI, T. (1987): *Systematics, Phylogeny and distribution of Acer (maples) in the Cenozoic of Western North America*. J. Fac. Sc., Hokkaido Univ., (4), 22 (1), pp. 1-246.

Original recibido: Diciembre 1995.

Original aceptado: Enero 1996.

## Optimización y tratamiento integral de recursos hídricos.

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

### R E S U M E N

La relación existente entre el volumen de agua regulado mediante técnicas de explotación de tipo superficial y subterráneo da una idea de cual puede ser el modelo que mejor satisface las necesidades de cada cuenca. En el presente trabajo se efectúa el cálculo de dicho cociente y, en función de los resultados obtenidos, se recomienda la adopción de un determinado modelo hídrico, en la futura planificación hidrológica.

Asimismo, la aplicación de una gestión fundamentada en el uso conjunto precisa de estudios que interrelacionen la localización geográfica y potencialidad hídrica de las Unidades Hidrogeológicas y acuíferos y de la infraestructura hidráulica existente y prevista, ya que cada caso concreto presenta unas particularidades distintas que condicionarán su esquema de explotación.

**Palabras clave:** Técnicas de explotación de tipo superficial, Técnicas de explotación de tipo subterráneo, Uso conjunto, Recarga artificial, Modelo hídrico más adecuado.

### A B S T R A C T

The relation between the water volume controlled by surface and underground techniques can give an idea of which is the model that better answers to the needs of each basin. Therefore, in the present work, this relation is calculated as a quotient, and, according to the obtained data, the use of a definite hidric model is recommended. According to this model, the water resources use of each basin in the future planning would be done.

Likewise, the conjunctive use based management application needs several studies which will relate the Hydrogeological Units geographical position and hidric possibilities; and also needs the hydraulic structures existent and/or foreseen, since each concrete case has different particularities that will conditionate its exploitation scheme.

**Key words:** Surface exploitation techniques, underground exploitation techniques, conjunctive use, artificial recharge, suitable hidric model.

### 1. CONSIDERACIONES PREVIAS

La vigente legislación de aguas establece que sólo existe un único recurso hídrico. Ahora bien, este circula unas veces por la superficie del terreno hasta encauzarse en los ríos, y otras por el subsuelo permeable hasta alcanzar las estructuras subterráneas, que constituyen los acuíferos, fluyendo bajo gradientes naturales e inducidos.

La explotación de este recurso hídrico se puede realizar a través de técnicas superficiales (normalmente embalses) y subterráneas (normalmente sondeos). No obstante, es preciso hacer hincapié, para no adoptar consideraciones intuitivas, que las técnicas superficiales no se limitan únicamente a explotar el agua de lluvia no evaporada ni infiltrada que circula por la superficie del terreno; ni las técnicas subterráneas se circunscriben a explotar exclusivamente la infiltración natural que tiene lugar en los acuíferos antes de que esta se drene por ríos y manantiales. A este respecto, la recarga artificial

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

y la recarga inducida a través del lecho de los ríos contribuyen a explotar, a través de técnicas de tipo subterráneo, volúmenes de agua que nunca antes habían circulado por el subsuelo.

En líneas generales resulta muy difícil suministrar cifras indicativas de los volúmenes de agua que atribuidos a circulación subterránea se regulan superficialmente, o viceversa. El cuadro-I muestra el uso de la escorrentía subterránea asociada a embalses, que se estima, en un mínimo, de 2800 hm<sup>3</sup>/a.

CUADRO - I

USOS DIRECTOS Y ASOCIADOS A EMBALSES DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS (\*)

CUENCA HIDROGRAFICA	APORTACION Subterránea hm <sup>3</sup> /a	USOS			SALIDAS NO APROVECHADAS	
		Directos hm <sup>3</sup> /a	Asociados hm <sup>3</sup> /a	Ríos hm <sup>3</sup> /a	Mar hm <sup>3</sup> /a	
NORTE II	2086	56	0	1978	52	
NORTE III	418	74	0	328	16	
DUERO	1808	799	0	1019	-	
TAJO	1662	164	223	1265	-	
GUADIANA I	829	616	0	13	-	
GUADIANA II	84	75	0	-	9	
GUADALQUIVIR	2586	428	877	1186	85	
GUADALETE-BARBATE	283	79	0	184	-	
SUR	1303	733	151	298	123	
SEGURA	633	478	297	146	5	
JUCAR	2945	1466	967	219	264	
EBRO	3780	349	260	3140	31	
C.I. DE CATALUÑA	968	449	10	358	151	
TOTALES	18356	6663	2766	9651	736	

(SEGUN LOPEZ GETA Y MURILLO, 1994)

(\*) No se han incluido las Cuencas de Galicia Costa y Norte I por no tener definidas Unidades Hidrogeológicas y Baleares y Canarias porque su regulación superficial es muy reducida.

Los volúmenes de agua regulados superficialmente que se indican en el cuadro I, no responden a una planificación programada de antemano que demuestre la idoneidad de este sistema de explotación frente a otras técnicas, o a la alternativa de utilización conjunta con las mismas. En principio, parte de esta circulación subterránea regulada superficialmente podría

explotarse, con un mejor aprovechamiento, mediante técnicas subterráneas o bien mediante uso conjunto. Esta consideración apunta hacia la urgente necesidad de efectuar estudios de detalle tendentes a definir la alternativa que mejor optimice el aprovechamiento del recurso hídrico, incluso en sistemas de explotación con un funcionamiento avalado por la experiencia de muchos años. Debe tenerse en cuenta que algunos de los actuales embalses fueron construidos en las décadas de los cincuenta y sesenta bajo unos objetivos agrícolas fundamentados en una cuestión social: creación de empleo y producción agraria dirigida al autoabastecimiento.

En lo referente a datos estadísticos, sobre volúmenes de agua que asignados a una circulación superficial se regulan subterráneamente, es necesario indicar que no existen y resultaría muy interesante un estudio exhaustivo a nivel nacional de los siguientes puntos:

— pérdidas que tienen lugar en los embalses, especialmente en los terrenos mesozoicos y terciarios de la mitad oriental peninsular, y que posteriormente, se regulan mediante técnicas subterráneas, o bien contribuyen a frenar la intrusión marina de algunos acuíferos costeros. Por tratarse de una obra de reciente construcción, se realiza un breve apunte sobre el embalse de El Catllar en Tarragona, cuya capacidad es de 57 hm<sup>3</sup>/año, su aportación media de 26 hm<sup>3</sup>/año y la demanda servida de 14 hm<sup>3</sup>/año, evaluándose las pérdidas por infiltración en 7 hm<sup>3</sup>/año y cuando supera una determinada cota de embalse estas se elevan a 10 hm<sup>3</sup>/año (1977) y 15 hm<sup>3</sup>/año (1976)

— infiltración que tiene lugar en el lecho de los ríos y que está inducida por los bombeos realizados en acuíferos conectados hidráulicamente con los mismos. Esta técnica permite regular, especialmente en el curso bajo y tramo de desembocadura de los grandes ríos, un importante volumen de agua que de otra forma se perdería en el mar. Así, en la subcuenca costera del río Tordera, que presenta una aportación media anual de 178 hm<sup>3</sup>/año y carece de obras de regulación superficial, se explotan mediante captacio-

nes subterráneas que regulan el agua circulante por el río, 27 hm<sup>3</sup>/año de escorrentía estrictamente superficial.

— por último, en relación con las experiencias de recarga artificial de acuíferos realizadas en España, es preciso mencionar que las mismas se han limitado en la mayor parte de las ocasiones a la infiltración de unos pocos cientos de miles de metros cúbicos: en las instalaciones de Guadix, Valle del río Oja y Delta del Llobregats se infiltran del orden de 1-2, 2,5-5 y 14 hm<sup>3</sup>/año respectivamente.

Estas cifras contrastan con el volumen de recarga artificial en California (5.200 hm<sup>3</sup>/año en coordinación con otras alternativas de utilización conjunta) o en Israel 10% de los recursos de agua que se explotan. A partir de estas cifras LOPEZ GETA y MURILLO (1993) han estimado, en base a la demanda actual, para usos consuntivos, que la fracción de la aportación hídrica sin regular que podría destinarse a recarga artificial en España, para el segundo horizonte del Plan hidrológico, es cuantificable en unos 3000 hm<sup>3</sup>/año.

## 2. DISTRIBUCION ESPACIAL DE LAS DISPONIBILIDADES HIDRICAS. ADOPCION DEL MODELO HIDRICO MAS ADECUADO A CADA CUENCA.

El Anteproyecto del Plan Hidrológico Nacional (PHN) (1992) evalúa la disponibilidad hídrica total en 47.212 hm<sup>3</sup>/año, la aportación hídrica regulada a través de embalses de superficie en 41.744 hm<sup>3</sup>/año y la explotación efectuada mediante captaciones de agua subterránea en 5.438 hm<sup>3</sup>/año.

Estas cifras reflejan que por cada hectómetro cúbico regulado a través de técnicas subterráneas se regulan casi ocho mediante superficiales. No obstante, este valor puede reducirse notablemente si se introduce en el cálculo el término relativo a la disponibilidad hídrica para usos consuntivos: abastecimiento, industria y agricultura.

El resultado que se obtiene, al no considerar los aproximadamente 16.000 hm<sup>3</sup>/año (PHN) de regulación puramente hidroeléctrica, muestra que por cada hectómetro cúbico regulado subterráneamente se regulan algo menos de cinco mediante obras de superficie.

Por consiguiente, es preciso admitir, se emplee o no el concepto de regulación útil para usos consuntivos, que existe un predominio mayoritario del volumen de agua regulado superficialmente. Esta puntualización, que a nivel de cifras para la totalidad del territorio nacional es cierta, varía notablemente en un tratamiento individual por cuencas hidrográficas (cuadro-II).

CUADRO II (\*)

CUENCA HIDROGRAFICA	Orden de magnitud de los hectómetros cúbicos regulados a través de técnicas de explotación de tipo superficial por cada hectómetro cúbico regulado mediante técnicas de explotación de tipo subterráneo.	
	Utilizando el concepto de disponibilidad hídrica total.	Utilizando el concepto de disponibilidad hídrica para usos consuntivos.
GALICIA COSTA	116	61
NORTE I, II y III	146	32
DUERO	20	9
TAJO	37	15
GUADIANA I y II	3	2
GUADALQUIVIR	6,5	5
SUR	1	1
SEGURA	1	1
JUCAR	1	1
EBRO	50	36
C. INTERNAS DE CATALUÑA	1,5	1,5
BALEARES	0,1	-
CANARIAS	0,2	-

MURILLO (1994).

(\*) Elaborado en base al Anteproyecto del Plan Hidrológico Nacional (1992) y al Plan de Investigación de Aguas Subterráneas (PIAS).

El análisis del cuadro II permite la identificación de las siguientes zonas: grandes cuencas de la mitad norte, cuencas atlánticas de la mitad sur, cuencas de la vertiente mediterránea y cuencas insulares.

### Grandes Cuencas de la mitad norte:

Incluye Galicia Costa y las Cuencas hidrográficas del Norte, Duero, Tajo y Ebro. La utilización

de las técnicas de explotación subterráneas es reducida e incluso en algunas cuencas casi marginal. La base de la disponibilidad son los embalses.

Este modelo hidráulico es posible gracias a la conjunción, en mayor o menor grado, de factores como: pluviometría media-alta y relativamente regular en el tiempo, predominio de terrenos geológicamente impermeables (paleozoico y escudo granítico) y disposición topográfica de grandes cadenas montañosas con cerradas que permiten la construcción de presas de una cierta capacidad.

Existen, no obstante, zonas dentro de estas Cuencas que al no ajustarse a los condicionantes antes citados responden a un esquema de gestión hídrica diferente. Este es el caso de la región de los Arenales en la meseta del Duero o la margen derecha de la cuenca del Ebro. En esta última zona, incluyendo el aluvial del Ebro, la relación entre el volumen de agua regulado mediante técnicas superficiales y subterráneas es de 1,5. Cifra muy próxima a la obtenida en las cuencas de la vertiente mediterránea y notablemente alejado del valor medio deducido para el total de la cuenca del Ebro.

Por consiguiente, salvo en áreas como las anteriormente indicadas, la planificación hídrica a programar en estas cuencas debe responder al clásico modelo europeo, predominio de técnicas de explotación de tipo superficial que, por supuesto, tiene que incluir una política de abastecimiento a núcleos urbanos apoyada en el empleo de técnicas subterráneas.

#### **Cuencas atlánticas de la mitad sur: Guadiana y Guadalquivir**

El valor de la relación existente entre el volumen de agua regulado mediante técnicas superficiales y subterráneas es, comparativamente, muy inferior al obtenido para las grandes cuencas de la mitad norte (Cuadro-II) y ligeramente superior al de las cuencas de la vertiente mediterránea. Así, en las cuencas de la mitad norte, el peso de la regulación hidroeléctrica es muy importante; mientras que en el Guadiana y Guadalquivir la

regulación superficial se utiliza mayoritariamente para usos consuntivos.

El modelo de explotación más adecuado para estas cuencas es el mixto: utilización de técnicas de explotación superficial y subterráneas complementado, con uso conjunto(\*) y en menor medida recarga artificial. Dicho modelo estará condicionado por el esquema hidrogeológico de estas dos cuencas que, en cierta medida, es muy similar: ambas presentan una cabecera de cuenca presidida por afloramientos permeables, un tramo medio con predominio de los materiales impermeables (en el Guadalquivir se limitan prácticamente a la margen derecha) y un curso bajo con importantes formaciones acuíferas.

La configuración expuesta anteriormente dará lugar a que se produzca una mayor potenciación de las técnicas de recarga artificial de acuíferos en el curso bajo del río Guadiana: Ayamonte-Huelva, o sobre el tramo bajo del aluvial del Guadalquivir, mioceno de base de Niebla-Posada y Sevilla-Carmona. Mientras que en las formaciones acuíferas de cabecera será prioritario el uso conjunto en base a las grandes infraestructuras hidráulicas del acueducto Tajo-Segura, o los embalses del Negatin e Iznajar, u otras de menor envergadura como el embalse de Torre de Abraham.

#### **Cuencas de la vertiente mediterránea**

Incluye las Cuencas Internas de Cataluña, Júcar, Segura y Sur.

En estas cuencas el volumen de agua regulado mediante técnicas superficiales es del mismo orden de magnitud que el explotado subterráneamente. La limitación en la construcción de embalses en esta zona, que contrasta con el resto del territorio peninsular, únicamente se debe a la existencia de ciertos condicionantes tales como:

(\*) NOTA: En el presente trabajo cuando se hace referencia al uso conjunto se excluyen aquellos esquemas que engloban la recarga artificial de acuíferos y la recarga inducida a través del lecho de los ríos, ya que se considera que la complejidad e importancia que presentan estas técnicas merece un tratamiento individualizado.

- precipitación reducida e irregular y evaporación elevada.
- extensa franja paralela a la costa donde la construcción de embalses de cierta capacidad presenta dificultad, por su topografía.
- problemas de impermeabilidad en cerradas y vasos que dan lugar a importantes pérdidas debido al predominio de materiales calcáreos.

Por consiguiente, en este área, la posibilidad de aumentar la regulación superficial es muy reducida, como se aprecia en los datos suministrados por el Anteproyecto del PHN. El aumento de regulación superficial previsto para la cuenca mediterránea únicamente representa el 5% del total nacional. No obstante, exige el 14% del total de embalses que se van a construir o recrecer.

El modelo de explotación hídrica, utilizado hasta la fecha, en las cuencas de la vertiente mediterránea, es, salvo en algunos casos aislados, un mixto que, en un futuro próximo, deberá complementarse con uso conjunto y recarga artificial, incluso en el caso de que se aprueben transferencias de agua a las mismas.

El esquema hidrogeológico de las cuencas mediterráneas está constituido, en líneas generales, por una banda interior, relativamente ancha de acuíferos calcáreos, que en numerosas ocasiones también limitan con el mar, y una franja costera de acuíferos detríticos o de carácter mixto.

En las zonas interiores, salvo embalses muy puntuales con capacidad de regulación hiperanual, el modelo de explotación hídrica se fundamentará en técnicas de explotación de tipo subterráneo y en la utilización de uso conjunto (la recarga artificial presentará un carácter más marginal). En la franja costera también existirá un predominio de las técnicas subterráneas pero, en este caso, deberán suplementarse con un amplio programa de recarga artificial que aproveche parte de los excedentes superficiales que actualmente se vierten en el mar.

#### **Cuencas Insulares**

La explotación de los recursos subterráneos constituye hasta la fecha la base de las disponibilidades en estas cuencas. En ambos archipiélagos se puede considerar que la posibilidad de incrementar sus recursos está prácticamente agotada: será necesario acudir a la desalación de agua de mar en el caso de suministros urbanos y turísticos, y a la reutilización de los retornos para satisfacer demandas asociadas a otros usos.

El modelo de explotación hídrica se fundamentará tanto en el aprovechamiento de los recursos subterráneos, como en la utilización de recursos no convencionales. En el caso del archipiélago Balear se deberá completar con un amplio programa de recarga artificial; en el archipiélago canario este programa será de menor envergadura y estará más circunscrito a la realización de experiencias de recarga artificial con aguas residuales.

#### **3. ZONIFICACION DE CUENCAS ATENDIENDO A LA LOCALIZACION GEOGRAFICA Y POTENCIALIDAD HIDRICA DE LAS UNIDADES HIDROGEOLOGICAS Y DE LA INFRAESTRUCTURA HIDRAULICA EXISTENTE Y/O PREVISTA**

Existe una parte muy importante de la aportación hídrica total que teniendo en cuenta tanto condicionantes técnicos y económicos, como las necesidades ambientales, puede ser regulada mediante embalses de superficie, por captaciones de agua subterránea o conjunta utilizando la capacidad de regulación, almacenamiento, hidrodinamismo y espacialidad de los acuíferos.

La elección de la opción más adecuada estará estrechamente ligada al esquema de regulación que mejor integre, en cada sistema de explotación, la localización geográfica y potencialidad hídrica de las unidades hidrogeológicas y la infraestructura hidráulica existente y prevista.

A este respecto, aunque no es fácil responder con cifras concretas, se ha elaborado el Cuadro-III que resume, en cierta medida, el estado actual a nivel peninsular.

CUADRO III

DISTRIBUCION DE LA APORTACION HIDRICA Y DE LA REGULACION SUPERFICIAL Y SUBTERRANEA (hm<sup>3</sup>/a) (\*)

		APORTACION			REGULACION SUPERFICIAL (embalses)		REGULACION SUBTERRANEA bombas y aprovechamiento de manantiales
		Superficial	Subterránea	Total	Capacidad (hm <sup>3</sup> )	Volumen Medio Regulado	
ZONAS SITUADAS AGUAS ARRIBA DE LA REGULACION SUPERFICIAL	Subcuencas reguladas por embalses sin acuíferos aguas arriba	9.185	-	9.185	5.247,5	3.047,5	-
	Subcuencas reguladas por embalses con aportes de acuíferos de escasa o nula explotación	18.027,5	3.854,5	21.882	12.281,5	10.733,5	74,5
	Subcuencas reguladas por embalses con aportes de acuíferos explotados en su cuenca vertiente	22.219	7.051	29.270	26.542	9.203,5	2.733
ZONAS SITUADAS AGUAS ABAJO DE LA REGULACION SUPERFICIAL		21.214	8.449,5	29.663,5	133,5	50	3.176
ZONA CON SUBCUENCAS NO REGULADAS POR EMBALSES Y SIN ACUIFEROS		2.241,5	-	2.241,5	-	-	-
<b>TOTAL</b>		<b>72.867</b>	<b>19.365</b>	<b>92.232</b>	<b>44.184,5</b>	<b>23.034,5</b>	<b>5.983,5</b>

(\*) No se han incluido las cuencas de Galicia Costa y Norte I por no tener definidas Unidades Hidrogeológicas, y Baleares y Canarias, porque su regulación superficial es muy reducida.

Para la elaboración del cuadro III se han considerado dos supuestos, establecidos en función a la morfología de las diez cuencas en que está dividido el territorio peninsular español. El primero viene definido por un gran río único o principal como eje de drenaje de la cuenca (ríos: Duero, Tajo, Guadiana, Guadalquivir, Segura y Ebro) y el segundo se presenta asociado a una cuenca con múltiples ríos como ejes de drenaje independientes que desembocan directamente en el mar. En el primer supuesto se ha tenido también en cuenta el carácter no consuntivo del uso al que se destinan algunas obras hidráulicas situadas sobre el cauce principal. Este hecho ha dado lugar a que, por ejemplo, el río Ebro, en casi su totalidad, tenga un tratamiento análogo al segundo supuesto, ya que al comportarse como un gran colector, sin obras de regulación consuntivas (Mequinenza, Ribarroja y Flix no se

puede considerar como tales), sus afluentes tiene el carácter de ríos independientes entre sí.

A partir de lo mencionado anteriormente, y antes de entrar en un análisis más detallado de las cifras contenidas en el cuadro III, es preciso establecer las siguientes consideraciones:

- la columna que se refiere a la capacidad de embalse no incluye aquellas obras hidráulicas cuyo uso es exclusivamente, o mayoritariamente la producción de energía eléctrica. Si se tuviera en consideración esta la capacidad total de embalse, para todo el territorio nacional, se aproximaría a 53.000 hm<sup>3</sup> (1992).

- tampoco se han incluido, en el cuadro III, las cifras relativas a la regulación natural, es decir los aprovechamientos de agua fluyente en

base a caudales naturales; ya que esta regulación es, en principio, susceptible de una optimización a través de técnicas de explotación de tipo superficial o subterráneo.

- y por último, tampoco se ha tenido presente la regulación exclusivamente hidroeléctrica. La introducción de este factor elevaría el valor de la disponibilidad hídrica media anual, para todo el territorio nacional, hasta una cuantía próxima a los 41.800 hm<sup>3</sup>/año.

Una vez realizadas estas salvedades, los datos más significativos que se desprenden del análisis del cuadro III son los siguientes:

- la capacidad de almacenamiento superficial representa el 12%, sobre un total de aproximadamente 44.000 hm<sup>3</sup>, en las subcuencas reguladas por embalses que no presentan acuíferos aguas arriba; el 28% en las subcuencas reguladas por embalses que reciben aportes de acuíferos con escasa o nula explotación y el 60% en las subcuencas reguladas por embalses que en su cuenca vertiente tienen acuíferos explotados.

Por consiguiente, la distribución espacial de los elementos de regulación superficial se concentra, mayoritariamente, en los mismos lugares en donde se regula o se puede regular mediante técnicas subterráneas. Este hecho implica que, en la futura planificación hidrológica, se deba potenciar la construcción de obras de regulación superficial en las zonas donde no existen acuíferos aguas arriba de la actual regulación y apostar, como alternativa novedosa, por un incremento de la utilización conjunta en aquellas áreas donde se conjuga la existencia de elementos de regulación superficial y subterránea.

El rendimiento de la regulación superficial (hm<sup>3</sup> regulado por cada hm<sup>3</sup> de capacidad de embalse construido) es, empleado el concepto de regulación útil para usos consuntivos, de 0,52. BATLLE (1993) estima su valor, incluyendo los usos hidroeléctricos, en 0,60.

La distribución de este parámetro es la siguiente: 0,58 en las subcuencas reguladas por embalses sin acuíferos aguas arriba, 0,87 en las subcuencas reguladas por embalses con aportes de acuíferos con escasa o nula explotación y 0,34 en las subcuencas reguladas por embalses con aportes de acuíferos explotados en su cuenca vertiente.

El valor relativamente elevado, en las subcuencas reguladas por embalses con aportes de acuíferos con escasa o nula explotación, es debido a la "regularidad" de la escorrentía superficial de origen subterráneo. La naturaleza estocástica de la escorrentía estrictamente superficial, en contraposición a la escorrentía superficial de origen subterráneo, precisa, normalmente, de una mayor capacidad de embalse para asegurar con una determinada garantía un cierto suministro.

Esto no quiere decir que se tenga que reservar obligatoriamente toda la escorrentía superficial de origen subterráneo para mejorar el rendimiento teórico de la regulación superficial, sino que en cada caso concreto, tras la realización de los estudios pertinentes, se decidirá la idoneidad de explotarla a través de uno u otro sistema de regulación: superficial o subterráneo.

En lo referente al rendimiento de la regulación superficial en las subcuencas reguladas por embalses con aportes de acuíferos explotados en su cuenca vertiente, es preciso indicar que la inclusión de los grandes embalses hidroeléctricos que también presentan otro tipo de aprovechamiento de mucha menor cuantía, especialmente en las cuencas del Duero y Tajo, es el responsable, al referir la regulación para usos consuntivos a la capacidad total de embalse, de un valor ficticio, relativamente bajo, que sería en realidad notablemente mayor. No obstante, las ligeras deficiencias cometidas en el cálculo del rendimiento de la regulación superficial en alguno de los subapartados incluidos en el Cuadro-III, no es óbice para que, a nivel global, el rendimiento de la

regulación superficial, como pone de manifiesto BATLLE (1993), sea cada vez menor, y precise, con urgencia, de una explotación coordinada con las técnicas de regulación de tipo subterráneo.

La aportación hídrica total, en las zonas situadas aguas abajo de la actual regulación superficial, es del orden de 30.000 hm<sup>3</sup>/a; regulándose únicamente unos 3.000 hm<sup>3</sup>/a mediante técnicas de explotación subterránea. Es decir, sólo un 10% de la aportación hídrica total en esa zona, o un 37% si la referencia es exclusivamente sobre la componente subterránea. En la práctica, parte de estos recursos sólo son regulables a través de técnicas subterráneas, o mediante actuaciones basadas tanto en recarga inducida a través del lecho de los ríos como en recarga artificial en su concepción más clásica.

La aportación hídrica total en las subcuencas reguladas por embalses con aportes de acuíferos con escasa o nula explotación es del orden de 22.000 hm<sup>3</sup>/a, de esta cuantía, el 50% se regula mediante técnicas superficiales. Ahora bien, no todo el volumen de

agua regulado en estos embalses se asocia a escorrentía estrictamente superficial, sino que también se regula, mediante técnicas superficiales, una fracción más o menos significativa de los aproximadamente 4.000 hm<sup>3</sup>/a de la aportación subterránea de estas subcuencas. Concretamente 777 hm<sup>3</sup>/a (Cuadro-IV), que podrían elevarse a 1023 hm<sup>3</sup>/a si se considerara, en la cuenca del Júcar, el río Cabriel hasta el embalse de Contreras (3 hm<sup>3</sup>/a de bombeos) y el río Mijares hasta el embalse de Arenas (2 hm<sup>3</sup>/a de bombeos) como pertenecientes a la subdivisión del Cuadro-III "Subcuencas reguladas por embalses con aportes de acuíferos con escasa o nula explotación", e incluso a 1315 hm<sup>3</sup>/a si, en la subdivisión anteriormente mencionada, se incluyera también la subcuenca del río Turia hasta el embalse de Loriguilla (10 hm<sup>3</sup>/a de bombeos) y la del Júcar hasta el embalse de Alarcón (10 hm<sup>3</sup>/a de bombeos).

