

ESTUDIO GEOLOGICO Y MINERO DE LOS DEPOSITOS DE ALABASTRO EN EL ENTORNO DE VELILLA DE EBRO Y AZAILA (ARAGON, NE DE ESPAÑA)

L. A. Díaz Rodríguez *

RESUMEN

Se estudian en este trabajo los principales yacimientos de alabastro (variedad «Transparente») que se comercializan en España y cuya localización se sitúa en el SE de la provincia de Zaragoza en la frontera con la de Teruel.

Estratigráficamente, los depósitos estudiados pertenecen, en el SE de la Cuenca Terciaria del Ebro, a la Unidad Tectosedimentaria (UTS) T₄ (Oligoceno Superior parte alta) y se sitúan dentro de la zona noroccidental del Sector Calanda-Valderrobres-Escatrón.

El reconocimiento minero realizado en el área confirma la presencia de tres niveles productivos de alabastro, descubriéndose una secuencia guía de la mineralización para el nivel superior (cota 250 m). La morfología de los cuerpos minerales es de tipo nodular, disponiéndose en capas de gran continuidad lateral (kilómetros) y con potencias medias explotables entre 0,40 y 1 m de espesor.

El estudio petrográfico de los cuerpos minerales de alabastro ha puesto de manifiesto tres tipos de microtexturas cuya observación, de techo a muro, teniendo en cuenta la columna estratigráfica general del área estudiada, es como sigue: a) alabastrinas de agregados microcristalinos; b) porfídico-alabastrinas de extinción no uniforme; y c) alabastrinas granoblásticas.

El medio sedimentario de los yacimientos es de tipo continental muy somero (playa-lago), en subambientes mixtos entre llanuras de barros y llanuras distales fluviales.

Palabras clave: *Alabastro, Cuenca Terciaria del Ebro, ambiente sedimentario playa-lago.*

ABSTRACT

This work studies the main alabaster («transparent» variety) deposits commercialized in Spain. These deposits are located in the province of Zaragoza, at its border with Teruel.

Stratigraphically, the quarried area is located at the SE border of the Tertiary Ebro basin (UTS: T₄, Upper Oligocene), and, within it, at the Calanda-Valderrobres-Escatrón sector.

Mining appraisals carried out sanctioned the presence of three productive levels of alabaster. A mineralization guide sequence was found for the upper level (height 250 m). The mineral body texture is nodular, arranged in layers of wide horizontal continuity (kilometers) and average thickness 0,4 to 1 m.

Petrographic studies of the alabaster mineral bodies have shown three types of microstructures. Considering the stratigraphic column of the area we found from top to bottom of each layer the following microstructures: a) microcrystalline aggregates; b) porphyroblastic microtexture with non uniform extinction of crystalline components; and c) granoblastic microtextures.

The sedimentary environment of the deposits was shallow continental type (playa-lake), characterized by mud-flats and distal fluvial-flats.

Key words: *Alabaster, Ebro Tertiary basin, playa-lake environment.*

* Instituto Tecnológico de Materiales de Asturias. Parque Tecnológico de Asturias. 33.428. Llanera. Asturias. España.