Tal vez sería oportuno que algunas obras hidráulicas existentes o programadas en las subcuencas, que reciben aportes de acuífero no explotados, se destinen, en lo posible, a regular mayor porcentaje de la escorrentía

CUADRO IV

USOS ASOCIADOS A EMBALSES DE LA COMPONENTE SUBTERRANEA (hm<sup>3</sup>/a)

CUENCA HIDROGRAFICA	Subcuencas reguladas por embalses con aportes de acuíferos con escasa o nula explotación.	Subcuencas reguladas por embalses con aportes de acuíferos explotados en su cuenca vertiente.	TOTAL
NORTE II y III	0	0	0
DUERO	0	0	0
TAJO	223	0	223
GUADIANA I y II	0	0	0
GUADALQUIVR	10	867	877
GUADALETE-BARBATE	0	0	0
SUR	9	142	151
SEGURA	286	32	297
JUCAR	0	967	967
EBRO	260	0	260
C. INTERNAS CATALUÑA	10	0	10
<b>TOTAL</b>	<b>777</b>	<b>2008</b>	<b>2785</b>

estrictamente superficial; esto daría lugar a unas pérdidas al mar menores de la componente estrictamente superficial. La fracción de escorrentía superficial de origen subterráneo, que se dejaría de almacenar en estas obras de superficie, se podría regular mediante el empleo de técnicas de explotación subterráneas en un esquema de planificación de uso conjunto.

- La aportación hídrica total en las subcuencas reguladas por embalses que reciben aportes de acuíferos explotados es del orden de 30.000 hm<sup>3</sup>/a; regulándose unos 12.000 hm<sup>3</sup>/a a través de técnicas de explotación de tipo superficial (9.200 hm<sup>3</sup>/a) y subterránea (2.800 hm<sup>3</sup>/a).

El grado de interferencia entre aguas superficiales y subterráneas sobre la regulación superficial, en el supuesto de que esta pudiera regular toda la aportación hídrica, es del 12%. Esta interferencia teórica, deducida en base a cifras globales, es notablemente mayor que la real, ya que, por supuesto, la infraestructura hidráulica superficial precisaría de una capacidad prácticamente infinita para poder actuar sobre toda la aportación hídrica.

Esta interferencia real, estimada a partir de un análisis individual para cada río, únicamente se detecta, en una cuantía que precisa estudios con un cierto carácter de urgencia, en las subcuencas que a continuación se relacionan:

- Genil hasta el sistema de embalses de Iznajar-Cordobilla (cuenca del Guadalquivir).
- Guadalhorce hasta el sistema de embalses de Guadalhorce-Guadalteba (cuenca Sur).
- Guadalfeo hasta el embalse de Beznar (cuenca Sur).
- Guadalentín y Mula hasta los embalses respectivamente de Puentes y La Cierva (cuenca del Segura).
- Júcar desde el embalse de Alarcón hasta el embalse de Tous (cuenca del Júcar).

- Alto Guadiana hasta el embalse del Vicario (cuenca del Guadiana).

El Cuadro-V, que muestra la aportación total y el volumen medio regulado en las subcuencas anteriormente mencionadas, permite apreciar que la zona con una mayor problemática es la definida por el río Júcar entre el embalse de Alarcón y el de Tous.

CUADRO V

SUBCUENCA	APORTACION HÍDRICA TOTAL (hm <sup>3</sup> /a)	VOLUMEN MEDIO REGULADO		TOTAL (hm <sup>3</sup> /a)
		TÉCNICAS SUPERFICIALES (embalses) (hm <sup>3</sup> /a)	TÉCNICAS SUBTERRÁNEAS y aprovechamiento de manantiales	
Genil hasta E. Iznajar-Cordobilla	775	961	95,5	776,5
Guadalhorce hasta E. Guadalhorce-Guadalteba	214	176	51,5	226,5
Guadalfeo hasta E. Beznar	69	65	25	89
Alto Guadiana hasta E. Vicario	791	117	736	852
Guadalentín y Mula hasta E. de Puentes y E. de la Cierva	42	18	31	49
Júcar desde E. de Alarcón hasta E. de Tous	673	610	300	810

Dada la complejidad de las subcuencas indicadas en el Cuadro-V, y el elevado número de embalses y unidades hidrogeológicas relacionados entre sí, la solución más fácil (disminuir el volumen de agua bombeada) no tiene porque ser siempre la más adecuada y, por consiguiente, es necesario determinar, para cada caso concreto, el mayor o menor grado de interferencia entre los distintos intereses implicados y las diferentes alternativas que se pueden plantear.

- Por último, únicamente indicar que algo más de 2.000 hm<sup>3</sup>/a se encuentran asociados a subcuencas impermeables no reguladas por embalses. Asimismo, en las subcuencas reguladas por embalses sin acuíferos aguas arriba existen unos 6.000 hm<sup>3</sup>/a que, teóricamente, podrían explotarse, "in situ" a través exclusivamente de técnicas superficiales, o en las subcuencas situadas aguas abajo. En este último caso, dependiendo de la existencia o no existencia de acuíferos, la regulación se podría realizar con técnicas de tipo superficial y subterráneas mediante la aplicación, para estos excedentes, de recarga artificial.

### 3.1. Zonas situadas aguas arriba de la regulación superficial

En general pueden presentarse las siguientes situaciones:

#### 3.1.1. Subcuencas reguladas por embalses que no presentan acuíferos aguas arriba

Estas obras constituyen, al encontrarse todo el agua en forma de escorrentía estrictamente superficial, el medio de regulación más idóneo. No obstante, si la capacidad de embalse superficial no fuera suficiente para regular la aportación hídrica total, y no estuviera esta comprometida, para otros usos, podría utilizarse, si existieran acuíferos aguas abajo, la capacidad de embalse y el hidrodinamismo de estos para regular los excedentes, incluso en el supuesto de que el acuífero no esté ligado al río.

En el Cuadro-V se muestra la distribución de la aportación hídrica y de la regulación superficial y subterránea en las subcuencas reguladas por embalses que no presentan acuíferos aguas arriba. La regulación media en las mismas representa aproximadamente el 33% de la aportación media de estas subcuencas. Esta consideración confirma la existencia de un importante volumen de agua excedentario que podría utilizarse en los acuíferos situados aguas abajo. Ahora bien, en estas subcuencas, el PHN prevé un aumento significativo de la capacidad de embalse que incrementará el rendimiento de la regulación superficial. No obstante, los recursos no regulados seguirán siendo relativamente elevados, lo que permitirá planificar actuaciones, en las que podrá jugar un papel muy importante la recarga artificial, en unidades hidrogeológicas tales como: Ayamonte-Huelva en el Guadiana; Bailén-Guarroman, Rumber, Sevilla-Carmona, Nieblas-Posada y Aluvial en la cuenca del Guadalquivir; Aluvial del río Barbate en Guadalete-Barbate; y Esla-Valderaduey en el Duero.

El que cuencas como Tajo y Ebro presenten, Cuadro VI, una aportación hídrica y volumen regulado nulo se debe, en el Tajo, a la imposibilidad de obtener datos a nivel de embalse que

obligaron a operar a escala de sistemas de explotación, incluyendo, incluso, obras de carácter no consuntivo. Y en el Ebro, al carácter no consuntivo del uso al que se destinan la mayor parte de las obras hidráulicas construidas sobre los afluentes de la vertiente pirineica del Ebro, antes de atravesar los mismos las estructuras de litología calizo-dolomítica.

CUADRO VI

DISTRIBUCION DE LA APORTACION HIDRICA Y DE LA REGULACION SUPERFICIAL Y SUBTERRANEA (hm<sup>3</sup>/a) EN SUBCUENCAS REGULADAS POR EMBALSES QUE NO PRESENTAN ACUIFEROS AGUAS ARRIBA

CUENCA	APORTACION HIDRICA			EMBALSES		BOMBEO
	Superficial	Subterránea	Total	Capacidad (hm <sup>3</sup> )	Volumen Medio Regulado	
NORTE II y III	4270		4270	565,5	144,5	
DUERO	2670		2670	2221	1975	
TAJO	0		0	0	0	
GUADIANA I	0		0	0	0	
GUADIANA II	922		922	539	278	
GUADALQUIVIR	1031		1031	1614	528	
GUADALETE-BARBATE	271		271	279	111	
SUR	0		0	0	0	
SEGURA	12		12	26	7	
JUCAR	0		0	0	0	
EBRO	0		0	0	0	
CUENCAS INTERNAS DE CATALUÑA	9		9	3	4	
<b>TOTAL</b>	<b>9185</b>		<b>9185</b>	<b>8247,5</b>	<b>3047,5</b>	

Por ello, en la cuenca del Tajo, es posible plantear el aprovechamiento de una parte de los recursos hídricos no regulados de las Sierras de Guadarrama, Somosierra y Ayllón en conjunción con las unidades hidrogeológicas de Torrelaguna-Jadraque, Guadalajara y Madrid-Talavera.

En la cuenca del Ebro, también es factible proponer un esquema de gestión cuya finalidad sea regular parte de los excedentes hídricos pirineicos, asociados a terrenos impermeables, en coordinación con las unidades hidrogeológicas definidas por DGOH-ITGE en la zona del pirineo y prepirineo. Esto podría contribuir a resolver, en mayor o menor cuantía, problemas tan importantes como los abastecimientos de Zaragoza y Barcelona, y la potenciación de los regadíos de la margen izquierda del Ebro.

### 3.1.2. Subcuencas reguladas por embalses que reciben aportes de acuíferos no explotados

En el Cuadro-VII que resume el estado actual de la regulación de estas subcuencas se puede establecer la siguiente división:

CUADRO VII

DISTRIBUCION DE LA APORTACION HIDRICA Y DE LA REGULACION SUPERFICIAL Y SUBTERRANEA (hm<sup>3</sup>/a) EN SUBCUENCAS REGULADAS POR EMBALSES QUE RECIBEN APORTES DE ACUIFEROS CON ESCASA O NULA EXPLOTACION

CUENCA	APORTACION HIDRICA			EMBALSES		BOMBEO
	Superficial	Subterránea	Total	Capacidad (hm <sup>3</sup> )	Volumen Medio Regulado	
NORTE II y III	1731,5	304,5	2036	100	78	2
DUERO	1283	339	1622	244,5	219	18,5
TAJO	4036	734	4770	2942	3176	0
GUADIANA I	0	0	0	0	0	0
GUADIANA II	0	0	0	0	0	0
GUADALQUIVIR	711	88	799	1306	494	1
GUADALETE-BARBATE	569	60	629	1539	503	0
SUR	121	17	138	153	130	1
SEGURA	178	282	460	659	430	4
JUCAR	77	123	200	71	27	2
EBRO	8546	1559	10105	4625	5038,5	43
C. INTERNAS DE CATALUÑA	775	348	1123	622	638	3
<b>TOTAL</b>	<b>18027,5</b>	<b>3854,5</b>	<b>21882</b>	<b>12281,5</b>	<b>10733,5</b>	<b>74,5</b>

#### Cuencas con capacidad de regulación superficial total

En ellas toda la aportación está regulada superficialmente, y cualquier aprovechamiento subterráneo detrae teóricamente agua a la regulación superficial. Por consiguiente, únicamente es posible considerar una explotación del agua subterránea de carácter local o "puntual", cuya repercusión sea eminentemente social: abastecimiento urbano, aprovechamiento agrícola de pequeñas huertas y granjas, y usos ecológicos.

Responden a este esquema las siguientes subcuencas:

- río Palmones y Guadarranque hasta E. de Charco Redondo y E. Guadarranque en la cuenca Sur.

- río Segura hasta E. de Cenajo en la cuenca del Segura.

- río Zadorra hasta E. de Ullivarri, río Piedra hasta E. de la Tranquera y río Matarraña hasta E. de Pena en la cuenca del Ebro.

- río Cardoner hasta el E. de St. Pons en las cuencas Internas de Cataluña.

#### Cuencas con capacidad de regulación superficial parcial

En ellas la capacidad de regulación de los embalses superficiales es inferior a los aportes totales y por tanto, admiten una regulación complementaria a partir de:

- extracciones por bombeo, para un aprovechamiento "in situ", en las unidades hidrogeológicas.

- establecimiento de esquemas de uso conjunto, complementados con recarga artificial, para mejorar el grado de regulación de la infraestructura hidrológica (incluye elementos de regulación superficial y subterránea) situados aguas abajo.

Responden a este esquema un total de 42 subcuencas: cuatro en las cuencas Internas de Cataluña, trece en el Ebro, cuatro en el Júcar, una en el Segura, una en el Guadalete-Barbate, seis en el Guadalquivir, dos en el Tajo, siete en el Duero y cuatro en la Norte.

De la cuantía anteriormente mencionada es preciso destacar por su importancia las siguientes: Río Ter hasta Embalse del Pasteral, Río Llobregat hasta Embalse de la Baells, Río Aragón y Arga hasta Embalse de Yesa, Río Segre hasta Embalse de Balaguer y Río Gallo y Tajo hasta Aranjuez.

### 3.1.3. Subcuencas con embalses que reciben aportes de acuíferos explotados

En principio la interferencia puede considerarse perjudicial; no obstante, esto no es del todo

correcto, ya que esta dependerá del balance existente entre diferentes variables: aportación hídrica total, capacidad de embalse, volumen regulado, demanda satisfecha, localización de demandas, volumen de agua subterránea explotado, etc. El análisis de todos estos condicionantes puede dar lugar a diferentes situaciones.

- el sistema hidráulico superficial es por sí solo capaz de regular toda la aportación hídrica, y satisfacer todas las demandas con una garantía muy alta. Por consiguiente, cualquier explotación de agua subterránea da lugar a interferencia.
- el sistema hidráulico superficial no es capaz de regular toda la aportación hídrica, o bien la garantía es baja. En este caso, la explotación del agua subterránea, si se realiza adecuadamente, será positiva.

El Cuadro-VIII muestra la distribución de la aportación hídrica y la regulación superficial y subterránea en subcuencas reguladas por embalses que reciben aportes de acuíferos explotados en su cuenca vertiente. Se estima que el número de subcuencas implicadas asciende a 42, el de uni-

CUADRO VIII

DISTRIBUCION DE LA APORTACION HIDRICA Y DE LA REGULACION SUPERFICIAL Y SUBTERRANEA (hm<sup>3</sup>/a) EN SUBCUENCAS REGULADAS POR EMBALSES QUE RECIBEN APORTES DE ACUIFEROS EXPLOTADOS EN SU CUENCA VERTIENTE

CUENCA	APORTACION HIDRICA			EMBALSES		BOMBEO y aprovechamiento de manantiales
	Superficial	Subterránea	Total	Capacidad (hm <sup>3</sup> )	Volumen Medio Regulado	
NORTE II y III	252	75,5	327,5	13	6	16
DUERO	8018	1469	9487	4537	556	771
TAJO	6827	918	7745	8083	3103	164
GUADIANA I	4389	829	5218	4330	1899	616
GUADIANA II	0	0	0	0	0	0
GUADALQUIVIR	527	1186	1713	3730	1394	136
GUADALETE- BARBATE	0	0	0	0	0	0
SUR	367	313,5	680,5	944	459,5	171,5
SEGURA	120	184	304	135	146	117
JUCAR	988	1567	2555	2977	1610	497
EBRO	722	507	1229	1787	27	41,5
C. INTERNAS DE CATALUÑA	9	2	11	6	4	3
TOTAL	22219	7061	29270	26642	9203,5	2733

dades hidrogeológicas a 121 y el de embalses de una cierta importancia a 142.

Evidentemente, estas cifras son lo suficientemente significativas para justificar la urgente necesidad de emprender estudios de detalle, en todas aquellas subcuencas que presentan embalses que reciben aportes de acuíferos explotados, que determinen el mayor o menor grado de interferencia entre los intereses implicados en las diferentes alternativas, tanto desde un punto de vista social como económico e incluso de decisión política.

### 3.2. Zonas situadas aguas abajo de la regulación superficial

Agua abajo de los límites marcados por la actual regulación superficial, prácticamente, la única posibilidad de regulación que existe es la subterránea. En esta zona se ubican precisamente grandes embalses subterráneos (Cuadro-IX) cuya explotación, si se realiza adecuadamente, se estima podría duplicar las disponibilidades actuales de agua subterránea en esta zona.

CUADRO IX

DISTRIBUCION DE LA APORTACION HIDRICA Y DE LA REGULACION SUPERFICIAL Y SUBTERRANEA (hm<sup>3</sup>/a) EN SUBCUENCAS SITUADAS AGUAS ABAJO DE LA REGULACION SUPERFICIAL

CUENCA	APORTACION HIDRICA			EMBALSES		BOMBEO
	Superficial	Subterránea	Total	Capacidad (hm <sup>3</sup> )	Volumen Medio Regulado	
NORTE II y III	8028	2124	10150	5,5	1,5	112
DUERO	0	0	0	0	0	0
TAJO	0	0	0	0	0	0
GUADIANA I	0	0	0	0	0	0
GUADIANA II	346	84	429	0	0	75
GUADALQUIVIR	2315	1312	3627	120	36	291
GUADALETE- BARBATE	0	203	203	0	0	79
SUR	1389	972,5	2361,5	0	0	580,5
SEGURA	57	167	224	0	0	365
JUCAR	295	1255	1550	0	0	998
EBRO	7452	1714	9166	6	10	264,5
C. INTERNAS DE CATALUÑA	1365	618	1973	2	0,5	443
TOTAL	21214	8448,5	29662,5	133,5	50(*)	3178

(\*) Este remanente es debido a la imposibilidad, en algunas subcuencas, de poder descomponer la aportación entre aguas arriba y abajo de algún embalse.

Evidentemente, esto exigirá la puesta en funcionamiento de un importante dispositivo de recarga artificial que aproveche al máximo parte de los actuales excedentes superficiales que se vierten al mar.

Las subcuencas donde se puede incrementar la regulación, de una forma inmediata, mediante la utilización de técnicas de explotación subterráneas se circunscriben a todos los ríos de la cuenca Norte; a la práctica totalidad de los afluentes del Ebro; al Palmones, Guadiaro, Piedra, Verde, Guadalhorce y Guadalfeo en la cuenca Sur; al Rumber, Guadiana Menor, Guadalmena, Guadalen, Guarrizas, Genil y Corbones en el Guadalquivir; al Palancia, Turia, Serpis, Gorgos y ramblas comprendidas entre el Cenia y Mijares en el Júcar; y al Fluviá, Muga y Ter en las cuencas Internas de Cataluña.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren expresar su agradecimiento, por el asesoramiento prestado en la elaboración de las cifras que figuran en los diferentes cuadros que se muestran en el presente trabajo, a los siguientes compañeros de la Dirección de Aguas Subterráneas del Instituto Tecnológico Geominero de España: Armando Ballester, José María Pernía, Miguel del Pozo, Miguel Martín Machuca, Angel González Asensio, Francisco Arquer, Celestino García de la Noceda, Juan Carlos Rubio, Ramón Aragón, Vicente Fabregat, Antonio Fernández Uría, Antonio Azcón, Carlos Mediavilla, Víctor del Barrio, Luis Moreno, Bruno Ballesteros, Antonio González, Juan Antonio Luque, Marc Martínez Parra, José Ramón Cobos, Enrique Aroca, Pedro Delgado, José María Ruiz, Elena Galindo, Olga Villegas y José Antonio de la Orden.

### REFERENCIAS

ALBACETE CARREIRA, M. (1995): *El papel del agua subterránea en los regadíos españoles: aspectos legales, de planificación y económicos. Las Aguas Subterráneas en la Ley de Aguas Española: Un Decenio de Experiencia*. Murcia.

*Anteproyecto del Plan Hidrológico Nacional* (1992).

BARBA ROMERO, J.; BATLLE GARGALLO, A.; LOPEZ ARECHAVALA, G.; LOPEZ GETA, J. A.; LOPEZ VILCHEZ, L.; 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.

BATLLE GARGALLO, A. (1988): *"Gestión de los Acuíferos Costeros en España"*. TIAC'88, Tecnología de la Intrusión en Acuíferos Costeros. Almuñecar (Granada).

BATLLE GARGALLO, A. (1993): *"El papel de los embalses superficiales en la regulación de los recursos hidráulicos"*. Las Aguas Subterráneas. Importancia y Perspectiva. Instituto Tecnológico Geominero de España y Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

CUSTODIO, E. (Feb. 1986): *"Recarga Artificial de Acuíferos"*. Boletín de Informaciones y Estudios. MOPU, S.G. nº 45. Febrero, 1986.

FERRET PUJOL, J. (1995): *Aspectos generales y experiencias en la gestión de acuíferos a través de comunidades de usuarios de aguas subterráneas. Las Aguas Subterráneas en la Ley de Aguas Española: Un Decenio de Experiencia*. Murcia.

ITGE (diversos años): PIAS. *"Plan de Investigación de Aguas Subterráneas"*.

ITGE (1985): *Proyecto de Investigación Hidrogeológica del Cuaternario del río Glera*. Documento Interno.

ITGE (1986): *Estudio de los Recursos Hídricos Subterráneos del Sistema Hidrogeológico 74.Camp de Tarragona*. Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid.

ITGE (1989): *"Las Aguas Subterráneas en España. Estudio de Síntesis"*.

ITGE (1991): *Estudio de los aspectos económicos y de la gestión de la recarga artificial en el acuífero cuaternario del río Oja*. La Rioja. Documento interno.

LOPEZ GETA, J. A.; MURILLO DIAZ, J. M. (1993): *"Recarga de acuíferos y reutilización de recursos hídricos"*. Las Aguas Subterráneas. Importancia y Perspectiva. Instituto Tecnológico Geominero de España y Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

LOPEZ GETA, J. A.; MURILLO DIAZ, J. M. (1994): *"Mejora de la Regulación Hídrica mediante la Integración de los Acuíferos en los Sistemas de Explotación"*. Congreso Internacional de Minería y Metalurgia. León.

LOPEZ GETA, J. A.; RUBIO CAMPOS, J. C. et al (en prensa): *Recarga Artificial del Acuífero de Guadix* (Granada).

MURILLO DIAZ, J. M. Y MARTINEZ PARRA, M. (1994): *Caracterización de la intrusión marina en el delta del Tordera. Propuesta de un esquema de gestión fundamentado en el uso conjunto. Análisis y Evolución de la contaminación de las Aguas Subterráneas*. Alcalá de Henares.

MURILLO DIAZ, J. M. (1994): *Unicidad del recurso hídrico y dicotomía de sus posibilidades técnicas de explotación*. Congreso Nacional del Agua y Medio Ambiente. Zaragoza.

SAHUQUILLO HERRAIZ, A. (1985): *"Criterios Actuales para la Gestión Conjunta de Aguas Superficiales y Subterráneas"*. Revista de Obras Públicas. Año CXXXII. Núm. 3235.

SAHUQUILLO HERRAIZ, A. (1993): *"Papel de los acuíferos en la regulación de los recursos hidráulicos"*. Las Aguas

Subterráneas. Importancia y Perspectiva. Instituto Tecnológico Geominero de España y Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

SANCHEZ GONZALEZ, A. (1995): *Las aguas subterráneas en la planificación y gestión de los recursos de agua españoles: uso conjunto y combinado con las otras fuentes de agua. Estado actual y perspectivas. Las Aguas Subterráneas en la Ley de Aguas Española: Un decenio de Experiencia*. Murcia.

Original recibido: Diciembre de 1995.  
Original aceptado: Enero de 1996.

## Direcciones de drenaje en la vertiente sur de Sierra Almirajara (Málaga). Influencia de la fracturación.

Por C. ALMECIJA (\*), J. BENAVENTE (\*) y C. SANZ DE GALDEANO (\*\*).

### R E S U M E N

A partir de la red de drenaje de la vertiente sur de Sierra Almirajara (Málaga), acupada mayoritariamente por materiales carbonatados del Complejo Alpujárride (Cordilleras Béticas), se ha obtenido la distribución de la orientación de los cauces de menor longitud (algo más de 2000 segmentos; órdenes 1 a 3, criterio de Strahler). Esta distribución se ha comparado con la de la orientación de más de 3000 diaclasas, parte de las cuales se han medido en una importante cavidad accesible (Cueva de Nerja). Las fracturas medidas se agrupan en tres familias: (a) NO-SE a NNO-SSE, (b) E-O a ONO-ESE y (c) NE-SO a NNE-SSO. Las familias (a) y (c) son las que aparecen karstificadas con más frecuencia. En la distribución de la orientación de los cauces predomina la familia (b). No se aprecia una buena correspondencia entre la distribución de la orientación de fracturas y cauces. Esto se explica por efecto del importante encajamiento fluvial que existe en el área, debido a la reciente elevación del macizo y a la existencia de niveles menos resistentes en la formación carbonatada que han sido aprovechados preferentemente en el desarrollo de los cursos de menor longitud.

*Palabras clave:* Análisis de redes de drenaje, direcciones de fracturación, carbonatos alpujárrides, Cordilleras Béticas.

### A B S T R A C T

The orientation of more than 2000 stream segments (orders 1 to 3, Strahler method) belonging to the drainage system of the Sierra Almirajara southern slope (Málaga, Spain) has been measured. The main outcrops in the study area are carbonates of the Alpujárride Complex (Betic Cordillera). The obtained distribution has been compared with the results of more than 3000 measures of fracture directions, part of which have been recorded inside an important cavity (the Nerja Cave). The analysed fractures can be grouped in three families: (a) NW-SE to NNW-SSE, (b) E-W to WNW-ESE and (c) NE-SW to NNE-SSW. The (a) and (c) families show more frequent karstification evidences. The (b) family is more abundant in the stream distribution. The lack of a good agreement between these distributions (fracture and stream orientations) can be explained by the combined effect of the recent uprising of the mountainous massif together with the existence of less-resistant layers in the carbonate formation which have been taken preferently for the development of the small length stream drainage pattern.

*Key words:* Drainage pattern analysis, fracture directions, alpujárride carbonates, Betic Cordillera.

### 1. INTRODUCCION

El análisis estadístico de la fracturación a partir de fotos aéreas es una técnica que se aplica frecuentemente en hidrogeología para ilustrar sobre las direcciones preferenciales de flujo en materiales permeables por fisuración. En acuíferos Kársticos, además, permite identificar el

control estructural sobre determinadas formas de disolución superficial y sobre redes espeleológicas (BENAVENTE y SANZ DE GALDEANO, 1990).

En un estudio anterior (BENAVENTE y SANZ DE GALDEANO, 1985) se interpretan los resultados de una serie de trabajos de este tipo en un amplio sector de la Cordillera Bética y se propone un modelo general que intenta explicar la génesis de las principales familias de fracturas karstificadas y su relación con las correspon-

(\*) Instituto del Agua de la Universidad de Granada.  
C/ Rector López Argüeta s/n. 18071 Granada.

(\*\*) Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra, CSIC-Univ. de Granada. Fac. Ciencias. 18071 Granada.

dientes situaciones de esfuerzos. Entre los trabajos posteriores a dicho estudio pueden destacarse los de ALCALDE y PULIDO (1991) y, sobre todo, LOPEZ-CHICANO y PULIDO (1993), en los cuales se corroboran los rasgos generales del citado modelo.

Dentro del Complejo Alpujárride (Cordilleras Béticas), en sectores en que coexisten afloramientos carbonatados y metapelíticos, se ha comprobado que las direcciones de fracturación obtenidas por fotointerpretación en ambos materiales son equivalentes y que la red hidrográfica se encuentra, en gran medida, controlada por la fracturación (SANZ DE GALDEANO et al., 1985; ALCALDE y PULIDO, 1991). En algunos macizos carbonatados alpujárrides, sin embargo, las condiciones de afloramiento no facilitan la identificación directa de trazas de fracturas en foto aérea. El análisis estadístico de la orientación de los cauces superficiales, especialmente de los de menor longitud, ha dado buenos resultados como estimación indirecta de las direcciones predominantes de fracturación (DIAZ-HERNANDEZ y FERNANDEZ-RUBIO, 1978).

En el presente trabajo se aplica dicha aproximación metodológica a la vertiente meridional del macizo montañoso de Sierra Almijara, situado en el extremo oriental de la provincia de Málaga. En este área se dispone, además, de numerosas medidas de fracturación sobre el terreno, tanto en superficie como en profundidad. Para esto último se ha aprovechado la existencia de una importante cavidad accesible: la cueva de Nerja (fig. 1). Estas medidas contribuyen a la interpretación de los resultados.

## 2. CARACTERISTICAS DEL AREA ESTUDIADA. ANTECEDENTES.

La vertiente estudiada ocupa una extensión de unos 120 Km<sup>2</sup> y está drenada por cinco pequeñas cuencas (fig 1). Sus principales rasgos geológicos se describen en los trabajos de AVIDAD y GARCIA-DUEÑAS (1981), ELORZA y GARCIA-DUEÑAS (1981) y SANZ DE GALDEANO (1986-1989). De acuerdo con este último autor, los materiales que afloran mayoritariamente en el área corresponden a la formación carbonatada

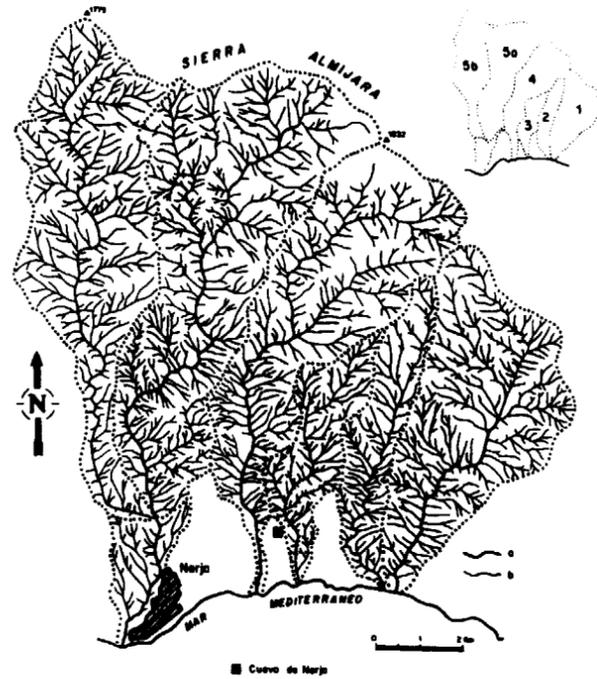


Figura 1. Red de drenaje del área estudiada. Se indican los segmentos fluviales correspondientes a los órdenes (Strahler) 4(b) y 5(a). 1: Cuenca del río de La Miel; 2: Cuenca del arroyo de Los Colmenarejos; 3: Cuenca del arroyo del Campillo; 4: Cuenca del barranco de Maro; 5(a): Cuenca del río Chillar; 5(b): Cuenca del río Higuierón.

del manto de Almijara, de edad Trías medio-superior. Dicha formación comprende un tramo basal de mármoles dolomíticos, localmente muy triturados y con aspecto sacaroideo, de unos 500 m de potencia, y un tramo superior de mármoles calizos con intercalaciones de esquistos y calcosquistos, de unos 100 m de potencia.

La estructura del conjunto de mármoles es bastante complicada. En algunos sectores existen abundantes inversiones y replegamientos, mientras que en otros las estructuras predominantes son casi tabulares. Son predominantes las direcciones de estratos alrededor de N100E y los buzamientos al sur, tanto normales como invertidos. Fallas de desgarre y normales afectan al conjunto. Así, el borde meridional de los mármoles está jalonado por importantes fracturas de dirección NO-SE a ONO-ESE, con importantes saltos horizontales y también movimientos verticales significativos durante el Plioceno

(SANZ DE GALDEANO, 1993) que han producido la elevación del macizo montañoso y el fuerte encajamiento de la red fluvial debido a la inmediata proximidad del nivel de base (LHENAFF, 1986). Tales fracturas han controlado la evolución sedimentaria de los materiales neógeno-cuaternarios del sector próximo a la franja litoral (GUERRA-MERCHAN y SERRANO, 1993). También se ha reconocido su importancia geomorfológica (RODRIGUEZ-VIDAL y CACERES, 1993), así como en la delimitación de unidades hidrogeológicas (ITGE, 1988; ANDREO y CARRASCO, 1993).

En el trabajo de BENAVENTE Y ALMECIJA (1993) se presenta la red de drenaje del área, jerarquizada según el criterio de Strahler (fig. 1); también se realiza un análisis morfométrico general de las cuencas, así como del número y longitud de los distintos órdenes de cauces. En dicho trabajo ya se advirtió, entre otros rasgos, el marcado control estructural de algunos segmentos de cauce, sobre todo en los de órdenes superiores. El trazado general de los cauces principales no es perpendicular a la línea de costa sino a la dirección de las fracturas principales antes citadas (RODRIGUEZ-VIDAL y CACERES, 1993). BUENO-JIMENEZ (1990) apunta otras posibles influencias neotectónicas en la red de drenaje, ejemplos de las cuales son las inflexiones finales del arroyo Colmenarejos y del río Higuierón.

## 3. METODOLOGIA

A partir de la red de drenaje antes citada, se han considerado los cauces de los tres órdenes inferiores, previa linearización de los mismos. Su orientación se ha analizado de forma manual, utilizando una plantilla con intervalos angulares de 15°. En total han resultado algo más de 2000 lineamientos, de los que aproximadamente 1600 corresponden a los cauces de orden 1. La citada cifra total supera ligeramente al número real de cauces, debido a que el trazado sinuoso de algunos de los segmentos fluviales de mayor longitud aconsejó su discretización en dos o más lineamientos.

En la tabla 1 se presentan las distribuciones de

orientación de los cauces de primer orden, tanto por cuencas individuales como para el conjunto de ellas. También se incluyen las distribuciones obtenidas para el total de cauces de orden 2 y 3. En lo relativo al conjunto de cauces analizados se ha obtenido una distribución general de orientación (DGO) que tiene en cuenta, para cada intervalo angular, la longitud acumulada de cauces y no su número total. Para ello, se han ponderado las frecuencias obtenidas en cada uno de los tres órdenes por su correspondiente longitud media (tabla 1).

INTERVALOS (°)	ORDEN DE CAUCES									DGO	DIACLASAS			
	1			2			3				Ext.	Interior	total	Inter.
	a.1	a.2	a.3	a.4	a.5a	a.5b	total	total	total					
0-15	8.8	6.7	11.4	6.5	7.8	7.8	7.9	7.4	4.6	5.7	6.5	6.7	3.0	
15-30	7.8	8.2	6.1	8.8	6.7	8.1	7.1	8.7	6.6	6.6	7.3	6.7	17.2	
30-45	6.8	10.4	11.4	8.8	8.0	8.1	7.8	8.1	6.8	7.3	8.9	18.4	14.2	
45-60	4.4	6.7	8.8	7.5	8.0	12.2	8.0	7.4	10.3	8.3	3.0	0.9	3.0	
60-75	6.8	6.0	7.0	12.3	7.8	13.0	8.8	8.4	6.9	7.8	6.4	2.0	5.2	
75-90	6.4	8.2	11.4	8.8	10.5	10.8	9.4	8.8	4.6	8.4	7.4	18.4	12.7	
90-105	8.8	6.0	4.4	6.6	8.4	8.2	8.2	8.8	8.0	8.5	13.0	8.2	3.0	
105-120	8.8	17.8	6.1	8.9	10.9	7.8	10.0	12.8	16.1	14.6	2.6	6.9	4.5	
120-135	11.9	7.8	11.4	10.3	10.1	6.1	9.6	8.1	8.8	8.2	2.8	1.0	0.7	
135-150	10.2	11.2	7.9	8.9	6.7	8.8	8.4	8.8	11.5	10.5	14.2	8.8	16.4	
150-165	10.5	6.0	6.3	8.8	8.8	8.4	8.3	8.1	6.9	7.4	22.1	16.1	16.4	
165-180	8.8	2.2	8.8	4.8	6.3	3.4	5.6	6.7	9.2	7.8	6.7	6.8	3.7	

Tabla 1. Frecuencias relativas (%) de direcciones de cauces y de diaclasas (ver texto para más detalles).

Se dispone de los resultados de algo más de 3000 medidas de direcciones de diaclasas, en su mayoría verticales o casi, agrupadas en intervalos de 10°. De ellas, unas 2300 se han obtenido en distintas estaciones del entorno de la Cueva, y el resto en su interior. Dentro de este último grupo, unas 130 medidas corresponden a grietas observables en el techo de las galerías, asociadas a las cuales suelen aparecer espeleotemas en forma de cortinas, por lo que cabe considerarlas representativas de diaclasas karstificadas.

En la figura 2 se representa la distribución de las medidas exteriores de diaclasas junto con la DGO. Los valores de frecuencias relativas que se presentan en la tabla 1 para las diaclasas -exteriores, interiores (total) y Karstificadas- se han reagrupado en intervalos de 15°, con objeto de facilitar la comparación con los correspondientes valores de orientación de cauces.

#### 4. RESULTADOS

En la distribución de frecuencias de diaclasas exteriores aparecen cuatro máximos relativos (fig. 2). El principal corresponde al intervalo N140-160E. El segundo, más localizado, se centra en la dirección N100E. Los dos restantes son de mucha menor entidad y corresponden a los intervalos N065-085E y N015-030E; de hecho, el primero de ellos llega a desaparecer como tal al reagrupar los datos originales en intervalos de 15°.

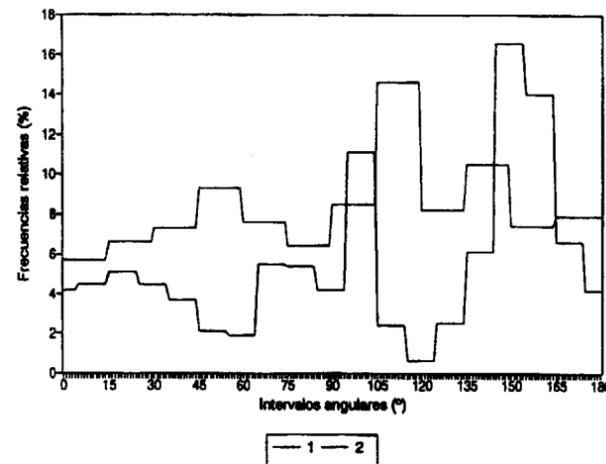


Figura 2. Distribuciones de frecuencias para los cauces (2) y las diaclasas exteriores (1).

Para las diaclasas medidas en el interior de la Cueva se obtiene una distribución bastante semejante. Los dos valores mínimos se localizan en una situación aproximadamente equivalente. Los tres máximos que aparecen aquí son de magnitud similar; dos de ellos coinciden con los principales antes indicados, mientras que el tercero se localiza en el intervalo N030-045E.

Las distribuciones obtenidas para la orientación de los cauces de orden 1 ponen de manifiesto diferencias apreciables entre cuencas, tanto en la magnitud como en la localización de los máximos. En los mínimos sí existe mayor concordancia: en cuatro de las seis cuencas corresponden al intervalo N165-180E.

Si se comparan las distribuciones obtenidas para el conjunto de cuencas en los tres órdenes considerados, se advierte que los intervalos

modales son coincidentes. La diferencia principal estriba en el rango de variación, mayor (12.5%) en los de orden 3 y menor (4.2%) en los de orden 1, de acuerdo con el número de lineamientos analizados. En la DGOC se obtienen, lógicamente, valores intermedios.

#### 5. DISCUSION

Los datos cuantitativos que se presentan en este trabajo deben considerarse sólo como un intento de aproximación. En primer lugar, cabe cuestionarse si las medidas de diaclasas (cuyo número es elevado, aunque se han obtenido en un sector de extensión relativamente limitada) son representativas del conjunto del área en que se han obtenido los datos de las orientaciones de cauces. A este respecto, hay que señalar que la mayoría de las estaciones de medida se localizan en la proximidad de la cueva de Nerja, cerca de la cual existen fallas cuyos últimos movimientos son de tipo normal. En estudios anteriores (BENAVENTE et al., 1980) se ha comprobado que esta circunstancia puede afectar a los resultados de muestreos locales, lo que podría inducir una mayor importancia relativa de las direcciones comprendidas entre NO-SE y ONO-ESE, que son las de las citadas fallas. En segundo lugar, los resultados del análisis efectuado para la orientación de los cauces son tentativos, debido tanto a las imprecisiones inherentes al método de medida como a la amplitud del intervalo utilizado para la asignación de frecuencias, que puede determinar el que los máximos encontrados aparezcan más o menos nítidos (SANZ DE GALDEANO et al., 1985)

Con las salvedades anteriores, se comprueba que los máximos encontrados en la distribución de diaclasas exteriores coinciden con los identificados por LOPEZ-CHICANO y PULIDO (1993) en el macizo de Sierra Gorda, unos 40 Km al NO de este área, y, en general, con los resultados obtenidos en otros enclaves de la Cordillera (BENAVENTE y SANZ DE GALDEANO, 1985).

El máximo menos aparente en los datos de superficie (N015-030E) es, sin embargo, el mejor desarrollado en las diaclasas karstificadas medidas en el interior de la Cueva. La disolución, pues, ha favorecido a los juegos de dirección

NNE-SSO a NE-SO y NO-SE a NNO-SSE respecto a los de dirección aproximada E-O. En ello ha debido influir la relación espacial de dichas direcciones con la estructura tabular del entorno de la Cueva, ligeramente buzante hacia el sur, coincidente con la topografía, que ha favorecido la infiltración en el mismo sentido. Las citadas direcciones son las que condicionan, a grandes rasgos, el trazado de las principales galerías de la Cueva (SANZ DE GALDEANO, 1993).

El que la karstificación se desarrolle preferentemente en las fracturas de dirección más próxima a la N-S en detrimento de las más próximas a las E-O es un hecho constatado a nivel regional, en relación con la situación de las principales direcciones de esfuerzos, aunque pueden existir excepciones interpretables de acuerdo con la mayor proximidad respecto a los grandes accidentes, en especial los de dirección N070-100E (BENAVENTE y SANZ DE GALDEANO, 1985).

ALCALDE y PULIDO (1991), en un estudio realizado unos 40 Km al este del área aquí considerada, aportan argumentos hidrogeológicos adicionales en el sentido de justificar que las fracturas de dirección próxima a la E-O funcionan generalmente como límites impermeables cuando intersectan a otras de diferente orientación. Dichos autores también señalan que, en el área por ellos estudiada, las fracturas de dirección próxima a la N-S controlan: (a) el drenaje de la escorrentía subterránea, (b) el desarrollo del endokarst y (c) la implantación de los cursos fluviales de menor orden. Este último aspecto no se corrobora con los resultados aquí obtenidos, según se comentará más adelante.

En lo relativo a la orientación de los cauces, la comparación de las distribuciones obtenidas en los de orden 1 para cada cuenca sugiere la existencia de diferencias litológicas locales, entre las que pueden señalarse el distinto desarrollo de intercalaciones pelíticas en el tramo superior de mármoles y el grado de brechificación en el tramo basal. Estas diferencias contribuirían también a explicar la escasa concordancia que se aprecia entre la distribución de la orientación de diaclasas y de la DGOC, donde tan sólo el máximo relativo situado alrededor de la dirección N105E parece coincidir en ambos resultados. La

ausencia de semejanza entre ambas distribuciones se ha constatado también por criterios estadísticos (test de Kolmogorov-Smirnov, con nivel de significación del 1%).

El máximo citado en la DGOC coincide aproximadamente con la dirección más frecuente de los estratos en el área estudiada y debe responder al importante encajamiento de la red fluvial a favor de las intercalaciones menos resistentes en el tramo superior de la formación carbonatada. Se trata, en general, de la adaptación de la red de drenaje a un relieve de tendencia monoclinal buzante al sur en capas de diferente resistencia a la erosión en un área que ha experimentado una significativa elevación reciente.

Lo anterior resulta particularmente patente donde las citadas intercalaciones adquieren mayor desarrollo, como sucede, por ejemplo, en el sector de cabecera del río de la Miel. En otros sectores, como en las cabeceras de las cuencas del barranco de Maro y el río Chillar, se aprecia una tendencia al modelado dendrítico, favorecida por la estructura (capas subhorizontales debido a un repliegue sinclinal) que condiciona la mayor homogeneidad litológica local y la ausencia de encajamiento a favor de los mencionados niveles menos resistentes.

Las circunstancias anteriores pueden contribuir a explicar el escaso control de la orientación de los cauces de menor orden por parte de las principales familias de fracturas, a diferencia de lo que se ha comprobado en investigaciones previas (DIAZ-HERNANDEZ y FERNANDEZ-RUBIO, 1978; ALCALDE y PULIDO, 1991).

#### 6. CONCLUSIONES

Las direcciones predominantes de fracturación medidas en la vertiente meridional de Sierra Almiijara (Málaga), ocupada mayoritariamente por mármoles triásicos del Complejo Alpujárride, se agrupan en tres familias: (a) NO-SE a NNO-SSE, (b) E-O a ONO-ESE y (c) NE-SO a NNE-SSO (en orden de importancia). La familia (b) disminuye su entidad si lo que se considera son diaclasas karstificadas (medidas en el interior de la Cueva de Nerja). Estos resultados son congruentes con los obtenidos en otros sectores de la Cordillera.

La orientación más frecuente de los cauces de menor longitud (órdenes 1 a 3; criterio de Strahler) coincide con la dirección de la familia (b) anterior. A falta de aplicar metodologías más rigurosas, los resultados obtenidos no parecen indicar una correspondencia estrecha entre las direcciones de fracturación y la orientación de los cauces, a diferencia de lo que se ha comprobado en algún ejemplo previo dentro del mismo dominio geológico.

La circunstancia anterior se interpreta como consecuencia del importante encajamiento fluvial en la estructura general buzante al sur que existe en el área estudiada, condicionado por la reciente elevación de la región y la inmediata proximidad del nivel de base, junto a la existencia de heterogeneidades litológicas locales más o menos importantes, a favor de las cuales se ha favorecido dicho encajamiento.

#### AGRADECIMIENTOS

Investigación subvencionada por el Patronato de la Cueva de Nerja. La participación de uno de los autores (C. S. de G.) se enmarca, además, en el Proyecto PB91-0079 de la CICYT.

#### REFERENCIAS

- ALCALDE, F. y PULIDO, A. (1991): *Relaciones entre hidrogeología y fracturación en los materiales del manto de Murtas (Alpujarrides orientales)*. Actas III Simp. Agua en Andalucía (ITGE), v. 1: 269-278.
- ANDREO, B. y CARRASCO, F. (1993): *Estudio hidrogeológico del entorno de la Cueva de Nerja*. Trabajos sobre la Cueva de Nerja (F. Carrasco, editor), nº 3: 163-187.
- AVIDAD, J. y GARCIA-DUEÑAS, V. (1981): Hoja 1055 (Motril), MAGNA, ITGE, 36 p.
- BENAVENTE, J.; FERNANDEZ-GUTIERREZ, R.; FERNANDEZ-RUBIO, R. y PULIDO, A. (1980): *Algunas consideraciones metodológicas para el estudio de la fracturación en acuíferos kársticos*. Actas Espeleol. M-1: 19-54. Sabadell.
- BENAVENTE, J. y ALMECIJA, C. (1993): *Estudio geomorfológico del entorno de la Cueva de Nerja* (F. Carrasco, editor), nº 3: 119-158.

BENAVENTE, J. y SANZ DE GALDEANO, C. (1985): *Relación de las direcciones de Karstificación y del termalismo con la fracturación en las Cordilleras Béticas*. Estudios Geológicos, 41: 177-188.

BENAVENTE, J. y SANZ DE GALDEANO, C. (1990): *Condicionantes estructurales del Karst. El Karst en España* (J. J. Durán y J. López-Martínez, editores). Monog. 4 SEG: 65-71.

BUENO-JIMENEZ, M. (1990): *Apuntes geomorfológicos en Sierra Almirajara, Cordilleras Béticas. Propuestas de morfología glaciar*. Actas I. Reun. Nac. de Geomorfología: 159-168. Teruel.

DIAZ-HERNANDEZ, J. L. y FERNANDEZ-RUBIO, R. (1978): *Determinación de la fisuración dominante a partir de los fotogramas aéreos y constatación hidroquímica de la circulación acuífera subterránea a favor de la fracturación principal en un acuífero carbonatado. Cuenca alta del río Darro (Gra-nada)*. Tecniterrae, 25: 34-43.

ELORZA, J. J. y GARCIA-DUEÑAS, V. (1981): Hoja 1054 (Vélez Málaga), MAGNA, ITGE, 59 p.

GUERRA-MERCHAN, A. y SERRANO, F. (1993): *Análisis estratigráfico de los materiales neógeno-cuaternarios de la región de Nerja*. Trabajos sobre la Cueva de Nerja (F. Carrasco, editor), nº 3: 55-90.

ITGE (1988): *Atlas Hidrogeológico de la provincia de Málaga*. Ed. Diput. Prov. Málaga, 151 p.

LHENAFF, R. (1986): *Repartition de massifs karstiques et conditions generales d'évolution*. Karst et Cavités d'Andalousie: Karstologia Mémoires 1: 5-24.

LOPEZ-CHICANO, M. y PULIDO, A. (1993): *The fracturing in the Sierra Gorda Karstic system (Granada). Some Spanish Karstic Aquifers* (A. Pulido, editor; Univ. Granada): 95-116.

RODRIGUEZ-VIDAL, J. y CACERES, L. M. (1993): *Rasgos generales del relieve en el sector suroriental de la Sierra Almirajara (Málaga)*. Geogaceta, 14: 49-51.

SANZ DE GALDEANO, C. (1986): *Structure et stratigraphie du secteur oriental de la Sierra Almirajara (Zone Alpujarride, Cordilleres Bétiques)*. Estudios Geol., 42: 281-289.

SANZ DE GALDEANO, C. (1989): *Estructura de las Sierras Tejeda y Cómpea (Conjunto Alpujarride, Cordilleras Béticas)*. Rev. Soc. Geol. España, 2: 77-84.

SANZ DE GALDEANO, C. (1993): *La fracturación en el entorno de la Cueva de Nerja*. Trabajos sobre la Cueva de Nerja (F. Carrasco, editor), nº 3: 95-114.

SANZ DE GALDEANO, C.; FERNANDEZ-RUBIO, R. y FERNANDEZ-LORCA, S. (1985): *Fracturación y fotointerpretación en el sector de Albuñol-La Rábida (Granada) (Conjunto Alpujarride, Cordilleras Béticas)*. Bol. Geol. Min. T. XCVI-1: 3-9.

Original recibido: Noviembre 1995.  
Original aceptado: Enero 1996.

#### ESTUDIO DE MINERALES Y ROCAS

## Caracterización mineralógica y geoquímica de los rellenos de fracturas del macizo de El Berrocal (Sierra de Gredos) en relación con los procesos de migración/retención de los radionucleidos naturales.

Por M. PELAYO (\*), L. PEREZ DEL VILLAR (\*) y J. S. COZAR (\*)

#### R E S U M E N

Los rellenos de fracturas de El Berrocal han sido estudiados en relación a los procesos de migración/retención de los radionucleidos naturales en un medio granítico fisurado.

La zona de estudio se encuentra situada en el plutón de El Berrocal, en la parte central de la zona Centro Ibérica. Las facies corresponden a un granito de feldespatos alcalinos y dos micas, que presenta un filón de cuarzo mineralizado con sulfuros y rico en uranio.

La asociación mineralógica de los rellenos de fracturas está compuesta de cuarzo, feldespatos-K, albita, moscovita, illita, esmectita, caolinita, carbonatos y, en ocasiones palygorskita y clorita. Los minerales accesorios son muy numerosos, destacan el apatito, pirita, barita, smithsonita y, especialmente, los minerales neoformados de U, como la pitchblende, uranotilo y autunita.

Los análisis químicos indican, que la mayoría de los elementos se encuentran reconcentrados en los rellenos de fracturas con respecto al granito de procedencia, principalmente el U. Este hecho se debe a la existencia de minerales de U<sup>4+</sup> heredados del granito, a los minerales neoformados como la pitchblende y los minerales secundarios de UO<sub>2</sub><sup>2+</sup>, como silicatos y fosfatos de uranio, algunas veces con Th y TR, y por último, al U adsorbido y/o coprecipitado en oxihidróxidos de Fe. El U retenido por adsorción, parece ser cuantitativamente mucho menor que el retenido por precipitación.

**Palabras clave:** Rellenos de fracturas, Radionucleidos, Migración/Retención, Precipitación, Adsorción, Plutón de El Berrocal.

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

The fracture fillings from the El Berrocal Site have been studied in relation to the natural radionuclide migration/retention processes in a fissured granitic environment.

The studied zone is located in the El Berrocal granitic pluton, which is in the central part of the Central Iberian Zone. The dominant facies is an alkali feldspar granite, with two micas, that has an uranium-rich, sulphide-bearing quartz vein.

The principal mineralogical association of the fracture fillings is formed by quartz, K-feldspar, albite, muscovite, illite, smectite, kaolinite, carbonates, and, occasionally, by palygorskite and chlorite. The accessory minerals are numerous, the most important are apatite, pyrite, barite, smithsonite and, specially, new-formed U minerals, like pitchblende, uranotile and autunite.

According to the geochemical analysis, most of the elements are reconcentrated in the fracture fillings with respect to the reference granite, mainly the U. This U reconcentration is due to the U<sup>4+</sup> inherited minerals from the granite, new-formed pitchblende, secondary UO<sub>2</sub><sup>2+</sup> minerals, like uranyl silicates and phosphates, sometimes with Th and REE and to the coprecipitation and/or adsorption of U onto Fe oxyhydroxides. The U retained by adsorption seems to be quantitatively much less than retained by precipitation.

**Key words:** Fracture fillings, radionuclides, Migration/Retention, Precipitation, adsorption, El Berrocal Pluton.

(\*) IMA - Caracterización Hidrogeoquímica de Emplazamientos, CIEMAT, Avda. Complutense, 22, 28040 MADRID

## INTRODUCCION

El estudio de los rellenos de fracturas se ha realizado en el contexto del proyecto denominado "El Berrocal". Es un proyecto internacional de investigación sobre la migración de radionucleidos naturales en un medio granítico fisurado.

La zona de estudio está situada en el plutón granítico de El Berrocal, en la parte central de la Zona Centro-Ibérica (JULIVERT et al., 1972), próximo al contacto entre la Cuenca Terciaria del Tajo y los materiales ígneos y metamórficos de la Sierra de Gredos (Fig. 1) En el se encuentra un filón de cuarzo mineralizado con sulfuros y rico en uranio, en el que se sitúa la mina de El Berrocal (ARRIBAS, 1965), explotada hace 30 años.

La facies principal corresponde a un granito de feldespato alcalino y dos micas, con moscovita dominante. Los minerales accesorios son: corindón, andalucita, zircón, ilmenita, niobita, monacita, xenotima, apatito, uraninita, torita-auerlita, casiterita, oro, bismutinita, cobaltita, molibdenita, arsenopirita, esfalerita, calcopirita, galena y pirita. Los minerales secundarios son fluorita y anatasa. Estas rocas son ricas en  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ , F, Li, Rb, Zn y U, y pobres en CaO, MgO, Ba, Sr y Th. La relación  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  varía entre 0,80 y  $\approx 1$ . La relación K/Rb es baja, similar a las de las pegmatitas, y la razón U/Th que varía entre 2.26 y 25.0 es típica de granitos fértiles en uranio (PEREZ DEL VILLAR and DE LA CRUZ, 1989; PEREZ DEL VILLAR et al., 1990).

Los primeros estudios de rellenos de fracturas en El Berrocal se realizaron en las fracturas superficiales orientadas  $\text{N}100^\circ\text{-}110^\circ\text{E}$ , incluyendo a aquellas rellenas por el filón de cuarzo mineralizado localizadas en la mina de uranio (PEREZ DEL VILLAR et al., 1993b). Estos estudios no fueron suficientes porque sólo abarcaban a una familia de fracturas superficiales, afectadas por procesos supergénicos. Por este motivo, han sido estudiados los rellenos de fracturas en profundidad, a partir de la realización de cinco sondeos.

El estudio de los rellenos de fracturas es importante para el conocimiento de los procesos de

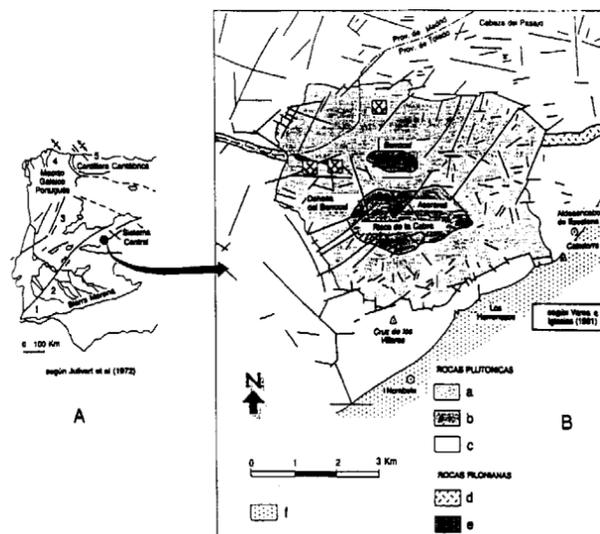


Figura 1. Mapa de situación y esquema geológico del plutón granítico de El Berrocal. A: 1) Zona Surportuguesa. 2) Zona de Ossa-Morena. 3) Zona Centro-Ibérica. 4) Zona Occidental Asturiana. 5) Zona Cantábrica. B: a) Cuarzoganito con dos micas. Facies El Berrocal. b) Leucogranito. c) Granito adamellítico, tipo San Vicente. d) Dique aplítico "Paredes de Escalona-Navamorcuende". e) Filón de cuarzo mineralizado con BPGC y pechblenda, barita y carbonatos (Mina de El Berrocal). f) Materiales terciarios indiferenciados.

migración/retención de los radionucleidos naturales en un medio granítico fisurado, ya que son los materiales más sujetos a transformaciones y, por lo tanto, los más activos. De esta forma, los rellenos de las fracturas hidráulicamente activas han sido estudiados más detalladamente, a fin de analizar los procesos actuales de interacción agua-roca y los procesos de migración de radionucleidos.

El objetivo principal de este trabajo, por lo tanto, se ha centrado en la determinación del papel que tienen los rellenos de fracturas, en los procesos de migración/retención de los radionucleidos naturales y otros elementos análogos, ya sea por precipitación o adsorción.

## MUESTREO Y METODOLOGIA

Las muestras estudiadas proceden de los cinco sondeos realizados (S) 13, 14, 15, 16 y 17. En

total se han recogido 204 muestras, estando así representadas todas las familias de fracturas identificadas en la superficie y en profundidad (UBANELL, 1977a,b; UBANELL, 1981a; UBANELL, 1982 y CAMPOS & MARIN, 1994), así como las zonas de fracturas hidráulicamente activas y no activas (Fig. 2).

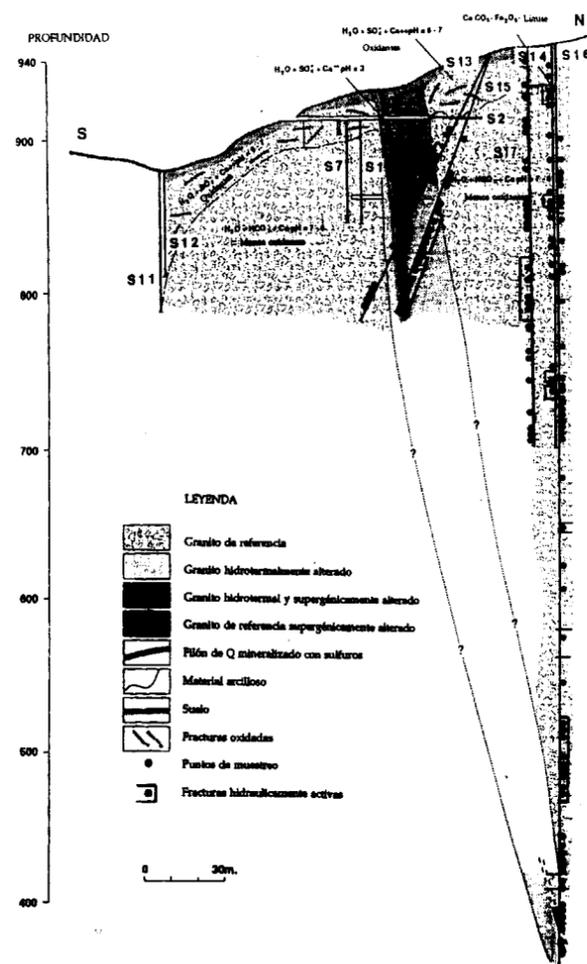


Figura 2. Esquema de la mina de uranio de El Berrocal, localización de los sondeos y puntos muestreados.

Debido a que en las zonas más superficiales la cantidad de material de relleno era escaso, el muestreo se ha efectuado a partir de los 50m, salvo en los sondeos 14 y 17, que se han tomado muestras próximas a la superficie.

Para el estudio de la muestra se ha seguido la

siguiente metodología: después de secar a  $30^\circ\text{C}$  las muestras, fueron molidas y tamizadas a un tamaño de grano inferior a  $60\mu\text{m}$ .

Los minerales esenciales fueron determinados y semicuantificados por difracción de rayos-X (DRX). Los minerales accesorios se han estudiado en fragmentos seleccionados de 70 rellenos de fracturas hidráulicamente activas, mediante un microscopio electrónico de barrido (MEB), y un analizador de energía dispersiva de rayos X (EDX). Para caracterizar los minerales accesorios más interesantes, así como las texturas de estos minerales y de los esenciales, se tomaron fotografías de imágenes electrónicas, con electrones retrodispersados y secundarios.

La identificación y semicuantificación de carbonatos fue realizada mediante DRX y las técnicas de MEB+EDX, análisis térmico diferencial y termogravimétrico (ATD y ATG).

Los minerales de arcilla se determinaron por medio de difractogramas de rayos X en la fracción  $< 2\mu\text{m}$ , realizando agregados orientados (AO) y sus respectivos tratamientos: etilen glicol (EG), dimetil sulfoxido (DS) y calentamiento a  $300^\circ$  y  $550^\circ\text{C}$ .

La caracterización geoquímica se realizó solamente en 20 muestras, dada la escasez de material. Las técnicas analíticas empleadas fueron las siguientes: espectrometría de emisión atómica (ICP-MS) para  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  total,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ , As, Ba, Be, Ce, Co, Cr, Cu, La, Ni, Sn, Sr, W, V, Y, Zn y Zr; fluorescencia de rayos X (FRX) para  $\text{SiO}_2$ , en perlas, y Rb, Th y U, en muestra en polvo. La espectrometría de emisión atómica de llama (FAES), fué usada para  $\text{K}_2\text{O}$  y Li. El carbono orgánico y mineral, así como el S, fueron determinados usando un analizador elemental Leco CS-244; el FeO mediante el método descrito en SANCHEZ DE LEDESMA et al. (1990), y el F por electrodos selectivos de iones. El  $\text{H}_2\text{O}$  y la pérdida de peso mediante ATG, usando un equipo Perkin-Elmer TGS-2.

En la Fig. 3 se representa el diagrama de flujo de la metodología seguida.

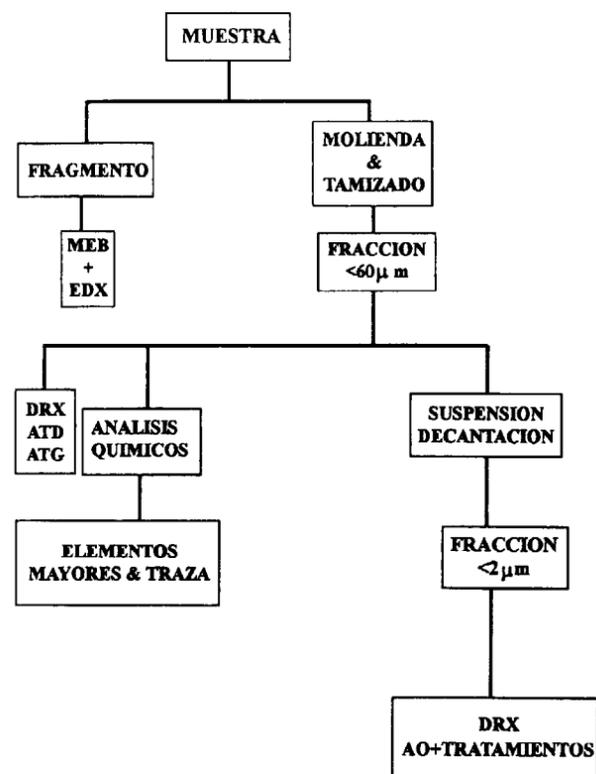


Figura 3. Metodología seguida para el estudio de los rellenos de fracturas de El Berrocal.

RESULTADOS Y DISCUSION

Mineralogía

Los minerales esenciales presentes en la mayoría de las muestras son cuarzo, feldespato potásico, albita, filosilicatos y carbonatos.

El contenido en cuarzo varía de 91% a contenidos por debajo del límite de detección de DRX. Generalmente es heredado del granito, excepto en muestras que presentan diques de cuarzo.

El feldespato potásico presenta contenidos que varían de 40% a trazas. Al igual que el cuarzo, es heredado del granito. Mediante el MEB se aprecian intensas huellas de disolución y su transformación en esmectita.

La albita generalmente está ausente o por debajo del límite de detección de DRX, aunque en

algunas muestras alcanza contenidos de 37%. Este mineral, heredado del granito, presenta frecuentes huellas de disolución y se ha observado por MEB claras evidencias de su transformación en esmectita.

El contenido en filosilicatos totales, excepto la clorita, varía en un amplio rango, desde 95% a trazas. La clorita normalmente es muy escasa o no se detecta, generalmente procede de la alteración de la biotita del granito. Los filosilicatos son fundamentalmente moscovita sericita, illita, esmectita y caolinita, este último solamente se presenta en el 32% de las muestras.

La moscovita es abundante y es heredada del granito. Mediante el MEB se ha observado su transformación en illita o esmectita.

La illita se ha identificado en difractogramas de rayos X de muestras de fracción < 2µm.

La esmectita ha sido identificada como beidellita. Se encuentra en la mayoría de las rellenos. Se ha originado por la alteración de feldespatos y de moscovita-illita y, probablemente, también por precipitación directa (PEREZ DEL VILLAR et al. 1993b).

La caolinita, en general, aparece concentrada en fracturas o en tramos de fracturas determinados y esporádicamente en pequeñas cantidades en fracturas dispersas.

La paligorskita solamente se ha identificado en tres muestras, procedentes de otros tantos sondeos y localizadas a diferentes profundidades. La presencia de este filosilicato de Mg, se explica debido a la disolución previa de la dolomita y la generación de medios altamente salinos en determinadas fracturas. Se dispone recubriendo otros minerales y está tapizado por oxihidróxidos de Fe, en ocasiones con U adsorbido.

La composición mineralógica semicuantitativa de la fracción < 2µm se determinó en 36 muestras (Tabla 1). La relación illita/esmectita indica que la distribución de estos minerales no es regular. Sin embargo, en muestras ricas en caolinita, se observa un aumento en el % de la esmectita.

Tabla 1: Composición mineralógica semicuantitativa de la fracción < 2µm

S	PROFUN.(m)	Q%	FdK%	Ab%	Cl%	K%	Ill%	Esm%	Pal%	Ill/Esm
13	87.31	2	0	3	0	1	61	33	-	1.85
	87.86	0	0	0	0	1	82	17	-	4.82
	89.61	9	9	7	0	7	44	23	-	1.91
	100.45	6	6	0	0	0	64	24	-	2.67
	104.95	4	4	0	0	2	27	62	-	0.43
	108.02	0	6	4	5	0	11	73	-	0.15
	113.07	0	0	0	0	48	1	51	-	0.02
	113.98	6	0	0	5	0	53	36	-	1.47
164.31	11	11	5	0	9	47	16	-	2.94	
14	21.31	19	12	10	0	3	25	31	-	0.81
	106.85	0	0	0	0	15	19	67	-	0.28
	121.06	6	6	2	0	18	17	51	-	0.33
15	85.01	0	0	0	0	14	68	17	-	4
	129.51	Tr	0	0	0	Tr	46	54	-	0.85
	132.29	9	0	4	0	0	87	0	-	-
	143.72	0	0	0	0	0	79	21	-	3.76
	149.75	5	7	0	0	2	54	32	-	1.69
16	69.25	13	9	0	0	3	37	39	-	0.95
	220.31	0	0	0	0	57	13	30	-	0.43
	221.31	0	5	0	0	46	9	39	-	0.23
	236.01	7	7	0	0	7	34	45	-	0.76
	238.16	0	0	0	0	0	73	27	-	2.70
	413.58	8	0	0	89	0	3	0	-	-
	470.25	26	16	24	0	0	15	18	-	0.83
	471.04	0	0	0	0	0	0	100	-	0
	473.15	3	3	3	0	0	3	90	-	0.03
	569.15	0	0	0	0	0	10	90	-	0.11
	589.34	0	11	8	0	2	44	35	-	1.26
596.65	0	0	0	0	5	68	27	-	2.52	
17	70.85	0	0	0	0	0	7	21	71	0.30
	71.61	0	12	0	0	2	39	46	-	0.85
	76.83	0	5	4	0	0	8	83	-	0.10
	84.40	19	12	5	0	0	46	17	-	2.70
	143.88	0	0	0	0	1	68	31	-	2.19
	156.05	0	5	3	0	2	11	78	-	0.14
	249.31	18	4	4	0	2	5	67	-	0.07

S=SONDEO; Q=CUARZO; FdK=FELDESPATO-K ; Ab=ALBITA; Cl=CLORITA; K=CAOLINITA; Ill=ILLITA; Esm=ESMECTITA; Pal=PALIGORSKITA.

Los contenidos en carbonatos varían desde 94% a contenidos por debajo del límite de detección de la técnica. El más abundante es la calcita, identificada en la mayoría de las muestras. La dolomita sólo se ha detectado en cinco muestras de los sondeos 13 y 15, localizadas en granito hidrotermalmente alterado. Esto puede explicarse teniendo en cuenta que el balance de masas entre el granito de referencia y el hidrotermalmente alterado muestra que este último está enriquecido en  $C_{min}$ , Ca y Mg con respecto al primero (PEREZ DEL VILLAR et al., 1993a). Los análisis puntuales químicos semicuantitativos por EDX muestran la presencia constante de Mn en ambos carbonatos, siendo el % de Mn tan variable, que se encuentra presente la serie de carbonatos de Ca-Mn (calcita-kutnahorita-rodocrosita).

En la fig. 4 se ha representado la distribución de los minerales neoformados de los rellenos (filosilicatos totales y carbonatos) a lo largo de los cinco sondeos estudiados. Se observa que los carbonatos aparecen aproximadamente a partir del metro 60, ya que en las zonas más superficiales se han disuelto por la acción de las aguas meteóricas, quedando oxihidróxidos de Fe-Mn residual (PELAYO et al., 1993). Por otro lado, no existe ningún gradiente en la concentración de carbonatos con respecto a la profundidad. Sin embargo, en las zonas brechificadas del filón de cuarzo mineralizado, cortadas por los sondeos inclinados 13 y 15, los carbonatos están ausentes, esto se explica por la circulación de aguas acidificadas debido a la oxidación de los sulfuros. La dolomita sólo se ha detectado en fracturas de las zonas más superficiales de los sondeos 13 y 15, al norte del dique mineralizado de cuarzo. Por último, la comparación de la composición mineralógica entre los rellenos pertenecientes a fracturas hidráulicamente activas (ver Fig. 2), con los de fracturas hidráulicamente inactivas, indica que no hay diferencias significativas, al menos, con respecto a los minerales esenciales.

**Los minerales accesorios**, detectados en su mayoría mediante MEB, son numerosos y en ocasiones presentan una compleja composición química. Por este motivo, sólo se van a exponer los minerales más abundantes y los

que son más importantes para los procesos de migración/retención.

De entre los minerales heredados del granito, se han detectado el apatito, la anatasa/rutilo, el zircon, la monacita, la xenotima, la uranotorita y la torianita (Fig. 5A), que son minerales resistentes a la alteración. La uraninita (Fig. 5B) y la uranotorianita, minerales también heredados del granito, a pesar de ser muy alterables, debieron quedar parcialmente preservados por la matriz arcillosa del relleno de fractura. La uraninita ha sido claramente identificada también en el granito, mientras que la uranotorianita y uranotorita no han sido detectados en dicha roca.

Otro mineral accesorio muy abundante es la pirita, cuya génesis se atribuye al proceso hidrotermal fértil en U, aunque la presencia de pirita idiomorfa, sugiere la existencia de una tercera generación de pirita. En ocasiones se presenta alterada a oxihidróxidos de Fe, con U adsorbido. También se ha detectado calcopirita.

La barita, también muy frecuente, se originó en el mismo proceso de la mineralización de U. Además se ha detectado mediante MEB, barita neoformada.

La witherita, smithsonita y la hemimorfita son minerales neoformados. El primero se originó por la disolución parcial de la barita. La smithsonita se formó a partir del Zn liberado al oxidarse la esfalerita.

En cuanto a los minerales secundarios de  $UO_2^{2+}$ , destacan los silicatos de uranilo, como el uranotilo (Fig. 5C) y fosfatos, como la autunita (Fig. 5D), la fosfuranilita, torbernitita y uranocircita. Estos minerales se formaron por la oxidación y disolución de los minerales de  $U^{4+}$  en presencia de sílice, abundante en el medio, y de  $P_2O_5$ , procedente fundamentalmente de la disolución parcial del apatito heredado. Los cationes que determinan la especie mineralógica de estos minerales secundarios de U (Ca, Fe, Cu y Ba) procederían de la oxidación y disolución total o parcial de los carbonatos, apatito, pirita, calcopirita y barita. Además se han detectado compuestos complejos, clasificados como silicofosfatos de U, en ocasiones con Th y TR (tierras raras).

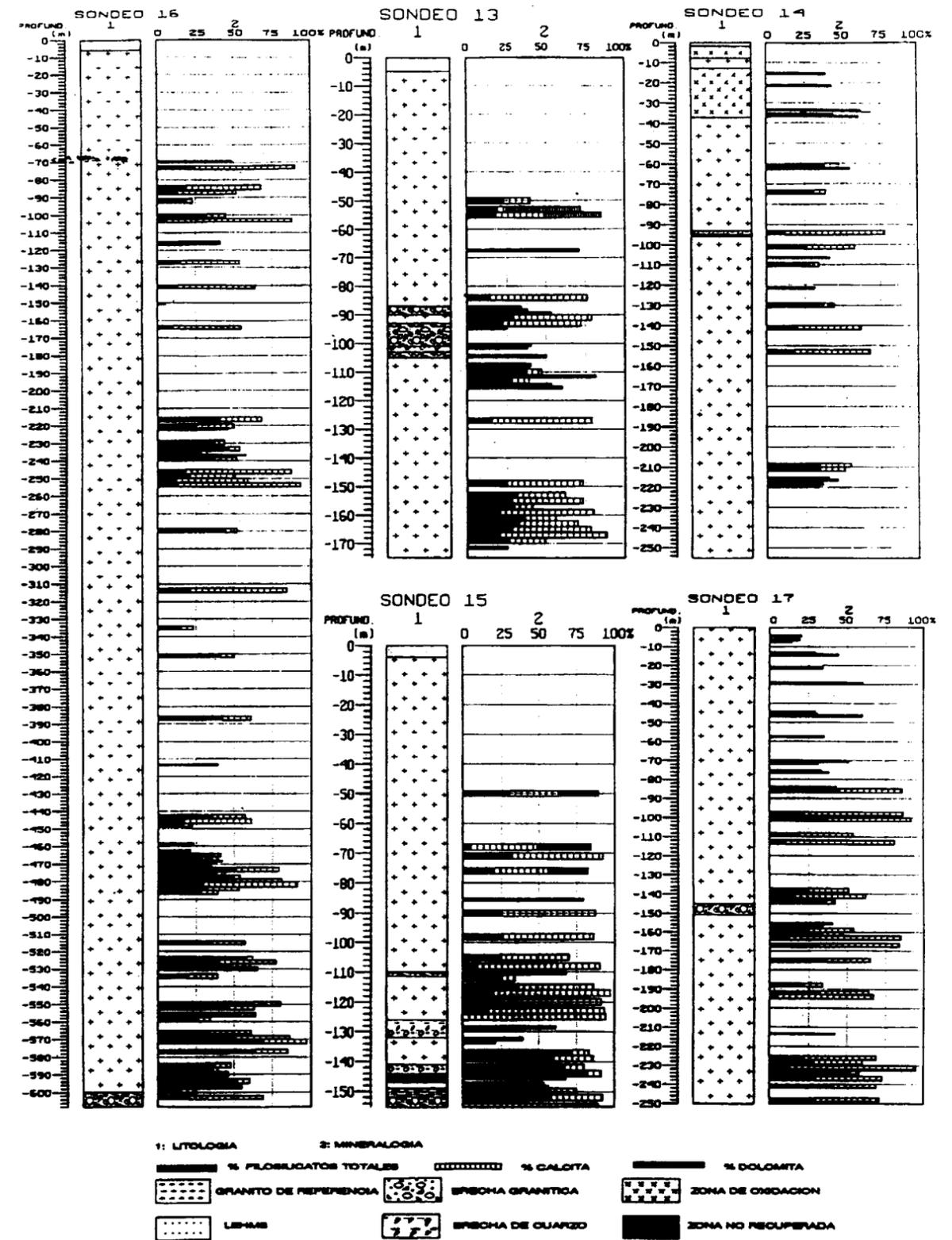


Fig.-4. Distribución de los minerales esenciales neoformados en los sondeos estudiados.

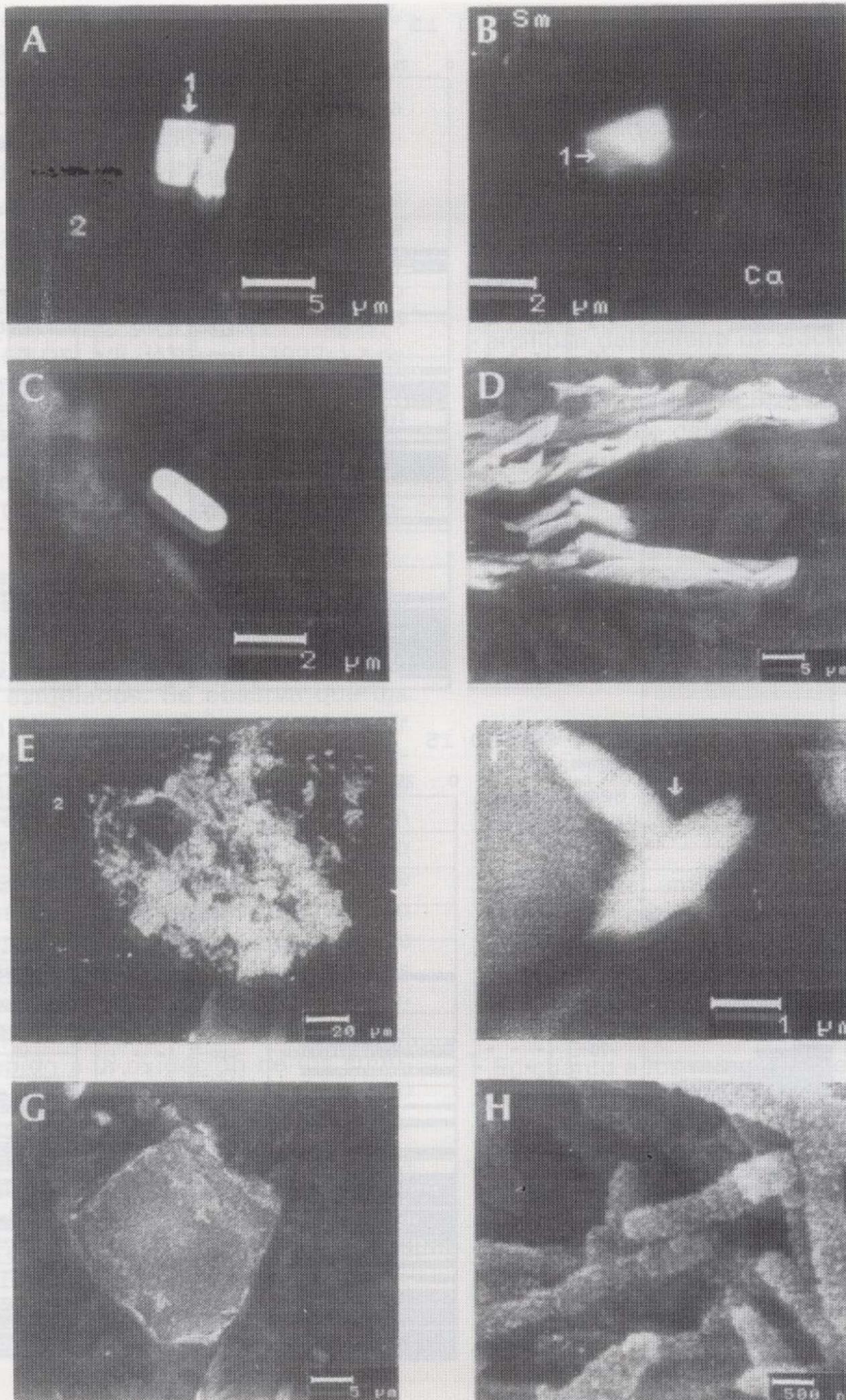


Figura 5. **A)** Cristal idiomorfo de torianita (1), sobre/o parcialmente incluido en la albita (2). **B)** Cristal de uraninita (1), mezclado con los minerales del sustrato. **C)** Cristal idiomorfo de uranotilo sobre el sustrato arcilloso. **D)** Placas de autunita en una matriz de oxihidróxidos de Mn. **E)** Impregnaciones de pechblenda (1) sobre el sustrato del relleno de fractura (2). **F)** Silicofosfato de U y TR, mezclado con los minerales del relleno. **G)** Pirita xenomorfa, parcialmente alterada a oxihidróxidos de Fe, con U adsorbido. **H)** Paligorskita tapizada por oxihidróxidos de Fe, con U adsorbido. Imágenes con electrones retrodispersados, excepto **F** y **H**, con electrones secundarios.

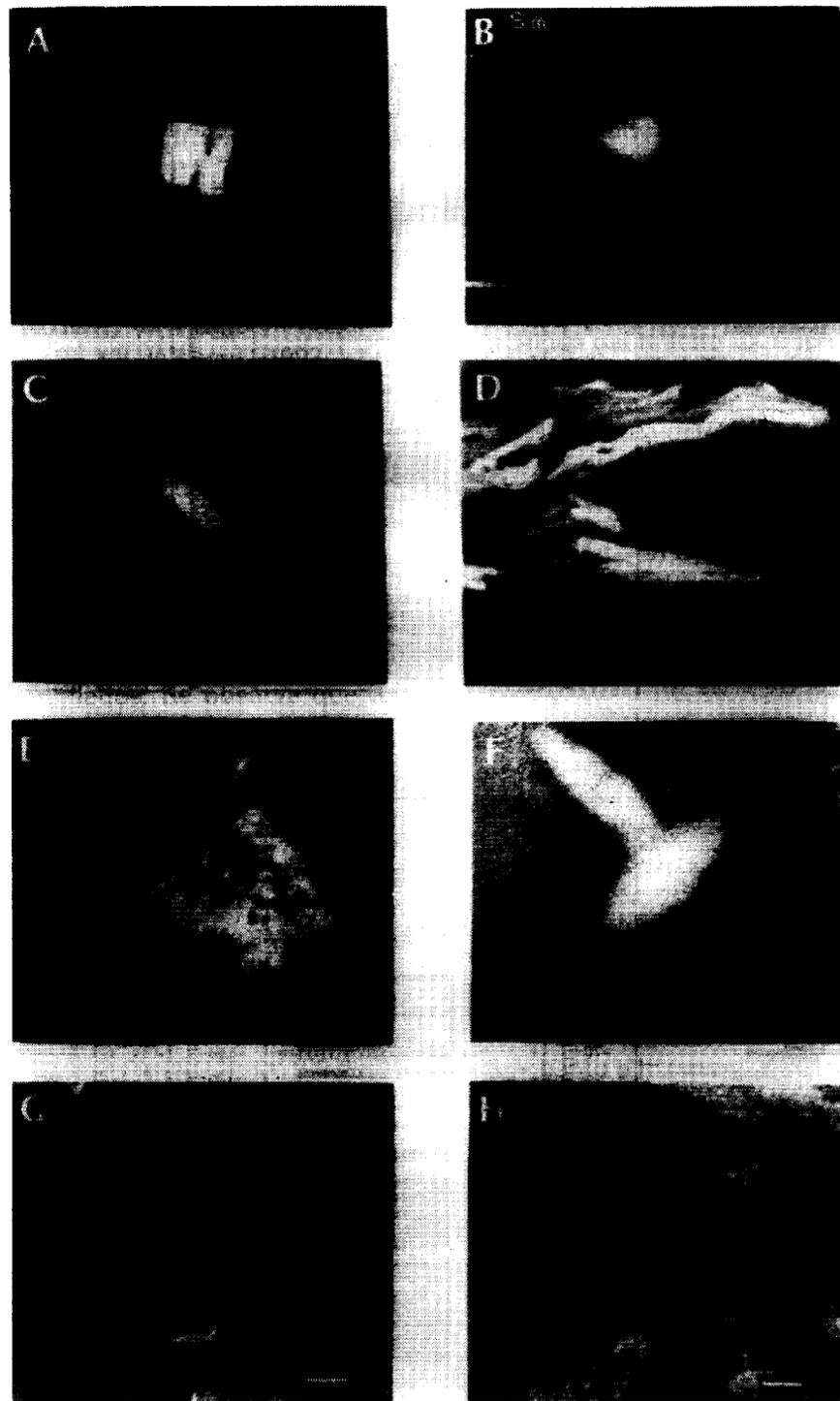


Figura 5. **A)** Cristal idiomorfo de torianita (1), sobre/o parcialmente incluido en la albita (2). **B)** Cristal de uraninita (1), mezclado con los minerales del sustrato. **C)** Cristal idiomorfo de uranotilo sobre el sustrato arcilloso. **D)** Placas de autunita en una matriz de oxihidróxidos de Mn. **E)** Impregnaciones de pechblenda (1) sobre el sustrato del relleno de fractura (2). **F)** Silicofosfato de U y TR, mezclado con los minerales del relleno. **G)** Pirita xenomorfa, parcialmente alterada a oxihidróxidos de Fe, con U adsorbido. **H)** Paligorskita tapizada por oxihidróxidos de Fe, con U adsorbido. Imágenes con electrones retrodispersados, excepto F y H, con electrones secundarios.

La pechblenda se ha detectado en las zonas reductoras cortadas por los sondeos. Se presenta normalmente formando parches de partículas coloidales, sobre los minerales de los rellenos de fracturas (Fig. 5E). Este mineral se originó durante el mismo proceso hidrotermal de baja temperatura, que dió lugar a la mineralización uranífera existente en el filón principal de cuarzo (ARRIBAS, 1965).

Por otra parte, se han detectado minerales de Th neoformados en rellenos de todos los sondeos, aunque son menos frecuentes que los minerales de U. Se trata de fases de composición química compleja con una morfología no definida, clasificadas como silicofosfatos de Th, silicofosfatos de U-Th y silicofosfatos de U-Th-TR.

Los minerales neoformados de TR detectados en los rellenos son la parisita, fosfatos complejos de TR y silicofosfatos de U, que además contienen TR (Fig. 5F) y Th. Se formaron probablemente por la desestabilización parcial de la monacita y la xenotima, en condiciones hidrotermales, dada la escasa movilidad de las TR y del Th en ambientes supergénicos.

#### Geoquímica

Se han estudiado 20 muestras ( $x < 60\mu\text{m}$ ) representativas de todos los sondeos muestreados y correspondientes tanto a zonas de fracturas hidráulicamente activas, como a zonas inactivas. Igualmente, están representadas las distintas composiciones mineralógicas: muestras ricas en fracción carbonatada, arcillosa y con composición intermedia.

Para el estudio geoquímico, se han considerado por separado los elementos mayores y los elementos traza.

**Elementos mayores.-** Los resultados analíticos (Tabla 2) permiten distinguir las muestras ricas en fracción arcillosa, de las más ricas en carbonatos. Los altos contenidos en  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  y  $\text{H}_2\text{O}^+$  en el primer grupo indica que las muestras son esencialmente sericitico illíticas, y el alto contenido en MnO de las segundas muestra el carácter manganesífero de los carbonatos. La mues-

tra carbonatada (S-15, 49.30m) con altos contenidos en MgO y FeO, indica que es dolomítica.

El grado de oxidación de las muestras ( $\text{Ox}^\circ$ ) varía entre 0.19 y 0.92. Los rellenos que presentan mayor grado de oxidación son los que proceden de los sondeos 13 (101m), 15 (141.7 y 142.3m), que corresponden al filón de cuarzo mineralizado, y la muestra más superficial y la más profunda del S-16. En consecuencia, no se puede establecer ninguna correlación entre el grado de oxidación de los rellenos de fractura y su profundidad. Esto pone en evidencia, el carácter extremadamente abierto del sistema y el hecho de que las muestras más oxidadas proceden de zonas muy permeables del filón de cuarzo mineralizado, cortadas por los sondeos 13, 15 y 16 (ver Fig. 2).

El contenido en  $\text{Na}_2\text{O}$  en los rellenos, generalmente, es inferior al 1%. Hecho que se debe a la baja cantidad de albita heredada, ya que es el mineral más susceptible de transformarse en minerales de arcilla. Por lo tanto, el contenido en  $\text{Na}_2\text{O}$  es indicativo del grado de alteración del relleno.

El contenido en  $\text{TiO}_2$  varía ampliamente en las muestras, estando relacionado con la diferente concentración de rutilo o anatasa.

El  $\text{P}_2\text{O}_5$  presenta en algunas muestras contenidos superiores al del granito de referencia (0.29-0.39%). Este elemento se encuentra en el apatito, monacita y xenotima heredados del granito y, en menor proporción, en los fosfatos de  $\text{UO}_2^{2+}$ , y silicofosfatos de  $\text{UO}_2^{2+}$ , TR y Th neoformados.

La concentración de  $\text{CO}_2$  orgánico es destacable, por el alto contenido en las muestras, alcanzando valores de hasta 0.76%. Este hecho puede explicarse por la presencia de microorganismos en los rellenos y/o por la existencia de ácidos orgánicos (húmicos y/o fúlvicos), procedentes de la superficie y transportados por las aguas meteóricas hasta una profundidad de 602m (S-16).

El  $\text{SO}_2$  total de las muestras, generalmente es más alto que en el granito (0.04%). Esto se debe

TABLA 2: COMPOSICION QUIMICA DE LA FRACCION < 60µm (ELEMENTOS MAYORES Y GRADO DE OXIDACION)

SONDEO	S-13			S-14			S-15			S-16			S-17									
	PROF(m)	101	104.9	94.7	49.3	105.6	133.1	141.7	142.3	149.7	279.6	334.2	386.4	465.6	468.9	470.7	471.1	549.9	602	141.4	156	
OXIDOS%																						
SiO <sub>2</sub>	76.9	69.0	36.3	22.0	38.8	59.4	64.6	56.3	59.1	56.7	55.2	58.8	62.8	63.6	68.4	60.7	56.0	38.9	52.8	59.2		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.1	14.6	8.48	5.1	7.5	19.9	22.4	26.6	20.9	15.8	22.5	11.3	14.7	16.7	13.5	15.4	14.3	7.8	10.1	18.6		
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.21	1.1	0.81	8.1	2.1	0.95	0.63	0.66	1.3	5.8	3.3	1.40	1.3	2.2	1.2	1.1	2.3	0.87	1.0	1.7		
FeO	1.11	0.63	0.55	6.21	0.43	0.57	0.72	0.53	N.D.	4.7	1.45	0.60	0.60	0.87	0.51	0.43	0.41	0.67	0.56	0.85		
MgO	0.89	0.42	0.23	1.7	1.5	0.54	0.10	0.12	N.D.	0.99	1.7	0.72	0.63	1.2	0.62	0.60	1.7	0.18	0.41	0.74		
MnO	<0.03	<0.03	0.33	7.8	1.6	1.7	0.63	0.52	1.8	2.1	2.1	1.6	1.1	1.3	0.84	1.3	3.1	0.64	0.82	1.4		
CaO	0.97	1.1	26.0	1.4	0.58	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	0.17	0.07	0.34	0.21	0.04	0.17	0.09	0.17	0.42	0.28	<0.03		
Na <sub>2</sub> O	0.55	0.91	0.64	0.21	0.38	1.1	1.2	0.84	0.63	2.6	1.2	6.3	3.4	1.4	2.8	3.1	6.5	16.7	14.7	1.2		
K <sub>2</sub> O	2.7	4.8	2.9	1.4	2.1	2.9	5.7	6.9	7.2	4.0	6.6	3.7	2.6	3.8	3.1	4.0	1.9	3.2	2.6	5.0		
TiO <sub>2</sub>	0.13	0.13	0.06	<0.07	0.07	0.06	<0.02	<0.02	0.19	0.13	0.24	0.12	0.11	0.16	0.11	0.11	0.06	0.17	0.11	0.15		
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.45	0.45	0.27	0.07	0.23	0.29	0.86	0.99	0.75	0.22	0.49	0.54	0.22	0.39	0.23	0.44	0.31	0.24	0.17	0.33		
H <sub>2</sub> O	1.25	0.83	0.43	0.42	2.92	0.61	2.68	1.8	2.36	1.39	0.49	2.22	4.58	3.89	2.78	4.03	7.78	0.83	1.11	3.33		
H <sub>2</sub> O*	2.08	1.24	1.42	0.48	1.63	1.63	1.77	1.56	2.64	1.55	2.16	2.03	1.68	2.87	1.83	1.97	3.47	1.75	5.65	2.52		
CO <sub>2</sub>	0.11	0.08	0.4	0.73	6	0.19	0.11	0.15	0.21	0.70	0.11	0.37	0.59	0.44	0.41	0.48	0.76	0.73	0.37	0.21		
CO <sub>2</sub> eq	0.94	0.84	20.2	28.6	15.4	1.29	0.94	0.93	0.85	1.32	0.37	5.59	2.20	0.15	1.61	1.54	4.03	16.87	12.1	0.97		
SO <sub>4</sub> T	0.04	0.16	0.06	0.04	0.16	0.16	0.04	0.04	0.04	5.6	0.16	0.20	0.06	0.06	0.04	0.06	0.06	0.46	0.17	0.13		
F	0.28	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.06	0.04	N.D.	0.45	0.38	N.D.	0.20	0.30	0.20	0.20	N.D.	N.D.	0.14	0.31		
F <sup>-</sup> O	0.08	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.03	0.03	N.D.	0.19	0.16	N.D.	0.06	0.13	0.09	N.D.	N.D.	N.D.	0.06	0.13		
Total	99.89	99.53	103.2	99.4	84.2	100.7	101.88	117.89	98.1	98.76	95.46	94.59	97.83	95.34	99.41	98.74	101.4	89.7	103.3	94.8		
Or*	0.92	0.60	0.71	0.78	0.22	0.63	0.28	0.31	N.D.	0.80	0.44	0.45	0.42	0.21	0.41	0.42	0.19	0.79	0.44	0.56		

ZONA HIDRAULICAMENTE ACTIVA (MUESTRO DE AGUAS) N.D. = NO DETERMINADO

a la reciente neoformación de sulfuros, principalmente pirita (muestra S-16, 279.6 m, detectada por DRX) y de sulfatos, como la barita.

La concentración de F es, generalmente, más alta que en el granito de referencia (0.16 0.22%).

**Elementos traza.-** Los resultados obtenidos (Tabla 3) se han comparado con aquellos determinados en el granito de referencia (Tabla 4), con el fin de establecer en que grado estos elementos se encuentran concentrados en los rellenos de fractura.

Los contenidos en Li y Rb son muy variables con respecto al granito. Sus concentraciones pueden deberse al mayor o menor contenido de sericita en las muestras y al feldespató potásico.

El Be, Sr y Ba están muy concentrados en los rellenos. Las concentraciones de Ba y Sr se pueden explicar por la existencia de barita (Ba y Sr), apatito (Sr) y por la capacidad de cambio de las arcillas (Sr). Sin embargo, minerales que presenten Be en su estructura no se han encontrado.

La concentración de Zr en los rellenos con relación al granito, se justifica por la existencia de zircón heredado.

La concentración de V llega a ser hasta 6 veces la del granito. Este elemento se encuentra en la red de la illita y la esmectita, sustituyendo al Al<sup>3+</sup> octédrico (PEREZ DEL VILLAR et al., 1993b).

El Cr, W, Co y Ni se encuentran en el granito por debajo del límite de detección de la espectrometría de ICP. Mientras que en los rellenos de fracturas, el W está generalmente por debajo del límite de detección de dicha técnica analítica, el Cr, Co y Ni se encuentran concentrados en los rellenos. Los contenidos anómalos del Cr y Co tienen difícil explicación por no haberse encontrado ningún mineral accesorio de este elemento. Sin embargo, los contenidos de Ni pueden deberse a la existencia de pirita y calcopirita, que albergan Ni en su estructura y, también a la formación de compuestos complejos.

El Cu y Zn se encuentran concentrados en relación al granito, especialmente el Zn, con contenidos de hasta 500 ppm. Los minerales de Cu

detectados en los rellenos son la calcopirita, la torbernita y compuestos complejos de Fe-Cu-Pb-Ti-Ni-S. En cuanto al Zn, la concentración se debe fundamentalmente a la smithsonita y, también a la hemimorfita y a la esfalerita.

Con respecto al Sn, en muy pocos rellenos existe una concentración en relación al granito de referencia.

La concentración de As en los rellenos está generalmente por debajo del límite de detección de la técnica analítica.

Las concentraciones de Y, Ce y La en los rellenos de fractura son muy variables y, en algunas muestras, se encuentran concentrados en relación al granito. Este hecho se produce fundamentalmente por un mecanismo simple de concentración residual de la monacita y la xenotima, minerales refractarios del granito y, también por la neoformación de minerales, como la parisita, fosfatos complejos de TR, silicofosfatos de U-TR y silicofosfatos de Th-U-TR. Esto indica que el Y, Ce y La fueron remobilizados y concentrados en los rellenos de fracturas, a partir de la desestabilización de la xenotima y la monacita, por los procesos de alteración que dieron lugar a los rellenos.

Los elementos más importantes de acuerdo a los objetivos de este trabajo son el U y el Th. Los contenidos medios en el granito de referencia son de 16 y 6.5 ppm, respectivamente, estando controlados fundamentalmente por la uraninita y la torita-auerlita y, en menor proporción, por la monacita. Los contenidos en los rellenos varían entre 13 y 962 ppm, para el U y entre <2 y 19 ppm para el Th. Por lo tanto, el contenido en U en la mayoría de los rellenos es superior al del granito de referencia, mientras que el Th es, en gran parte de los rellenos, similar o sensiblemente inferior al del granito, lo que indica que el U ha sido generalmente concentrado en los rellenos de fractura, mientras que el Th ha podido ser lixiviado o concentrado, en función de la muestra que se considere.

La concentración de U en los rellenos de fracturas se debe, por una parte, a los minerales heredados del granito y a los minerales de neoformación, y también al U adsorbido y/o coprecipitado.

TABLA 3: COMPOSICION QUIMICA DE LA FRACTACION < 60 μm (ELEMENTOS TRAZA (ppm))

SONDEO	S-13			S-14			S-15			S-16			S-17						
	PROF.(m)	Σ	σ	Σ	σ	σ	Σ	σ	σ	Σ	σ	σ	Σ	σ	σ				
Li	110	170	51	55	67	36	39	29	155	165	585	99	125	240	125	190	80	72	82
Rb	385	586	387	N.D.	282	398	440	479	N.D.	610	1077	N.D.	398	558	472	N.D.	N.D.	378	722
Be	7.3	5.1	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	9.0	13	<5.0	6.3	11	7.4	<5.0	18	24	<5.0	<5.0	5.1	<5.0
Sr	22	17	26	26	18	23	13	11	36	47	73	75	31	71	55	66	190	26	11
Ba	265	535	45	38	84	72	185	150	130	140	165	135	99	320	82	120	125	115	160
Zr	59	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	18	15	N.D.	85	131	N.D.	61	95	58	N.D.	N.D.	62	84
Y	5	5.3	<5.0	<5.0	5.5	18	62	27	8.2	<5.0	7.0	7.4	<5.0	5.4	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	5.7
Cr	5.2	9.3	120	<5.0	7.8	11	17	31	14	22	12	<5.0	17	11	20	9.5	11	12	12
W	46	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25
Co	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	6.8	7.6	<5.0	6.2	14	7.1	10	6.6	7.4	5.8
Ni	6	<5.0	65	5.6	<5.0	<5.0	12	21	<5.0	9.2	20	<5.0	7.8	<5.0	9.4	<5.0	7.7	8.4	<5.0
Cu	8.4	<5.0	39	31	25	6.9	67	42	<5.0	6.0	<5.0	27	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	60	11	<5.0
Zn	220	240	185	115	38	330	410	295	325	42	71	500	85	200	65	205	285	26	51
Su	39	<10	16	<10	<10	<10	41	23	14	<10	20	14	<10	13	<10	<10	<10	<10	15
As	<25	<25	39	<25	28	<25	<25	<25	<25	560	<25	<25	<25	<25	<25	<25	100	<25	<25
Y	13	8.1	11	9.1	7.5	<5.0	16	15	21	27	9.1	16	<5.0	8	<5.0	7.7	37	53	7
Ce	37	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	7.8	<5.0	5.4	18	41	<5.0	5.8	47	9.6	<5.0	<5.0	<5.0	21
La	23	13	37	39	43	17	3.5	<5.0	48	21	26	30	17	30	16	28	23	33	14
Th	7.5	9.3	9.7	2	7.8	4.6	<2.0	<2.0	N.D.	9.4	19	9.3	5.4	13	5.9	11	6.2	9.7	8.4
U	42.4	20	680	27	38	43	502	610	196	430	57	22	13	25	13	23	203	71	340

ZONA HIDRAULICAMENTE ACTIVA (MUESTREO DE AGUAS) N.D. = NO DETERMINADO

TABLA 4: CONTENIDOS MEDIOS DE ELEMENTOS MAYORES Y TRAZA EN EL GRANITO DE REFERENCIA DE EL BERROCAL. (S-16, 65 MUESTRAS)

OXIDOS (%)	Σ	σ	ELEMENTOS (ppm)	Σ	σ
SiO <sub>2</sub>	74.41	0.58	Li	175	40
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.69	0.41	Rb	467	11
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.47	0.07	Be	<5	-
FeO	0.58	0.06	Sr	7	2
MgO	0.19	0.04	Ba	28	21
MnO	<0.03	-	Zr	55	6
TiO <sub>2</sub>	0.13	0.01	V	7	2
CaO	0.52	0.04	Cr	<5	-
K <sub>2</sub> O	4.52	0.24	W	<25	-
Na <sub>2</sub> O	4.14	0.18	Co	<5	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.39	0.02	Ni	<5	-
H <sub>2</sub> O	0.19	0.04	Cu	<5	-
H <sub>2</sub> O*	0.66	0.21	Zn	60	11
CO <sub>2</sub> T	0.14	0.03	Sn	28	6
SO <sub>2</sub> T	0.04	0.01	As	<25	-
F	0.16	0.04	Y	6	2
			Ce	19	11
			La	8	3
			Th	6.5	1
			U	16	2

Los minerales de U heredados detectados en los rellenos son la uraninita, uranotorianita y uranotorita.

Los minerales neofrmados son los más numerosos, habiéndose encontrado en la mayoría de las muestras estudiadas. Dentro de estos se distinguen la pechblenda, formada en condiciones reductoras y los silicatos, fosfatos y fosfosilicatos de UO<sub>2</sub><sup>2+</sup>, originados en condiciones oxidantes.

La existencia de minerales primarios, el hecho de que los minerales neofrmados de UO<sub>2</sub><sup>2+</sup> sean los más frecuentes en los rellenos y el alto contenido en U de las muestras, sugiere que dicho elemento procede de la oxidación y disolución de los minerales de U<sup>4+</sup> existentes en los rellenos, reconcentrándose, por precipitación, en forma de fosfatos, silicatos y fosfosilicatos, en condiciones supergénicas oxidantes (PEREZ DEL VILLAR et al., 1995c).

En cuanto al U en forma adsorbida y/o coprecipitada, se ha detectado en numerosas muestras

sobre los oxi-hidróxidos de Fe procedentes de piritita (Fig. 5G) y, en alguna muestra, sobre los oxi-hidróxidos de Fe que tapizan a la paligorskita (Fig. 5H). El U retenido mediante adsorción, parece ser cuantitativamente minoritario en relación con el retenido por la precipitación de minerales.

La concentración de Th en los rellenos de fractura, está controlada principalmente por los minerales heredados del granito (torianita, uranotorita, uranotorianita y monacita) y conservados por su alta estabilidad. No obstante, la presencia de silico-fosfatos de Th, de U y Th y de U, Th y TR, y el hecho de que en algunas muestras el contenido en Th sea de aproximadamente 3 veces el del granito de referencia, sugiere que dicho elemento ha sido removilizado y reconcentrado en los rellenos de fractura. Sin embargo, la baja o nula movilidad del Th a temperatura ambiente, induce a pensar que los procesos de movilización y precipitación tuvieron lugar en condiciones hidrotermales.

CONCLUSIONES

Del estudio de las muestras de los rellenos de fracturas, tanto desde el punto de vista mineralógico, como geoquímico y que representan a todas las familias de fracturas identificadas en el área, se puede concluir que:

- La asociación mineralógica encontrada en todos los rellenos de fracturas, es muy constante e independiente de la dirección y buzamiento de la fractura, y muy semejante a la existente en las fracturas N100-110°E de la galería de la mina, que representa al filón de cuarzo mineralizado.
- Los rellenos de fracturas de El Berrocal, son el resultado de la superposición de procesos de tectonización, alteración hidrotermal y meteórica de los minerales del granito encajante, y de procesos de neofrmación y disolución mineral.
- El estudio detallado de la mineralogía, muestra que el U retenido en los rellenos se debe, en su mayor parte, a los minerales heredados del gra-

nito, especialmente a la uraninita, a la pechblenda hidrotermal y, sobre todo, a los minerales de  $UO_2^{2+}$  neoformados. Los procesos de adsorción y/o coprecipitación son de menor importancia.

- Los resultados de los análisis geoquímicos de los elementos mayores indican, en primer lugar, que los rellenos son el producto de la alteración del granito y de la neoformación de carbonatos ricos en Mn. En segundo lugar, que el contenido en  $Na_2O$  en los rellenos es indicativo del grado de alteración alcanzado por ellos. Por otra parte, se pone de manifiesto que el grado de oxidación no sigue ninguna pauta definida, debido al carácter abierto e irregular del sistema, y, por último, que el alto contenido de  $CO_2$  orgánico, indica la existencia de actividad orgánica en los rellenos y/o la fijación de ácidos orgánicos procedentes de la superficie topográfica, hasta una profundidad de 602 m.

- En cuanto a los elementos traza, la mayoría de los detectados en los rellenos de fractura, están presentes en el granito, bien en los minerales esenciales o constituyendo minerales accesorios. Lo que confirma el hecho de que dichos rellenos proceden, fundamentalmente, de la alteración del propio granito. Así mismo, se confirma que los elementos traza se encuentran, en general, reconcentrados en los rellenos de fracturas, con respecto al granito de procedencia, especialmente el Be, Sr, Ba, Cu, Zn, Y, Ce y La, en ocasiones el Th y, fundamentalmente el U. A excepción del Be y el Sr, estos elementos se encuentran como minerales propios en los rellenos de fractura, por lo tanto se puede afirmar que el proceso de reconcentración ha sido fundamentalmente por precipitación, debido a la neoformación de minerales.

Por último, y con los datos obtenidos en este estudio y expuestos hasta el momento, se puede afirmar que los rellenos de fracturas juegan un importante papel en la retención, fundamentalmente por precipitación, de los radionucleidos naturales y de otros elementos análogos, movilizados previamente de un área fuente, que en este caso es el granito encajante, bien por procesos hidrotermales de baja temperatura, o por procesos desarrollados a temperatura ambiente.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado en el marco del convenio entre CIEMAT y ENRESA, y el contrato con la CEE titulado "Caracterización y validación de la migración de radionucleidos naturales en un medio granítico fisurado. El Berrocal experimental site." Agradecemos la colaboración a J. Pardillo, F. Sánchez, F. Orden y J. Navea, por su ayuda en el muestreo y preparación de las muestras y a los Dres. M. L. Munuera, A. Quejido, A. Bayón y M. Sánchez, del Departamento de Química del CIEMAT por los análisis químicos.

## REFERENCIAS

ARRIBAS, A. (1965): Mineralogía y Metalogía de los yacimientos españoles de uranio. "El Berrocal", Escalona (Toledo). *Not. Com. Inst. Geol. Min. España*, 77, 67-92.

CAMPOS, R. y MARIN, C. (1994): Análisis estructural del área de El Berrocal (Sierra de Gredos - España). Topical Report. EB-CIEMAT (93)56.

JULIVERT, M.; FONTBOTE, J. M.; RIBERO, D. y CONDE, L. (1972): Mapa tectónico de la Península Ibérica y Baleares. E. 1:10°. Inst. Geol. Min. de España, Madrid.

PELAYO, M.; PARDILLO, J.; FERNANDEZ, A. M.; DE LA CRUZ, B. and PEREZ DEL VILLAR, L. (1993): Mineralogy of the fracture infill materials from boreholes 13, 14, 15 and 16 in the "El Berrocal" experimental site (S. Gredos, Spain). Topical Report EB-CIEMAT (93)1, 21pp.

PEREZ DEL VILLAR, L. and DE LA CRUZ, B. (1989): Caracterización mineralógica y geoquímica del granito sano y alterado del macizo de El Berrocal (Sierra de Gredos, Provincia de Toledo). *Stud. Geol. Salmant.*, 26, 47-80.

PEREZ DEL VILLAR, L.; DE LA CRUZ, B. y COZAR, J. S. (1990): Estudio mineralógico, petrográfico y geoquímico del granito de El Berrocal (Sierra de Gredos, provincia de Toledo). Informe interno. División de Técnicas Geológicas, CIEMAT, Madrid, 72 pp.

PEREZ DEL VILLAR, L.; DE LA CRUZ, B.; PARDILLO, J. y COZAR, J. S. (1992): Cálculo de la distribución mineralógica del uranio y torio en el granito sano del plutón de El Berrocal (Sierra de Gredos, provincia de Toledo). *Bol. Soc. Esp. Min.*, 15, 123-136.

PEREZ DEL VILLAR, L.; DE LA CRUZ, B.; PARDILLO, J.; PELAYO, M.; RIVAS, P. y ASTUDILLO, J. (1993a): El Sistema granito-mineralización de Uranio de El

Berrocal como análogo natural de un almacenamiento de residuos radiactivos. *Estudios Geol.*, 49, 187-198.

PEREZ DEL VILLAR, L.; DE LA CRUZ, B.; COZAR, J. S.; PARDILLO, J.; GOMEZ, P.; TURRERO, M. J.; RIVAS, P.; REYES, E.; DELGADO, A. and CABALLERO, E. (1993b): The clayey fissural fillings associated with N100°-110°E fractures at the El Berrocal uranium mine (Sierra de Gredos, Spain): characterization, genesis and retention capacity of radioactive and other elements. *Estudios Geol.*, 49, 199-222.

PEREZ DEL VILLAR, L.; PELAYO, M.; COZAR, J. S.; DE LA CRUZ, B. and PARDILLO, J. (1995c): Mineralogical and geochemical evidences of the migration/retention processes of the U and Th in fracture fillings from the El Berrocal granitic site. In: *Procc. Fifth International Conference on the Chemistry and Migration behaviour of Actinides and Fission Products in the Geosphere* (Saint-Malo, France) (submitted).

SANCHEZ DE LEDESMA, D. M.; MARIN, J.; SEVILLA-

NO; M. L. and MUNUERA, M. L. (1990): La aplicación de 1-10-Fenantrolina como reactivo cromogénico y solubilizante a la determinación espectrofotométrica de Fe (II) en granitos. *23 Reunión Bienal de la RSEQ*, Salamanca 15-0-19, 239 (resumen).

UBANELL, A. G. (1977a): Tectónica tardihercínica de bloques en la región central de la Meseta Ibérica. *Bol. Geol. Min.* 88 (6), 508-512.

UBANELL, A. G. (1977b): Modelo de fracturación de la Región Central Española, basado en las imágenes obtenidas por satélite. *Studios Geol.* 12, 195-206.

UBANELL, A. G. (1981a): Características principales de la fracturación tardihercínica en un segmento del Sistema Central Español. *Cuad. Geol. Ibér.*, 7, 591-605.

UBANELL, A. G. (1982): Estudio de la fracturación en un segmento del Sistema Central Español. Colección Tesis Doctorales de la Universidad Complutense de Madrid, nº 160/82, 217 pp.

Original recibido: Diciembre 1995.

Original aceptado: Enero 1996.

# INFORMACION

## Los procesos de Amalgamación a través de los tiempos

Por O. PUCHE RIART (\*), L. F. MAZADIEGO (\*\*) y M. MARTIN DIEZ

### LOS PRIMEROS TIEMPOS

La plata, junto con el oro y el cobre, fue quizá uno de los primeros metales conocidos por el hombre. Inicialmente se explotaron las pequeñas mineralizaciones de elementos nativos, presentes en filones, monteras o placeres. Pero el camino seguido hasta la concentración del oro y de la plata a partir de los minerales que los contienen fue largo. Ya en época romana, se experimentó un importante avance con el descubrimiento de la amalgamación, término que describe la aleación que se produce entre el mercurio y algunos metales, que generalmente se muestra sólida o semilíquida.

El mercurio, necesario en los procesos de amalgamación, ya era utilizado en la Edad de Piedra, aunque no como elemento nativo, sino como sulfuro, a modo de pigmento natural. Luego se extrajo como nativo, por destilación, y se empleó enseguida en la obtención de plata. La palabra amalgama procede del latín, apareciendo las primeras descripciones de procesos de amalgamación en obras de escritores romanos, tal es el caso de PLINIO (23-79 a.C.) y VITRUBIO (88-26 a.C.). Para el mencionado CAYO PLINIO SEGUNDO, según recogemos de la versión de la **Historia Natural**, traducida por GERONIMO DE HUERTA (1629), tenemos que: **"Todos los metales nadan sobre él (mercurio) fuera del oro, este solo le trae a sí: y por esto le purga bonifsimamente, despidiendo todas sus inmundicias..."**. Señala MODESTO BARGALLO (1955) que: **"Los romanos amal-**

**gaban oro para dorar el cobre con auxilio de la sal, y para separarlo de vestidos previamente quemados"**.

No sabemos por que los romanos no amalgamaron la plata, esto tal vez se deba a que la interacción entre la superficie del oro nativo y el mercurio es mucho más fácil que en el caso de la plata. Esta última se oxida en el medio ambiente y suele aparecer recubierta de una pátina de óxido ( $Ag_2O$ ) o carbonato ( $Ag_2CO_3$ ) que impide el contacto entre los metales. En tal situación influiría también la mayor superficie específica y la distinta cinética en las reacciones de amalgamación.

También desconocemos como se les ocurrió añadir la sal, pero era un ingrediente normal en otros procesos metalúrgicos. Fue un hallazgo importante, ya que el cloruro sódico es un compuesto que favorece los procesos de disolución de sólidos que al oxidarse electroquímicamente generan cloruros estables. De esta forma las carrocerías de los coches sufren una mayor corrosión en las zonas costeras donde la halita es transportada por el aire en forma de aerosoles. En definitiva, la sal actúa como complejante secuestrando iones y ayudando a su estabilización.

Para algunos autores, tras la caída del Imperio romano hubo una lamentable pérdida de buena parte de los conocimientos técnicos. Asimismo, la mayor parte de los historiadores de Almadén piensan que con los visigodos hubo una paralización de las minas. Sin embargo, SAN ISIDORO, en **Las Etimologías**, XVI, 19, 3, señala que si: **"sobre un sextario de mercurio se coloca...un escrúpulo de oro, al**

**punto lo engulle en su seno a pesar de su poco peso"**, existiendo otras citas sobre el mercurio y el bermeillon. A estos datos habría que añadir la existencia, en dicha época, de talleres donde se ejecutaban magníficos dorados al fuego y damasquinados, elaborados mediante amalgamas, lo que junto a otras consideraciones nos llevó a pensar en una continuidad de las explotaciones mercuriales hispanas en la Alta Edad Media (PUCHE, O. y BOSCH, A., 1995).

### AMALGAMACION Y ALQUIMIA

Los alquimistas no dejaron de mostrar su interés por el mercurio. La palabra alquimia procede del árabe "al-kimiya", siendo a este pueblo al que se le asigna el origen de tal ciencia, aunque algunos quieren situar sus inicios en el Egipto de los faraones. Fueron importantes los alquimistas persas JADIR (721-815) y AR RAZI (864-925); sin embargo, en Europa esta materia no adquirió un fuerte desarrollo hasta bien entrada la Edad Media. El primero de estos autores formuló la teoría, con base aristotélica, que los metales se producían mediante la unión del mercurio (frio y húmedo) con el azufre (caliente y seco). Estas ideas, que han persistido hasta la Edad Moderna, son recogidas por IBN SINA (AVICENA) (927-1037) en **De congelatione et conglutinatione lapidum**, donde señala que **"si el Mercurio es puro y está solidificado por un Azufre inmaculado que no arde, un Azufre que no tiene ninguna impureza y que es mejor que el que pueden preparar los alquimistas, entonces se produce la Plata. Y si este azufre se presenta aun mas puro se produce el Oro"**. De igual forma, el

cobre se generaría de la combinación de mercurio puro y azufre impuro. Asimismo el hierro se obtendría mediante la unión de azufre y mercurio impuros.

En España, uno de los antecedentes alquímicos es el **Libro del Tesoro**, supuestamente atribuido a ALFONSO X, EL SABIO. Recordemos que en esta obra se trata de la preparación de amalgamas, aunque como buen tratado de alquimia muestra un lenguaje hermético. Es probable que esta característica estilística se fundamenta en la necesaria protección frente a la incomprensión del vulgo que asociaba la química a la nigromancia. AGRICOLA, en el Prefacio **De Re Metallica** sustentaba la idea que en este colectivo había un predominio de los farsantes: **"...está claro que sus discípulos, o no entendieron sus reglas o, si las entienden, no las practican; porque si las comprenden, tantos discípulos como ha habido y hay, habrían llenado ya ciudades enteras de oro y plata"**. Aunque ALFONSO X en el **Lapidario** (1250) mantiene criterio opuesto: **"...los que se ocupan de la alquimia, a la que llaman obra mayor, deben parar mientes para que no dañen el nombre del saber, pues alquimia tanto quiere decir como maestría para mejorar las cosas..."**.

El fin primordial de la alquimia no era otro que el descubrimiento del mítico agente transmutador, denominado "lapis philosophorum" (piedra filosofal) que, por contacto, transformaba los metales en oro. Narran MAFFEI, E. y RUA FIGUEROA, R. (1871) que a finales del siglo XIII, o principios del XIV, el alquimista ARLANDO DE VILLANOVA se dedicaba: **"a la investigación de la piedra filosofal y a la transmutación del mercurio en oro, atribuyéndosele con este motivo algunos escritos y experimentos, ..."**. Según SIRO ARRIBAS JIMENO (1993) este autor obtuvo el óxido rojo de mercurio, el cloruro de mercurio y otros compuestos de dicho metal. La consecución del cloruro, para nosotros, indica un probable manejo de los ingredientes necesarios en los procesos de amalgamación.

Influído por las teorías medievales, ALONSO BARBA (1559-1662), en el **Arte de los Metales** (1640), Cap. XVIII, de acuerdo con las teorías de los alquimistas **"odioso nombre por la multitud de ignorantes, que con sus**

**embustes lo han desacreditado"**) señala que las materias constitutivas de los metales son el azufre y el azogue, adicionados en proporciones variables según la especie mineral considerada. Dicho autor fundamenta esta teoría, en el Cap. XIX, por la presencia de abundante azufre nativo y menas sulfurosas en las minas, así como por unas observaciones particulares suyas: al fundirse por plata el mineral de Challatiri, a cuatro leguas de Potosí, se liberaba mercurio nativo entre la parte menos caliente de las cenizas. Más adelante, en el Cap. XXIII, BARBA señala que: **"...tiene tanta conveniencia la naturaleza del azogue con la de los metales, que aunque no es ninguno de ellos, es convertible en todos, no solo por ser uno de los principios que se componen, como los mas Filósofos afirman, y prueba la facilidad que con todos ellos se unen, è incorpora, sino también porque con toda su substancia se transmuta en metal verdadero"**.

Los griegos habían supuesto la existencia de diferencias sexuales entre los minerales, de esta forma "arsénicos" no significaba otra cosa que macho. Esta dicotomía entre las especies mineralógicas se traslada a los alquimistas, los cuales elaboraron la **teoría de los contrarios**, en la que se indicaba que unos elementos se oponían a otros, tal es el caso del azufre y el agua. De este modo, en la unión de opuestos se engendraban los distintos metales, en el interior del Globo.

En México, el filósofo y médico sevillano JUAN DE CARDENAS (1563-....), en la **Primera parte de los problemas y secretos maravillosos de las Indias** (1591), tal vez influido por las teorías de ULISES ALDROVANDI (1522-1605) Fig. 1, señalaba que los beneficios de amalgama se debían a simpatías y antipatías. Las simpatías determinarían la unión del azogue a la plata **"entre la sal y la plata se halla alguna amistad y conveniencia..."**. Esta unión sería favorecida por el calor que le presta la salmuera, como podía aportárselo otro material caliente **"se hecha no para que se abraçe con nadie, sino para que, como material caliente, sirva de dar calor y actuar el azogue y otrosí ayudar a recocer, fermentar y esponjar todo aquel metal, porque mejor lo pueda penetrar el azogue y abraçarse con la plata. De donde se infiere que si en lugar de sal, se hechase cardenillo o cal viva o**



Figura 1. Ulises Aldrovandi (1522-1605)

**solimán o otro material caliente, como no consumiessse y destruyesse el azogue, haría tanto y mejor efecto que la sal, cuanto es material mas caliente"**). La antipatía haría presencia entre el calor y el azogue, por su carácter contrario, lo cual determinaría las pérdidas de mercurio durante el proceso y no la conversión del azogue en plata como creían buena parte de los mineros. **"Jamás he visto minero rico ni descansado y todo lo atribuyo a ese negro gasto o consumido del azogue"**.

### LA APLICACION DE AMALGAMAS A LA EXTRACCION DE PRODUCTOS DE MINA.

La existencia en Alemania de referencias escritas sobre el empleo de los métodos de amalgamación nos lleva a pensar que, en el caso de la plata, la paternidad de dichos procesos corresponde a este pueblo, a finales del siglo XV o principios del XVI. En las cartillas mineras germánicas, o **Probierebüchlein**, se explica como se recupera la plata y el oro de retazos de monedas, bordados de sombreros (oro argentífero) o de pinturas doradas. Estos metales se exponían a la acción del mercurio, que era dosificado junto a otros ingredientes, tales como cenizas calientes (carbonatos alcalinos), argol (heces de vino), etc.

En 1540, VANNUCCI BIRINGUCCIO (1480-1539) en **De la Pirotechnia**, rea-

(\*) E.T.S. Ing. Minas de Madrid-Inhigeo.

(\*\*) E.T.S. Ing. Minas Madrid.

cobre se generaría de la combinación de mercurio puro y azufre impuro. Asimismo el hierro se obtendría mediante la unión de azufre y mercurio impuros.

En España, uno de los antecedentes alquímicos es el **Libro del Tesoro**, supuestamente atribuido a ALFONSO X, EL SABIO. Recordemos que en esta obra se trata de la preparación de amalgamas, aunque como buen tratado de alquimia muestra un lenguaje hermético. Es probable que esta característica estilística se fundamente en la necesaria protección frente a la incompreensión del vulgo que asociaba la química a la nigromancia. AGRICOLA, en el Prefacio **De Re Metallica** sustentaba la idea que en este colectivo había un predominio de los farsantes: "...está claro que sus discípulos, o no entendieron sus reglas o, si las entienden, no las practican; porque si las comprenden, tantos discípulos como ha habido y hay, habrían llenado ya ciudades enteras de oro y plata". Aunque ALFONSO X en el **Lapidario** (1250) mantiene criterio opuesto: "...los que se ocupan de la alquimia, a la que llaman obra mayor, deben parar mientes para que no dañen el nombre del saber, pues alquimia tanto quiere decir como maestría para mejorar las cosas...".

El fin primordial de la alquimia no era otro que el descubrimiento del mítico agente transmutador, denominado "lapis philosophorum" (piedra filosofal) que, por contacto, transformaba los metales en oro. Narran MAFFEI, E. y RUA FIGUEROA, R. (1871) que a finales del siglo XIII, o principios del XIV, el alquimista ARLANDO DE VILLANOVA se dedicaba: "a la investigación de la piedra filosofal y a la transmutación del mercurio en oro, atribuyéndosele con este motivo algunos escritos y experimentos, ...". Según SIRO ARRIBAS JIMENO (1993) este autor obtuvo el óxido rojo de mercurio, el cloruro de mercurio y otros compuestos de dicho metal. La consecución del cloruro, para nosotros, indica un probable manejo de los ingredientes necesarios en los procesos de amalgamación.

Influído por las teorías medievales, ALONSO BARBA (1559-1662), en el **Arte de los Metales** (1640), Cap. XVIII, de acuerdo con las teorías de los alquimistas ("odioso nombre por la multitud de ignorantes, que con sus

**embustes lo han desacreditado")** señala que las materias constitutivas de los metales son el azufre y el azogue, adicionados en proporciones variables según la especie mineral considerada. Dicho autor fundamenta esta teoría, en el Cap. XIX, por la presencia de abundante azufre nativo y menas sulfurosas en las minas, así como por unas observaciones particulares suyas: al fundirse por plata el mineral de Challatiri, a cuatro leguas de Potosí, se liberaba mercurio nativo entre la parte menos caliente de las cenizas. Más adelante, en el Cap. XXIII, BARBA señala que: "...tiene tanta conveniencia la naturaleza del azogue con la de los metales, que aunque no es ninguno de ellos, es convertible en todos, no solo por ser uno de los principios que se compone, como los mas Filososfos afirman, y prueba la facilidad que con todos ellos se unen, è incorpora, sino también porque con toda su substancia se transmuta en metal verdadero".

Los griegos habían supuesto la existencia de diferencias sexuales entre los minerales, de esta forma "arsénicos" no significaba otra cosa que macho. Esta dicotomía entre las especies mineralógicas se traslada a los alquimistas, los cuales elaboraron la **teoría de los contrarios**, en la que se indicaba que unos elementos se oponían a otros, tal es el caso del azufre y el agua. De este modo, en la unión de opuestos se engendraban los distintos metales, en el interior del Globo.

En México, el filósofo y médico sevillano JUAN DE CARDENAS (1563-....), en la **Primera parte de los problemas y secretos maravillosos de las Indias** (1591), tal vez influido por las teorías de ULISES ALDROVANDI (1522-1605) Fig. 1, señalaba que los beneficios de amalgama se debían a simpatías y antipatías. Las simpatías determinarían la unión del azogue a la plata ("**entre la sal y la plata se halla alguna amistad y conveniencia...**"). Esta unión sería favorecida por el calor que le presta la salmuera, como podía aportárselo otro material caliente ("**se hecha no para que se abraçe con nadie, sino para que, como material caliente, sirva de dar calor y actuar el azogue y otrosí ayudar a recocer, fermentar y esponjar todo aquel metal, porque mejor lo pueda penetrar el azogue y abraçarse con la plata. De donde se infiere que si en lugar de sal, se hechase cardenillo o cal viva o**



Figura 1. Ulises Aldrovandi (1522-1605)

**solimán o otro material caliente, como no consumiese y destruyesse el azogue, haría tanto y mejor efecto que la sal, cuanto es material mas caliente").** La antipatía haría presencia entre el calor y el azogue, por su carácter contrario, lo cual determinaría las pérdidas de mercurio durante el proceso y no la conversión del azogue en plata como creían buena parte de los mineros. "**Jamás he visto minero rico ni descansado y todo lo atribuyo a ese negro gasto o consumido del azogue"**.

#### LA APLICACION DE AMALGAMAS A LA EXTRACCION DE PRODUCTOS DE MINA.

La existencia en Alemania de referencias escritas sobre el empleo de los métodos de amalgamación nos lleva a pensar que, en el caso de la plata, la paternidad de dichos procesos corresponde a este pueblo, a finales del siglo XV o principios del XVI. En las cartillas mineras germánicas, o **Proberbüch-lein**, se explica como se recupera la plata y el oro de retazos de monedas, bordados de sombreros (oro argentífero) o de pinturas doradas. Estos metales se exponían a la acción del mercurio, que era dosificado junto a otros ingredientes, tales como cenizas calientes (carbonatos alcalinos), argol (heces de vino), etc.

En 1540, VANNUCCI BIRINGUCCIO (1480-1539) en **De la Pirotechnia**, rea-

liza una recopilación de las técnicas de laboreo y concentración de menas, sentando en cierto modo las bases para el desarrollo metalúrgico en siglos posteriores. En esta obra se recoge un **Método de extracción de todas las partículas de plata o de oro de escorias de menas o de desperdicios de monedas, de batiduras de oro, de platero, así como del contenido de ciertas menas.** Tenemos la primera aplicación general de las amalgamas a materiales de mina y en particular a minerales de plata.

En el proceso de amalgamación descrito por BIRINGUCCIO se considera la adición de mercurio junto a otros reactivos, tales como sal común, vinagre o solución de sublimado y verdigris. El vinagre (ácido acético) suponemos serviría para limpiar la superficie de los granos facilitando la interacción entre mercurio y metal (de gran importancia en el caso de la plata). Por otro lado, el verdete o verdigris, probablemente acetato de cobre, sería un buen oxidante. Los romanos ya utilizaban el sulfato de cobre y la sal, junto a otras sustancias para separar el oro de la plata por fusión.

Según este autor, tras moler, lavar y secar las escorias de las fundiciones de minerales metalíferos y también, de forma directa, de las propias menas, el proceso de amalgamación es el siguiente: **"Se introduce en la tina el material que contiene oro,.... Mientras, se muele en dicho molino, se humedece el material con vinagre, o agua en la cual se haya disuelto sublimado, verdete y sal común. Se aplican dichos materiales con mercurio suficiente para cubrirlos: se agita durante una o dos horas, dando vueltas a la muela a mano o con caballerías, según sea el sistema aplicado. No se olviden que cuanto mas se restrieguen, mas absorberá el mercurio la substancia que los materiales contienen. Finalmente, hecho lo que se indica, se separará el mercurio de los residuos térreos, con un tamiz o por lavado, y se procede a la recuperación del mercurio. Este se libera con una pequeña cucúrbita (retorta), o bien se le obliga a pasar a través de una bolsa; y todo lo que queda en el fondo, oro, plata, cobre u otro metal, se echa en la tina para pulverizarlo bajo la rueda..."**

ALFONSO X, en el Libro del Thesoro cuenta como un egipcio llamado

MAIS le enseñó los secretos de la piedra filosofal, lo que le dió gran riqueza. En la poesía, en clave, donde describe lo anterior, nos ha parecido reconocer una técnica de amalgamación similar a la expuesta por BIRINGUCCIO, por coincidencia en los ingredientes que se aplican (PUCHE, O., 1995). Veamos el texto: **"Dos onzas de Oro juntad cimentando/ a una de Plata cendrada, e mui pura:/ fundid en crisol aquesta fechora:/ nueve de azogue le echad bien purgado/ despues con Vinagre, e Sal bien lavado/ ponedle otro tanto de Sal de comer/ tambien mesturado, ca aveis de facer/ que sea aquel cuerpo bien conglutinado"**. Pensamos que este texto desbanca las teorías de los que sostienen que el "mercurio filosofal" no es el mercurio nativo. Los alquimistas tenían el mercurio entre sus ingredientes básicos, los análisis por activación de cabellos de un miembro de este gremio, el rey CARLOS II de Inglaterra (1630-1685) señalaron la presencia de azogue, siendo posible que su muerte se debiese a una intoxicación aguda por este metal.

Otro autor del XVI que describe alguna técnica de amalgamación es GEORGE BAUER "AGRICOLA" (1494-1555) en **De Re Metallica** (1556). En el Prefacio de dicha obra señala como el embajador de Venecia, FRANCISCO BODARIO, le regaló el libro de BIRINGUCCIO. De esta obra copia diversos párrafos, pero sorprendentemente no recoge ninguna referencia sobre la amalgamación de la plata. En el libro VII se describe, por primera vez, un beneficio con preparación previa mediante quemado, en los ensayos de arenas o conglomerados auríferos procedentes de lavado, así como en los de polvo recogido por algún otro método. Por su importancia, haremos una transcripción literal: **"Una pequeña cantidad de él se humedece ligeramente con agua y se calienta hasta que comienza a despedir un olor, y entonces se añade a una porción de mineral dos porciones de azogue... Se mezcla juntamente con un poco de salmuera y se trituran con una mano de mortero...hasta que la mezcla tiene el espesor de una pasta y el azogue ya no se puede distinguir de los concentrados... Se lava el material (con agua templada) hasta que el agua fluye mas o menos limpia. Después de haber vertido agua fría dentro de la misma fuente, y rápidamente el azogue, que ha absorbido**

**todo el oro, se va uniendo y quedando a un lado, separando el resto de los concentrados hechos mediante lavado. El azogue se separa después del oro..."**. Los últimos pasos del proceso consistían en escurrir el exceso de mercurio apretando con una lona filtrante la pella, la amalgama que quedaba se purificaba en un crisol. También señala este autor como otros mineros realizaban el lavado con lejía y vinagre, mientras que otros no escurrían con lona, poniendo directamente la amalgama en una vasija de barro con tapadera de hierro que se sellaba, y posteriormente se colocaba dentro de un horno. Tras calentamiento el azogue se destilaba adheriéndose a las partes superiores y se recuperaba frotando con un trébol campestre. AGRICOLA indica que en este último método las pérdidas son mayores.

En el libro X también se describe la separación del oro de la plata mediante azogue, en objetos argentíferos dorados. El oro amalgamado: **"...se calienta con stibio (antimonio) en un crisol de tierra y se vierte a otro recipiente, por cuyo método el oro se deposita en el fondo y el stibio queda en la parte superior..."**

En definitiva AGRICOLA se mantiene, en la línea de lo expuesto en las cartillas mineras sajonas, sin introducir excesivas modificaciones. Este es el estilo de ERCKER (1574) y otros escritores alemanes posteriores. Sin embargo, la importancia de la obra de AGRICOLA consiste en su gran difusión e influencia que tuvo en los siglos posteriores.

#### IMPLANTACION DEL BENEFICIO INDUSTRIAL DE LA PLATA POR AMALGAMACION, EN LAS MINAS HISPANOAMERICANAS

Los ricos minerales auríferos y argentíferos americanos fueron inicialmente explotados cuando la mena aparecía como elemento nativo, ya que era la parte más superficial de los criaderos. El mineral de plata original depositado en yacimientos filonianos se conoce como mineral hipogénico o primario. Sin embargo, la mayoría de los grandes centros argentíferos de Hispanoamérica extraían menas secundarias, procedentes de las zonas de enriquecimiento de los filones, Fig. 2. En la parte superior de los yacimientos estaban los "pacos", que

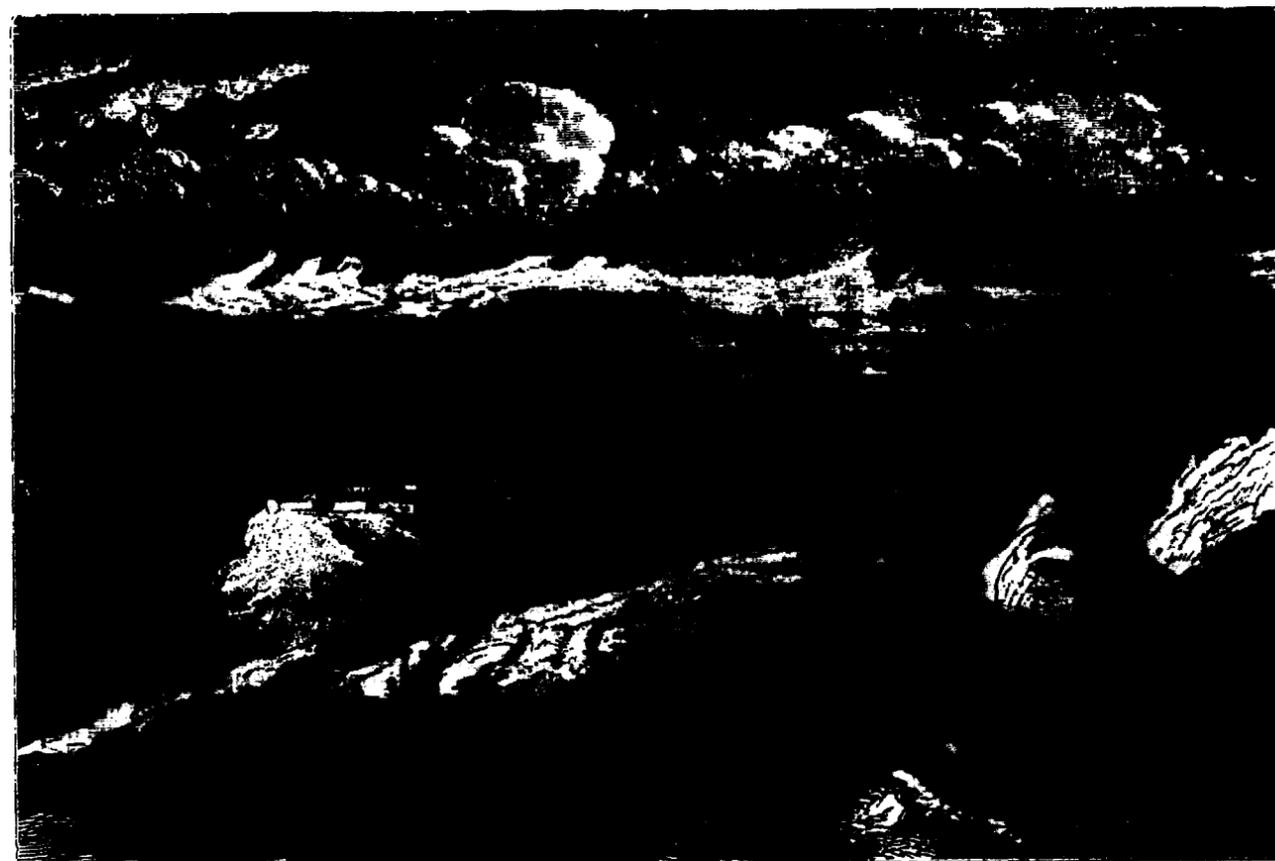


Figura 2. Mina argentífera del Cerro de Pasco (Perú) según SIMONIN, L. (1867).

contenían plata nativa, hidróxidos de hierro, así como otros minerales argentíferos asociados a restos de mineral primario. En Nuevo Méjico los "pacos" recibían el nombre de "colorados" por la presencia del hidróxido de hierro. Por debajo del nivel freático, en ausencia de oxígeno libre, se producía, según MESEGUER PARDO (1949), un enriquecimiento en sulfuros ("mulatos"), así como de sulfoarseniuros y sulfoantimoniuros ("negrillos"). Ejemplos de "negrillos" son los "soroche" (con plomo) o el "cochizo" o "rosicler" (que son las platas rojas).

Los cloruros, asociados a la plata nativa, al igual que ésta también eran más fácilmente refinados por fusión. En cualquier caso, se esperaba una mayor productividad a medida que aumentaba la profundidad. Pero se contaba con dos problemas: el complicado proceso de refinado de los sulfuros y sulfosales, así como el peligro

de inundaciones en las minas, una vez alcanzado el nivel freático. Parece ser que inicialmente los desagües se realizaron por socavón, norias, malacates y otros artilugios sencillos, pese a que en el Libro VI de Agricola aparecen representados diversos tipos de bombas de émbolo o "ctesibicas" (ya empleadas por los romanos). NICOLAS GARCIA TAPIA (1992) señala que estas bombas fueron introducidas por primera vez en las minas americanas por MIGUEL DE VIDAÑA y LUCAS PERES, en 1630, en las minas de Pachuca.

Quedaba, pues, por resolver la cuestión del aprovechamiento industrial de sulfuros y sulfosales. Es aquí donde se plantea la necesidad de un proceso alternativo: la amalgamación. Parece ser que la primera aplicación industrial de este proceso para la extracción de la plata se la debemos a BARTOLOME DE MEDINA (hacia 1554), inventor del beneficio de

patio, con el que se solventaron las dificultades antes expuestas.

Según LUIS BERRIO DE MONTALVO (1643) la amalgamación de la plata por azogue se la debemos al autor antes citado que la aplicó en Nueva España: **"...avrá ochenta años, Bartolomé de Medina puso en marcha, en las minas de Pachuca, sin mas arte que aver oydo dezir (a un alemán) en España, que con azogue y sal común se podía sacar la plata de los metales a que no se hallaba fundición"**. Por otro lado, señalar que BERRIO, al igual que otros autores de la época, mantiene las teorías alquímicas de la conjunción del azufre y el mercurio en la formación de los metales.

Según MODESTO BARGALLO (1955) el minero de Pachuca VAZQUEZ DE SALAZAR (1571) señala que Medina llegó a estas minas en 1553: **"...dió la primera orden del beneficio de los**



Figura 2. Mina argentífera del Cerro de Pasco (Perú) según SIMONIN, L. (1867).

contenían plata nativa, hidróxidos de hierro, así como otros minerales argentíferos asociados a restos de mineral primario. En Nuevo Méjico los "pacos" recibían el nombre de "colorados" por la presencia del hidróxido de hierro. Por debajo del nivel freático, en ausencia de oxígeno libre, se producía, según MESEGUER PARDO (1949), un enriquecimiento en sulfuros ("mulatos"), así como de sulfoarseniuros y sulfoantimoniuros ("negrillos"). Ejemplos de "negrillos" son los "soroche" (con plomo) o el "cochizo" o "rosicler" (que son las platas rojas).

Los cloruros, asociados a la plata nativa, al igual que ésta también eran más fácilmente refinados por fusión. En cualquier caso, se esperaba una mayor productividad a medida que aumentaba la profundidad. Pero se contaba con dos problemas: el complicado proceso de refinado de los sulfuros y sulfosales, así como el peligro

de inundaciones en las minas, una vez alcanzado el nivel freático. Parece ser que inicialmente los desagües se realizaron por socavón, norias, malacates y otros artilugios sencillos, pese a que en el Libro VI de Agrícola aparecen representados diversos tipos de bombas de émbolo o "ctesibicas" (ya empleadas por los romanos). NICOLAS GARCIA TAPIA (1992) señala que estas bombas fueron introducidas por primera vez en las minas americanas por MIGUEL DE VIDANA y LUCAS PERES, en 1630, en las minas de Pachuca.

Quedaba, pues, por resolver la cuestión del aprovechamiento industrial de sulfuros y sulfosales. Es aquí donde se plantea la necesidad de un proceso alternativo: la amalgamación. Parece ser que la primera aplicación industrial de este proceso para la extracción de la plata se la debemos a BARTOLOME DE MEDINA (hacia 1554), inventor del **beneficio de**

**patio**, con el que se solventaron las dificultades antes expuestas.

Según LUIS BERRIO DE MONTALVO (1643) la amalgamación de la plata por azogue se la debemos al autor antes citado que la aplicó en Nueva España: "...**avrá ochenta años, Bartolomé de Medina puso en marcha, en las minas de Pachuca, sin mas arte que aver oydo dezir** (a un alemán) **en España, que con azogue y sal común se podía sacar la plata de los metales a que no se hallaba fundición**". Por otro lado, señalar que BERRIO, al igual que otros autores de la época, mantiene las teorías alquímicas de la conjunción del azufre y el mercurio en la formación de los metales.

Según MODESTO BARGALLO (1955) el minero de Pachuca VAZQUEZ DE SALAZAR (1571) señala que Medina llegó a estas minas en 1553: "...**dió la primera orden del beneficio de los**

metales con azogue y con ello se ha sacado muy mayor suma de plata que se sacaba antes por fundición, y así casi todos deshizieron los ingenios a fundir e los hornos de ellos y armaron mazos para moler". Parece ser que el método propuesto por Medina progresó con rapidez. De esta forma, en 1562, existían sólo en Zacatecas 35 haciendas donde se practicaba la amalgamación.

La frase que recogimos de VAZQUEZ DE SALAZAR nos permite intuir la importancia de la molienda en este método. Pese a que no sabemos cuándo y cómo se inicia ésta, es necesario moler para liberar los granos e incrementar su superficie específica, favoreciendo así las reacciones químicas de la amalgamación. En algunos casos se iniciaba el proceso mediante la trituración manual con mazos y batanes, para posteriormente obtener una masa harinosa en molinos semejantes a los que en España se empleaban para moler aceitunas. Parece ser que también se usaban las atahonas o arrastras, consistentes en piedras voladoras, Fig. 3, que giraban, suspendidas desde arriba, sobre una solera, siendo generalmente movidas por caballerías. En Perú, FERNANDO MONTESINOS (1642) describe como las moliendas manuales fueron sustituidas por maquinaria más sofisticada, como las realizadas con un mecanismo cigñal-almadeneta (similar a los descritos en la obra de AGRICOLA).

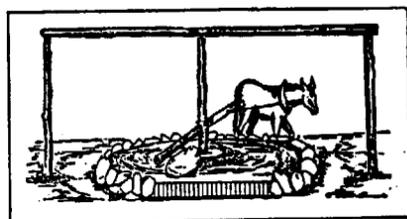


Figura 3. Molienda mediante arrastre, según FATHI HABASHI (1982)

La primera descripción del beneficio de patio se la debemos a JUAN DE CARDENAS (1591): "Toman el metal y muelenlo muy bien, y después amanzando con salmuera y encorporando con tantas libras de azogue, mas o menos según la ley del metal, y ya

después al cabo de algunos días (o meses) se presume aver dado el metal la ley, haze el minero lavar dicho metal y yéndose el barro y arena del metal con el azogue, queda como mas pesada en el fondo de la tina aquella massa o pella de plata, y azogue, después se aparta con fuego el azogue de la plata...".

De ésta y otras lecturas se deduce que el proceso de patio consiste en los siguientes y sucesivos pasos: Se inicia el proceso mediante trituración y molienda, luego venía el tamizado y obtención de la "harina", posteriormente se realizaba la formación de montones en un patio, sobre estos se añadía sal (NaCl) previo humedecimiento de la mena molida, posteriormente se ejecutaba la adición de "magistral" y a veces otros reactivos, seguidamente venía el aporte del azogue y la realización de los repasos o trillas de los montones (inicialmente a pie y luego con caballerías) hasta que los minerales de plata se aleaban con el mercurio. Cuando se pensaba que la amalgamación había terminado se pasaba al lavado, echando las tortas a una tina donde, por agitación, separaban las gangas (lamas, relaves, jales, jalsontes, etc.) de la pella o amalgama, luego se desazogaba la pella por destilación y, por último, en las Caxas Reales se fundían los metales desazogados.

Poco después de la puesta en marcha del método de Medina, hacia 1558, Mosen BOTELLER fue llamado desde México para que extrajese mediante amalgamación la plata de los minerales de Guadalcanal, en Sevilla. Todos los datos disponibles (molienda en tina, empleo de vinagre, etc.) llevan a pensar en la aplicación del método de BIRINGUCCIO o variante de éste, y no en la implantación del beneficio de patio. De todas formas, el método de Medina se fue imponiendo con rapidez y ha durado, con pequeños reajustes, más de tres siglos, hasta ser desplazado por los procesos de cianuración.

Los problemas del beneficio de patio consistían en el largo tiempo empleado y en la existencia de unas amplias pérdidas de azogue. Las mejoras realizadas irían por esta línea; según GARCIA TAPIA (1992), PEDRO GONZALEZ y DIEGO DE LEON buscan un sistema para ahorrar mercurio y ALONSO DE ESPINOSA trata que la

incorporación del azogue sea más rápida. Asimismo, se pasa del trabajo en patio, amalgamación en frío, a la amalgamación en caliente, mediante el aporte de calor, a la conjunción de mena y azogue, en artesas, es el método de cajones o buitrones, según probable invento de BERNARDINO DE SANTA CRUZ, mediante el cual se desarrolla con mayor presteza el proceso. Hacia 1560, MARTINEZ DE LEIVA alegaba gran reducción de tiempo en la amalgamación, tal vez recurriendo al calentamiento en estufas (método de las estufas). Respecto al otro punto considerado, la recuperación mayor de azogue, hay que resaltar el invento de la capellina o desazogadora, introducida por CAPELLIN, en 1576. También hubo mejoras en la preparación mineral mediante lavado (PEDRO DIAZ DE BAEZA) o molienda (RAIMUNDO DE NAPOLES o PEDRO DE REQUENA). Otros progresos se debieron a la aplicación de nuevos reactivos; JUAN DE SAN PEDRO destaca en el empleo de "magistrales" y PEDRO DE MENDOZA junto a PEDRO GONZALEZ TAPIA (1643) introducen el beneficio de barrilla (o agua de jarillas). Nuevas aportaciones se las debemos a BERRIO DE MONTALVO (1643) y a otros.

#### LA AMALGAMACION DE LA PLATA EN EL VIRREINATO DEL PERU

A finales del XVI, las minas de Potosí (descubiertas en 1545) producían el 50% de la plata mundial y buena parte de la del Virreinato de Perú. Inicialmente se explotaron por fundición; los españoles intentaron obtener el metal sin conseguirlo, siendo los indios mediante la fusión con sus "guayras" o "guayrachinas" y afino posterior los que se encargaron de ello. Como señala PEDRO CIEZA DE LEON (1553): "... porque grandes maestros han intentado de los sacar con fuelles, y no han prestado nada su diligencia; a fin como por todas las cosas pueden hallar los hombres en esta vida remedio; no les faltó para sacar plata..., lo hacían (los incas) con unas formas de barro, del talle y manera que es un albahaquero en España, teniendo por muchas partes algunos agujeros o respiraderos. En estos tal ponían carbón y el metal encima (plata de rica ley, con adición de galena que hacía de fundente); y puestos por los cerros o laderas donde el viento tenía mas fuerza,

sacaban dél plata, la cual apuraban y afinaban después con sus fuelles pequeños o cañones con que soplaban. Llaman a estas formas guayras, y de noche hay tantas dellas en todos los campos y collados que parecen luminarias...". Recordemos que wayra en quechua quiere decir viento.

En 1558, se envió a Nueva España al portugués ENRIQUE GARCES para que aprendiese el método de patio. A su vuelta se hicieron pruebas con éxito; sin embargo, el proceso de fundición funcionaba bien y no se sustituyó. Inicialmente se sacó mucha plata por este método, pero tal abundancia no duró mucho y se tuvo que introducir la amalgamación. Esto ocurre en 1571 o 1572, de la mano de PEDRO FERNANDEZ DE VELASCO, el cual diseñó, tras conocer las técnicas mexicanas, un beneficio de cajones, mediante amalgama en frío (SERRANO, C., 1994). Pensamos en un procedimiento similar al de las canoas que se realizaba en cavidades alargadas realizadas en el suelo.

En un dibujo ANONIMO, sobre la minería y metalurgia de Potosí, en 1584, de la Hispanic Society of America, comprobamos cómo tras la molienda, mediante almadenetas accionadas por energía hidráulica, se ejecutaba la amalgamación en zanjas, realizándose el lavado posterior de las pellas en tinas. Parece ser que los rendimientos del proceso no debían ser muy buenos, debido a la gran altitud (4146 m) y frío clima de esta población andina, por lo que se pasó enseguida a la amalgamación en caliente, empleando el método de los cajones, tal y como reconoce JOSE ACOSTA, en 1590: "... ponen el azogue en un saco y lo exprimen como rocío, sobre el metal, sobre el fuego con palas...".

El método fue perfeccionándose; así, en 1580, GABRIEL DE CASTRO y posteriormente, en 1586, el clérigo GARCIA-SANCHEZ propusieron el empleo de escorias de hierro, lo que ayudaba a la reducción de los cloruros argentíferos generados en la amalgamación. En 1587, en el valle de Tarapay, CARLOS CORZO Y LLECA y JUAN DE ANDREA, incorporaron hierro molido a un proceso en frío, obteniendo efectos similares que en el caso anterior, pero aumentando notablemente los rendimientos, ya que se ahorraba mucho azogue, lo que no

interesaba a la Corona, porque peligraban las rentas de Guancavelica (de todas formas estas mejoras y otras posteriores supusieron un gran "stock" mercurial que llegó incluso a hacer parar, a principios del siglo XVII, temporalmente la actividad de las minas mercuriales peruanas). En 1588, JUAN FERNANDEZ DE MONTANO usa por primera vez los "magistrales" en Perú, empleando en este caso concreto el "copaquiri" o sulfato de cobre (piedra azul de los lipez), aplicado en un procedimiento de buitrones. "Magistral", es un término ambiguo que no obedece a una única formulación, empleándose por los mineros para definir distintas sustancias minerales, tales como sulfatos de cobre, de hierro, de aluminio y otros compuestos (PUCHE, O., 1994). En 1590, ALVARO ALONSO BARBA, autor del *Arte de los Metales* (1640), cuya influencia se dejó sentir por más de dos siglos, inventó el método de cazo y cocimiento, proceso de amalgamación en caliente, realizado en calderos de cobre, mediante agitación mecánica (Lib. III, Cap. I) Fig. 4. En estos calderos se alcanzaban menores temperaturas y las pérdidas eran menores; asimismo, las paletas rotatorias ayudaban a la incorporación del azogue. En 1596, ante la escasez de hierro, DOMINGO GALLEGOS, empleó nuevos reductores para los cloruros de plata, se trata de estaño, cobre y plomo, metales más fáciles de conseguir en la zona.

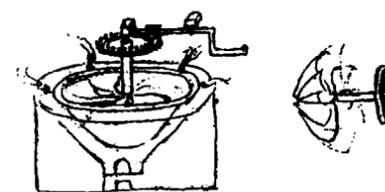


Figura 4. Agitador mecánico para amalgamación de Ayanz, según GARCIA TAPIA, N. (1992), este artilugio es anterior al método de cazo y cocimiento de BARBA.

Al aumentar la profundidad de la explotación, cambió la mena su composición y hubo problemas con la amalgamación de los "negrillos". En 1601, el Consejo de Indias solicita a JERONIMO DE AYANZ la resolución del problema, lo que se hizo añadiendo un "magistral" cobrizo y cal. El párroco ALVARO ALONSO BARBA,

nos indica que estos minerales hay que quemarlos para favorecer la molienda, eliminar impurezas y facilitar la incorporación del mercurio, Fig. 5.



Figura 5. Amalgamación en Potosí, según ARZANS y VELA, 1737

Al igual que en Nueva España la molienda se convirtió en algo necesario. En Potosí se organizó un complejo sistema hidráulico, con numerosas presas y canales, cuyas aguas accionaban enormes ruedas motrices de los sistemas empleados para la trituración y molienda.

En los minerales llamados "machacados", a diferencia de los "pacos", la plata nativa no era visible. BARBA (Lib. III, Cap. XVI) nos describe el método de tintín, descubierto por un franciscano, el cual consistía en mejorar la molienda para favorecer la acción mercurial sobre estos minerales.

Los azogueros señalaban la existencia de un consumo fijo de mercurio, en el proceso de amalgamación, que llamaban "consumido", a lo que habría que sumar unas pérdidas variables, de tipo mecánico, que llamaban simplemente "pérdida". Así GERONIMO GARAVITO (1636) nos da un "consumido" de un kilogramo de mercurio por kilo de plata producido, con "pérdidas" en torno al 25% del "consumido". Por supuesto, la cantidad de mercurio añadido lo marcaba la calidad de la mena, pero lo que se trataba era actuar de tal forma que se redujese el porcentaje de "pérdidas".

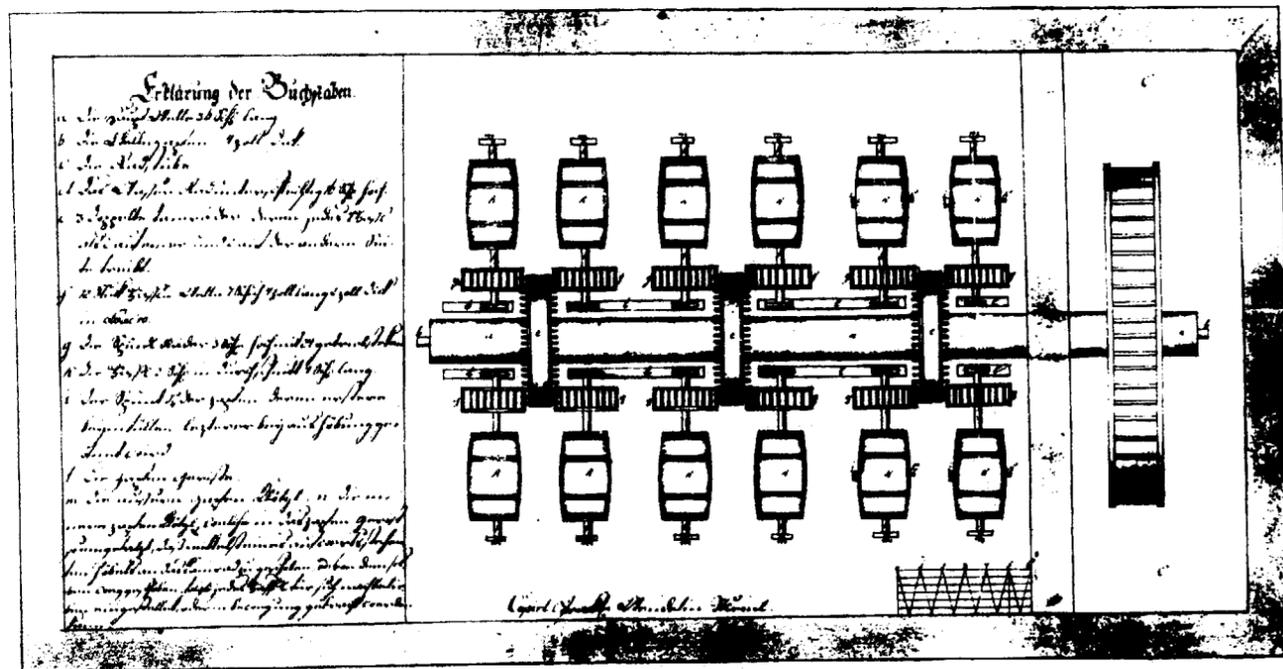


Figura 6. Plano del método de los toneles de amalgamación de IGNAZ VON BORN (1785) (Archivo General de Indias).

ANTONIO ULLOA (1792) reconoce que en muchas ocasiones se debían a una mala preparación de la mena, por no saber eliminar productos nocivos que acompañaban al mineral.

En Europa no hubo innovaciones de interés hasta que IGNAZ BORN (1785) mostrara, en la Casa de la Moneda de Viena y en presencia del Emperador, el célebre **método de los toneles de amalgamación**, donde se trataba de agilizar el proceso mediante la agitación mecánica en toneles. Para HUMBOLDT, WHITAKER y otros autores, BORN no hace más que redescubrir el método de BARBA, Fig. 6.

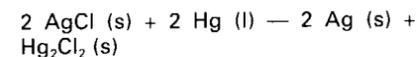
De todas formas, este último procedimiento no pudo ser introducido en América por el barón NORDENFLINCH, FAUSTO ELHUYAR y tantos otros, por diversas causas. Escribe FEDERICO SONNESCHMID (1925), en relación a este tema: **"A lo menos no tengo embarazo en declarar que con diez años de trabajos no he podido lograr introducir ni el beneficio del señor Born, ni otro método preferible al de patio, por mas arbitrios que he empleado... Conviene, por tanto, que se extienda su conocimiento en Europa, para hacer justicia a ese sobresaliente método que la erudición europea ha tratado con bastante**

**desprecio"**. Cuenta JOSE MESEGUER (1949) que las leyes de las menas americanas eran inferiores a las sajonas y, sin embargo, los rendimientos fueron muy elevados, lo que pone en evidencia la excelente explotación realizada. Sospechamos que el método de patio, lento de por sí, permitía, a pesar de todo, el tratamiento de menas de baja ley. El método de BORN daría buenos resultados con leyes mayores, ganando tiempo y productividad en el proceso.

LA QUIMICA DE LA AMALGAMACION DE LA PLATA.

Según nos recuerda ANTONIO ULLOA (1792): **"El beneficio de los metales necesita dos ingredientes fundamentales, que son el azogue y la sal"** Fig. 7.

En el caso de tener plata nativa la amalgamación se produce de forma sencilla, Fig. 8. La adición de la sal trae consigo la formación de cloruro de plata que reacciona exotérmicamente con el mercurio nativo, de la siguiente manera:



Sin embargo, lo normal es que la plata se muestre de otras formas, por ejemplo, como acantita o argentita ( $\text{Ag}_2\text{S}$ ), mineral típico en las menas mexicanas. En este caso, la reacción con la sal es lenta (recordemos la duración inicial del proceso de patio). El resultado final es la formación de un compuesto de plata reducible con mercurio:

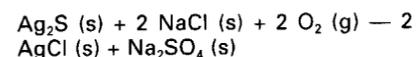


Figura 7. Metalurgia del mercurio en Hancavelica, según TADEUS HAENKE, a finales del XVIII (Archivo Real Jardín Botánico de Madrid).

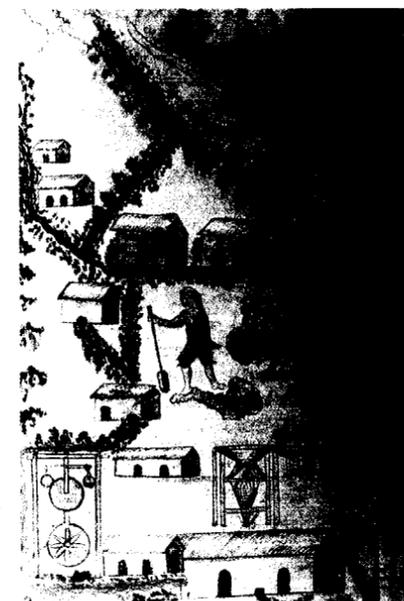
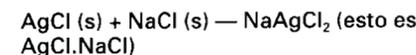


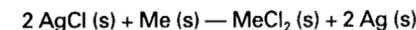
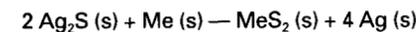
Figura 8. Metalurgia de la plata según dibujo de la colección Castañón (Biblioteca Palacio Real) reproducido por FERNANDEZ PEREZ, J. y MATILLA TASCÓN, I. (1990).

Por supuesto que hay infinidad de posibles reacciones, en función de la gran variedad de minerales presentes, en cada uno de los casos particulares, pero sólo vamos a considerar las situaciones más generales. Así, dentro de este esquema simplificado que se propone tenemos reacciones paralelas a la anterior, tales como la siguiente:



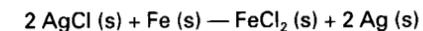
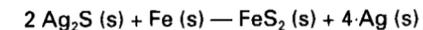
donde podemos apreciar la formación de un compuesto de plata reducible.

Otro de los procedimientos consiste en la aplicación de ciertos metales (hierro, cobre, plomo o estaño), según las reacciones genéricas siguientes:

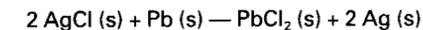


A finales del XVI, como ya se ha visto en el capítulo anterior, la reducción de

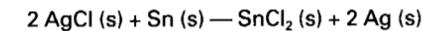
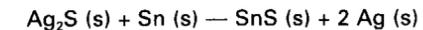
cloruros y sulfuros de plata se logra mediante la adición de hierro. Aunque, desde el inicio, a veces el hierro estaba presente, sin que el operario fuese consciente, tal es el caso de las herraduras de las caballerías (en el beneficio de patio), por la presencia de cajones de hierro, etc. Las reacciones son las siguientes:



Asimismo la adición de plomo, a veces procedente de la propia mena, tal es el caso de los soroches, y el aporte de estaño, suponen procesos de reducción de los sulfuros y cloruros de plata. Estos minerales llegaron a reemplazar al hierro, sobre todo en Perú, por que abundaban más. Las reacciones son las siguientes:



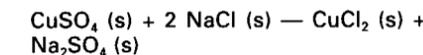
De igual forma ocurre en el caso del estaño:



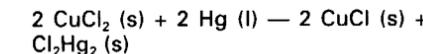
Reacciones similares se obtendrían con cobre nativo. Recordemos que en el método de cazo y cocimiento se emplean calderos de este metal.

Todas estas reacciones con metales (hierro, cobre, plomo o estaño) favorecen la reducción de los minerales argentíferos, como consecuencia que sus potenciales de oxidación normales en agua, a temperatura ambiente (25°C), son mayores que los de la plata. Además son reacciones exotérmicas, su energía libre de Gibbs es negativa, y por tanto son espontáneas. El aporte de estos metales como reductores se tradujo en un aumento notable de las velocidades de reacción, así como en el grado de recuperación de la plata; en consecuencia se incrementó la eficacia del proceso. Según PELAEZ LEYTON (1991), incluso se podía trabajar en condiciones de pH menos ácido, que influye en varios aspectos de gran interés. Así, al ser el pH mas alto, ya no era preciso que la mena cumpliera condiciones notables de acidez, proporcionadas por la exigencia de la presencia de sulfuros de hierro, que bajaban el valor del pH.

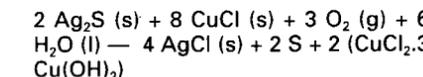
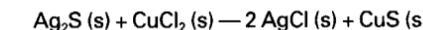
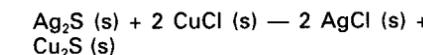
A mediados del XVII, aparece el empleo del magistral, producto secreto, constituido en muchos casos por sulfato de cobre, gran agente oxidante. El cobre acaba como cloruro, mediante las siguientes reacciones:



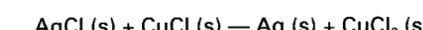
El cloruro formado reacciona con el mercurio produciendo cloruro de cobre monovalente:



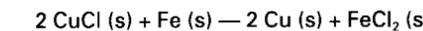
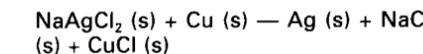
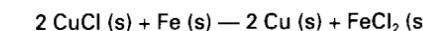
La argentita (o acantita) reacciona con estos cloruros, produciéndose el aislamiento de sulfuros de cobre:



El cloruro de plata formado, en su reacción con el cloruro de cobre, determina la liberación de plata nativa:



El hierro presente intervenía en la reducción del cobre de los cloruros y a su vez este metal ayudaba, como ya vimos, a la reducción de los sulfuros y cloruros de plata:



Cuando no se dosificaba bien el magistral, se podía tener un exceso de iones de cobre, y parece ser que esto era perjudicial. BARBA (Lib II, Cap. V) señala que: **"Las caparrosas...son enemigas del azogue y lo desbaratan..."**.

Por último, señalar que la adición de cal supone variados efectos, uno de ellos regular el pH, pero por otro el hidrato de cal recubre las menas, frenando las reacciones. RIVOT (1872) ha comprobado experimentalmente que: **"La presencia de cal en propor-**

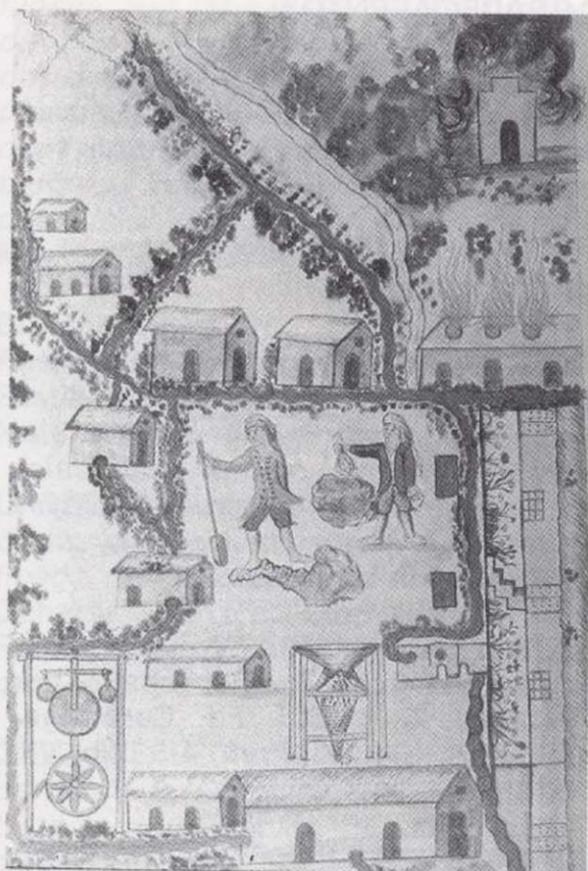
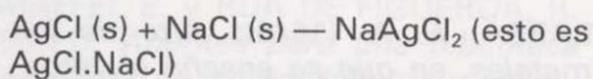


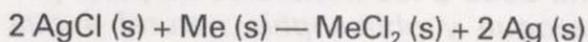
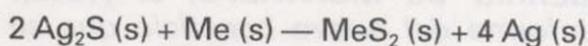
Figura 8. Metalurgia de la plata según dibujo de la colección Castañón (Biblioteca Palacio Real) reproducido por FERNANDEZ PEREZ, J. y MATILLA TASCÓN, I. (1990).

Por supuesto que hay infinidad de posibles reacciones, en función de la gran variedad de minerales presentes, en cada uno de los casos particulares, pero sólo vamos a considerar las situaciones más generales. Así, dentro de este esquema simplificado que se propone tenemos reacciones paralelas a la anterior, tales como la siguiente:



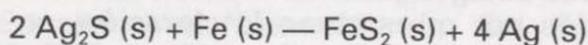
donde podemos apreciar la formación de un compuesto de plata reducible.

Otro de los procedimientos consiste en la aplicación de ciertos metales (hierro, cobre, plomo o estaño), según las reacciones genéricas siguientes:

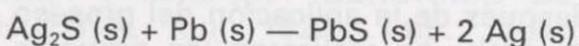


A finales del XVI, como ya se ha visto en el capítulo anterior, la reducción de

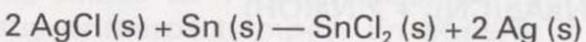
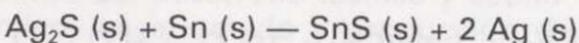
cloruros y sulfuros de plata se logra mediante la adición de hierro. Aunque, desde el inicio, a veces el hierro estaba presente, sin que el operario fuese consciente, tal es el caso de las herraduras de las caballerías (en el beneficio de patio), por la presencia de cajones de hierro, etc. Las reacciones son las siguientes:



Asimismo la adición de plomo, a veces procedente de la propia mena, tal es el caso de los soroches, y el aporte de estaño, suponen procesos de reducción de los sulfuros y cloruros de plata. Estos minerales llegaron a reemplazar al hierro, sobre todo en Perú, por que abundaban más. Las reacciones son las siguientes:



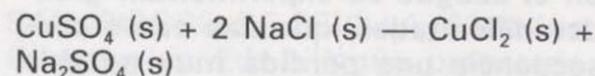
De igual forma ocurre en el caso del estaño:



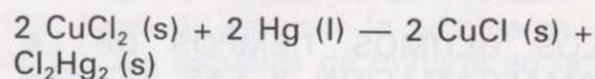
Reacciones similares se obtendrían con cobre nativo. Recordemos que en el método de cazo y cocimiento se emplean calderos de este metal.

Todas estas reacciones con metales (hierro, cobre, plomo o estaño) favorecen la reducción de los minerales argentíferos, como consecuencia que sus potenciales de oxidación normales en agua, a temperatura ambiente (25°C), son mayores que los de la plata. Además son reacciones exotérmicas, su energía libre de Gibbs es negativa, y por tanto son espontáneas. El aporte de estos metales como reductores se tradujo en un aumento notable de las velocidades de reacción, así como en el grado de recuperación de la plata; en consecuencia se incrementó la eficacia del proceso. Según PELAEZ LEYTON (1991), incluso se podía trabajar en condiciones de pH menos ácido, que influye en varios aspectos de gran interés. Así, al ser el pH más alto, ya no era preciso que la mena cumpliera condiciones notables de acidez, proporcionadas por la exigencia de la presencia de sulfuros de hierro, que bajaban el valor del pH.

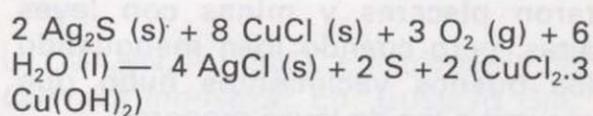
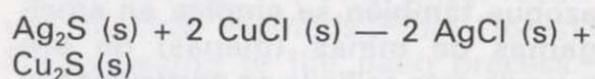
A mediados del XVII, aparece el empleo del magistral, producto secreto, constituido en muchos casos por sulfato de cobre, gran agente oxidante. El cobre acaba como cloruro, mediante las siguientes reacciones:



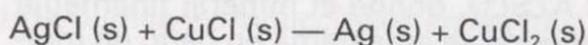
El cloruro formado reacciona con el mercurio produciendo cloruro de cobre monovalente:



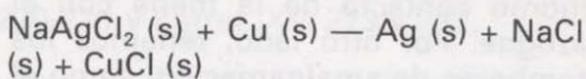
La argentita (o acantita) reacciona con estos cloruros, produciéndose el aislamiento de sulfuros de cobre:



El cloruro de plata formado, en su reacción con el cloruro de cobre, determina la liberación de plata nativa:



El hierro presente intervenía en la reducción del cobre de los cloruros y a su vez este metal ayudaba, como ya vimos, a la reducción de los sulfuros y cloruros de plata:



Cuando no se dosificaba bien el magistral, se podía tener un exceso de iones de cobre, y parece ser que esto era perjudicial. BARBA (Lib II, Cap. V) señala que: **"Las caparrosas...son enemigas del azogue y lo desbaratan..."**.

Por último, señalar que la adición de cal supone variados efectos, uno de ellos regular el pH, pero por otro el hidrato de cal recubre las menas, frenando las reacciones. RIVOT (1872) ha comprobado experimentalmente que: **"La presencia de cal en propor-**

ción notable, 10 por cien o mas, no se opone a la formación de amalgamas, y aun parece que la hace mas rápida, favoreciendo la diseminación del azogue; pero cuando al fin de la operación se trata de reunir las amalgamas en el azogue se experimentan grandes dificultades, que dan como consecuencia una pérdida muy notable del último, y la correspondiente de metales preciosos, que casi es proporcional a la de aquel...".

#### LOS ULTIMOS TIEMPOS DE LA AMALGAMACION Y LAS NUEVAS TECNICAS DE EXTRACCION DEL ORO Y DE LA PLATA

Según señala ULLOA, A. (1792): "El azogue también se emplea en amalgamas de minas (menas) de oro cuando este se halla en partículas tan diminutas que no se pueden recoger por fundición". Inicialmente se explotaron placeres y minas con leyes altas, pero cuando iban menguando los buenos yacimientos hubo de recurrir a los de leyes menores.

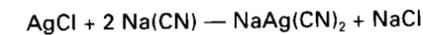
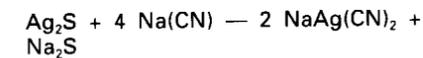
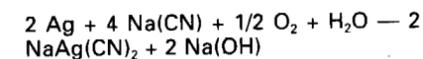
En el siglo pasado se mejoraron las máquinas mecánicas. Destacamos el diseño de molinos amalgamadores de oro como los de CRAWFORD o LAZSLO, donde el mineral finamente molido se amalgama en baño de mercurio mediante agitación mecánica. La ganga escapaba mientras los minerales más densos no podían salir, realizándose una completa reacción Au-Hg. También hay que considerar a las cubas de amalgamación, donde la forma de las aletas mecánicas (aletas de plancha) favorecía el íntimo contacto de la mena con el azogue. Por otro lado, tenemos los tambores de amalgamación, como el de COOK, donde el oro queda retenido, en parte, en chapas de cobre amalgamado, a la salida de los tambores. Placas amalgamadas y pilas mercuriales apuran el proceso.

No entraremos en el tema de tratamiento de las "pellas" o amalgamas de oro o plata. Tenemos los procesos de lavado en tinas (y escurrido o tamizado posterior, empleando telas), inicialmente manuales, luego con agitación mecánica, que dieron más modernamente paso a los lavadores o settlers. También los residuos de los lavadores se tamizaban en sacos o mangas de lona. Asimismo destacar el empleo de prensas para formar las

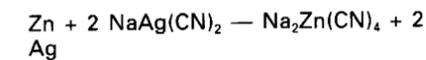
"piñas" o pellas compactas, haciendo salir el mercurio sobrante, y el tratamiento posterior con desazogadoras. Más modernamente las amalgamas se trataban en cubetas de fundición que eran llevadas a hornos de destilación.

En la Edad Contemporánea los procesos de amalgamación fueron sustituidos por otros como la cloración, en caso de menas auríferas libres de Fe, Zn, Pb y Sb, así como por la lixiviación con cianuros. Las reacciones industriales frente a las cuatro fiebres del oro posthispanas: California, Alaska, Sudáfrica y Australia, incentivarón en gran medida la aplicación de nuevos métodos.

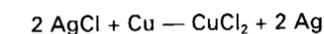
En las menas de oro suele haber algo de plata, que se obtiene en los procesos de cianuración como un subproducto. Asimismo, trescientos años después de la aplicación del proceso de patio, se realizaron las primeras concentraciones en molinos de cianuración. En ellos se tratan menas de plata (principalmente plata nativa, argentita o cloruros) de acuerdo con las reacciones siguientes:



La solución cuando es filtrada y separada de la ganga es tratada con Zn o con polvo de aluminio, lográndose la precipitación de la plata, según la reacción siguiente:

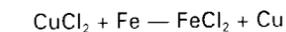


También se han impuesto otros métodos como el proceso Holt-Dern. Se realiza la tostación de la mena, ya preparada, con la adición de sal común. El residuo obtenido se ataca con sal y ácido sulfúrico, formándose cloruros de plata. Se añade cobre nativo y se reduce el cloruro:



plata impura que se refina en fundición.

El cobre añadido se elimina adicionando hierro:



#### AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a D. Alberto Navarro Izquierdo y a D. Juan Llamas Borrajo sus indicaciones y correcciones, de partes de este trabajo

#### REFERENCIAS

ACOSTA, J. (1590): *Historia Natural y Moral de las Indias, en que se tratan las cosas notables del cielo, y elementos, metales, plantas y animales dellas: y los ritos y ceremonias, leyes y gobierno, y guerras de los indios*. Imp. Juan de León. Sevilla.

AGRICOLA, G. (1556): *De re metallica*. Froben. Basileae. Trad. al español por ANDREU, C. (1992). Ed. Casariego-U.E.E.S.A. Madrid. Pref., 4-5, Lib. VII, 252-253 y Lib. X, 469.

ALFONSO X, REY DE CASTILLA (1982): *El primer Lapidario de Alfonso X el Sabio: edición facsímil del código h-1-15 de la Biblioteca de San Lorenzo el Real de El Escorial. El código y su texto por MARMA BREY, M., con comentarios científicos por AMOROS, J.L. Ciencia en el Lapidario, por AMOROS, J. L., 2 Vol. y 1 compl. Ed. Edilán. Madrid. T. I, 21-21 vuelta y T. Compl., 57.*

AMBROSIANUS, B. (1648): *Ulyses Aldrovandi Patricii Bononinsis Musaeum Metallicum in Libros IIII*. Ed. Marco Antonio Bernia. Bologna.

ARRIBAS JIMENO, S. (1993): El inquieto y desconcertante mercurio. *Química e Industria*, enero, 32-36, marzo 165-169, junio, 52-57 y diciembre, 42-47.

BARBA, A. A. (1640): *Arte de los metales, en que se enseña el verdadero beneficio de los de oro y plata por açogue. El modo de fundirlos todos, y como se han de refinar y apartar unos de otros*. Ed. de 1770, Imp. de la Vda. de Manuel Fernández. Madrid. Lib. I, Cap. XVIII, 34-35, Cap. XIX, 35-37 y Cap. XXIII, 60-61. Lib. II, Cap. V, Lib. III, Cap. I, 105-106 y Cap. XVI, 128-129.

BERRIO DE MONTALVO, L. (1643): *Informe del nuevo beneficio que se ha dado a los minerales de plata por azogue y filosofía natural á que reduce el methodo y arte de la minería, para escusar a todos la pérdida y consumido de azogue ya los artimo-*

*niosos, con las causas de que procede, que hasta hoy no se han alcanzado, de que resultará mayor ley de plata, y ahorro de costa; y poderse dar fundición a los metales secos sin perderse liga de plomo, ni el cosumido ordinario de la greta, ó almartaga*. México. Imp. Santo Officio.

BIRINGUCCIO, V. (1543): *De la Pirothecnia*. Ed. inglesa de SMITH C. S. y GNUDI, M. T. (1942), Lib. IX, Cap. XII.

CARDENAS, J. (1591): *Primera parte de los problemas, y secretos maravillosos de las Indias*. Casa de Pedro Ocharte. México. Lib. III, Cap. 2. Reimp. Alianza Ed., 1988, Madrid. 282 págs.

CIEZA DE LEON, P. (1553): *Primera parte de la Crónica del Perú, que trata la demarcación de sus provincias, la descripción de ellas, las fundaciones de las nuevas ciudades, los ritos y costumbres de los Indios, con otras cosas extrañas dignas de saberse*. Imp. Casa Martín Montesdoca. Sevilla.

GARAVITO, G. (1636): *Memorandum al Rey*. Brit. Lib. 1324.k.5 (23).

GARCIA TAPIA, N. (1992): *Del Dios del fuego a la máquina de vapor. La introducción de la técnica industrial en Hispanoamérica*. Ed. Ambito. Madrid. Pág. 235.

ESCOSURA, L. (1878): *Historia del tratamiento metalúrgico del azogue en España*. Ed. Escuela Especial de Ingenieros de Minas. Imp. y Fund. M. Tello. Madrid.

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. Cat. de San Isidoro de León, en *La Minería Hispana e Iberoamericana*, V. II, 14-18 y 128-129 y V. III, 245-246.

MESEGUER PARDO, J. (1949): El esfuerzo minero y metalúrgico de España en el Nuevo Mundo. *Bol. R. Soc. Geográfica*, V. XXXV, 339-369.

MONTESINOS, F. (1642): *Anales del Perú*. Reed. en 1906 por Victor Maurus. V. II, pág. 56.

PELAEZ LEYTON, J. (1991): El proceso de Bartolomé de Medina y su desarrollo en Potosí. *Bol. Soc. Geogr. Potosí*, 14, 16-43.

PLINIO, C. (Siglo I): *Historia Natural*. Trad. y com. por GERONIMO DE HUERTA, en 1629. Imp. Juan González. Madrid. Lib. XXXIII. Cap. VI, pág. 592 y Cap. VIII, pág. 595.

PUCHE, O. (1994): Influencia de la legislación minera, del laboreo, así como del desarrollo técnico y económico, en el estado y producción de las minas de Huancavelica, durante sus primeros tiempos. En *Minería y metalurgia. Intercambio tecnológico y cultural entre América y Europa durante el período colonial español*, 437-482. (Ed. CASTILLO, M.) en Ed. Muñoz Moya Montraveta. Sevilla-Bogotá.

PUCHE, O. (in litt.): La obra minera del Rey Sabio y las explotaciones de su tiempo. *I Jorn. sobre Minería y Tecnología en la Edad Media Peninsular*. León. Sep. 95.

PUCHE, O. y BOSCH, J. (in litt.): Apuntes sobre la minería visigótica. *I Jorn. sobre Minería y Tecnología en*

*la Edad Media Peninsular*. León. Sep. 95.

RIVOT, M. L. E. (1872): Nuevo tratamiento de las menas de oro y plata. *Revista Minera*, 23. Pág. 241.

SAN ISIDORO DE SEVILLA (634): *Las Etimologías*. Ed. bilingüe preparada por OROZ, J. y MARCOS CASQUERO, M.A. (1994). B.A.C. Madrid. Pág. 305.

SERRANO, C. (1994): Transferencia de tecnología y relaciones de intercambio. Caso de estudio: la amalgamación y las escuelas de minería en la colonia. *Papers XVIII INHIGEO Congress. Geol. Sci. in Latin American*. Campinas. Brasil. pág. 202.

THOMPSON, J. V. (1991): Silver recovery by older methods. From "forest fire" smelting to the patio process. The fascinating metallurgy of cindarella metal. *E. & M. Journal*. Jun.-91, 39-41.

ULLMANN, F. (1955): *Enciclopedia de Química Industrial*. Ed. Gustavo Gili. Barcelona. V. VII. Sec. IV, 404-407.

ULLOA, A. (1792): *Noticias americanas: entretenimientos físico-históricos sobre la América meridional y la septemtrional oriental de los territorios, climas y producciones en las tres especies vegetal, animal y mineral; con su relación particular de los indios de aquellos países, sus costumbres y usos, de las petrificaciones de cuerpos marinos, y de las antigüedades. Con un discurso sobre el idioma, y conjeturas sobre el modo con que pasaron los primeros pobladores*. Imp. Real. Madrid. Entret. XIV, 220-221 y Entret. XV, 223 y 232.

VENUCOPAL, B. y LUCKEY, T. D. (1978): *Metal toxicity in Mammals*, 2. Plenum Press, pág. 86.

# NORMAS DE PUBLICACION PARA LOS AUTORES

Los trabajos inéditos que se reciban para su publicación en el BOLETIN GEOLOGICO Y MINERO serán revisados por un Comité editorial que decidirá si procede su publicación.

Los autores deberán atenerse a las siguientes normas:

## Texto.

Se entregará paginado y mecanografiado a doble espacio por una sola cara y con amplios márgenes. Este texto se considerará definitivo, deberá venir leído por el autor y perfectamente puntuado y con las correcciones de las erratas de mecanografía que fuesen precisas. En él serán marcadas las fechas de recepción y aceptación.

Cuando en el trabajo se acompañen figuras, tablas y fotografías, el autor deberá dejar un pequeño espacio con indicación del lugar donde han de intercalarse, si es posible. En los originales de las mismas se reseñará el título del trabajo, así como el nombre de los autores.

Todos los trabajos en lengua española irán precedidos de un breve resumen en español e inglés o francés. Los de idiomas extranjeros lo llevarán en su idioma y también en español. Al final de los mismos, y en párrafo aparte, se incluirán las palabras clave, reservándose el último lugar para la localización geográfica, si la hubiere.

En todo momento los autores conservarán una copia del texto original y figuras.

## Idiomas.

Excepcionalmente podrán publicarse trabajos en otros idiomas (preferiblemente inglés o francés), siempre que abarquen temas sobre España y sean de autores extranjeros.

## Referencias.

Se incluirá al final de cada trabajo la relación de las obras consultadas por orden alfabético de autores, empleándose las normas y abreviaturas usuales.

## Parte gráfica.

La parte gráfica vendrá preparada para ser reproducida a las anchuras máximas de 80 mm. (una columna) y 170 mm. (doble columna). Se evitará en lo posible la inclusión de encartes, así como se reducirá a lo indispensable el número de figuras, tablas y fotografías. En las ilustraciones a escala, ésta se expresará solamente en forma gráfica, con objeto de evitar errores en caso de reducir el original. Todas las figuras irán numeradas correlativamente según su orden de inserción.

Las figuras serán originales y nunca copiativos, delineadas con tinta china sobre papel vegetal. Las tablas, bien presentadas para su reproducción fotográfica. Las fotografías serán positivos en blanco y negro sobre papel brillo y excepcionalmente en color (positivo en brillo o transparencia)

## Pruebas.

Serán enviadas a los autores para que realicen las correcciones de erratas de imprenta producidas en la composición, no admitiéndose modificación alguna, adición o supresión al texto original.

Las pruebas serán devueltas por el autor en el plazo máximo de diez días, pasados los cuales la Redacción decidirá entre retrasar el trabajo o realizar ella misma la corrección, declinando la responsabilidad por los errores que pudieran persistir.

Los originales de texto y figuras quedarán en poder de la Redacción.

## Tiradas aparte.

Se asignan 30 tiradas aparte con carácter gratuito por trabajo publicado. Cuando el autor desee un número mayor del indicado deberá hacerlo constar por escrito en las pruebas y abonar el precio de este excedente.

La Redacción del BOLETIN GEOLOGICO Y MINERO introducirá cuantas modificaciones sean necesarias para mantener los criterios de uniformidad y calidad del mismo. De estas modificaciones se informará al autor.

Toda la correspondencia referente a las publicaciones  
deberá dirigirse a:  
**Leopoldo Aparicio Ladrón de Guevara**  
Jefe del Servicio de Publicaciones  
Instituto Tecnológico Geominero de España  
Ríos Rosas, 23. 28003-Madrid

## 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  
DATE

FIRMA  
SIGNATURE

NOMBRE  
NAME  
NOM

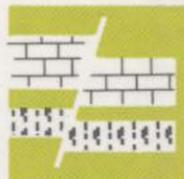
DIRECCION  
ADDRESS  
ADRESSE

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.

# 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