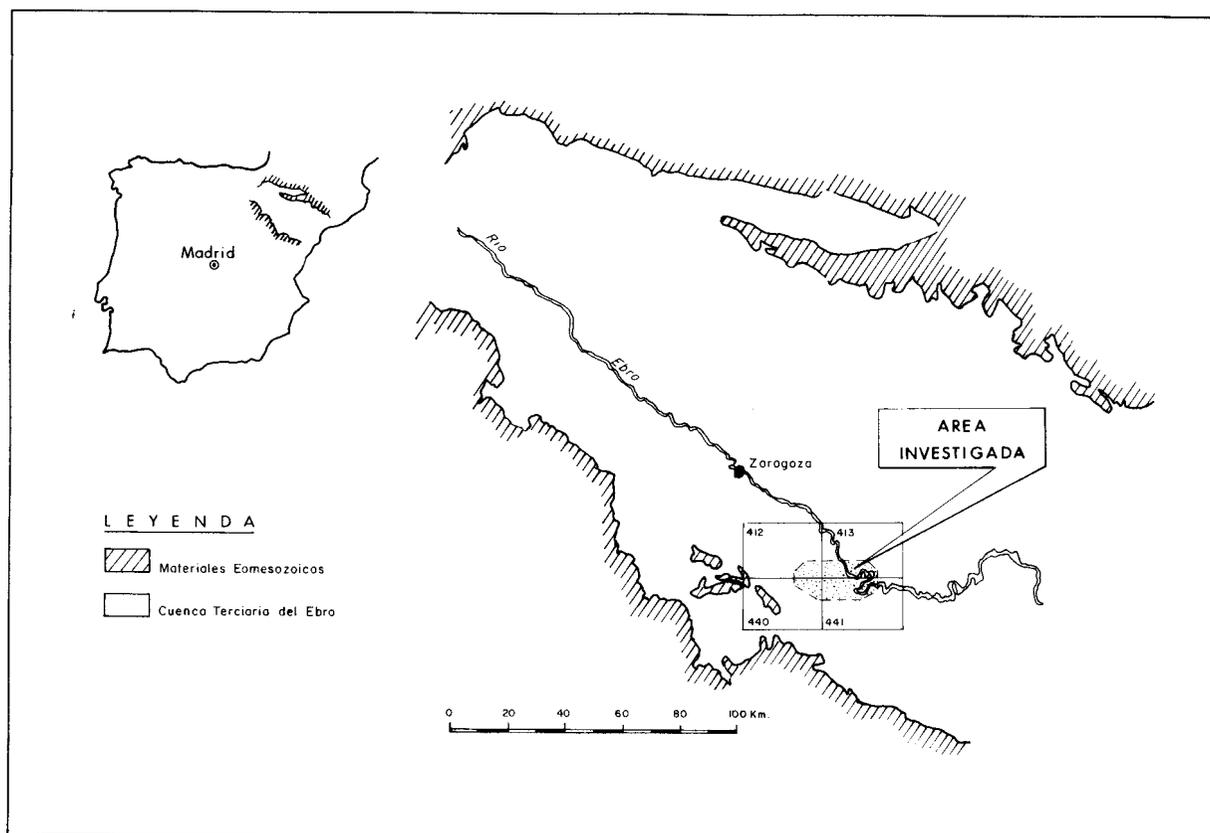


Fig. 1.—Situación geográfica del área investigada.

Introducción

El alabastro es un mineral industrial ornamental que en España goza de amplios antecedentes históricos en cuanto a su utilización artística. Los principales yacimientos españoles de alabastro, que son susceptibles de ser explotados, se encuentran en Aragón y entre las distintas variedades que se comercializan («Transparente», «Buñuelo», «Agata», etc.), en el entorno investigado predomina la más apreciada: la «Transparente».

La palabra alabastro, desde tiempos históricos, describe a dos minerales industriales totalmente diferentes: la calcita y el yeso; lo que ha contribuido, por ejemplo, que colectivos profesionales tan distintos como los arqueólogos y los geólogos apliquen su significado de manera diferente. Para aquéllos, alabastro es sinónimo de calcita, haciendo referencia a los antiguos vasos egipcios que conservaban los perfumes e incluso las vísceras de las momias, que estaban hechos de dicho mineral industrial ornamental. Para un geólogo, alabastro es una singular variedad de yeso microcristalino, de alta pureza y de aplica-

ción ornamental. En el trabajo de Díaz Rodríguez (1991) se pueden contrastar estos diferentes puntos de vista, sus orígenes, así como también una breve reseña histórica del uso del alabastro por las primeras culturas que poblaron la Tierra hasta la actualidad.

El área estudiada en esta investigación abarca aproximadamente unas 26.000 has. y geográficamente se encuentra a unos 60 km al SE de Zaragoza, frontera con la provincia de Teruel, dentro de las hojas: 412 (Pina de Ebro), 413 (Gelsa), 440 (Belchite) y 441 (Hijar), del Mapa Topográfico Nacional a escala 1/50.000 (fig. 1).

Para definir los niveles de alabastro susceptibles de ser explotados y conocer la columna estratigráfica general del área de estudio, se realizaron nueve sondeos situados escalonadamente en altura y repartidos de este a oeste. Mediante un detallado levantamiento de las columnas estratigráficas de cada sondeo, así como también por los cortes realizados, tanto en las canteras como en los afloramientos naturales, se realizó un bloque diagrama que refleja la distribución espacial de los cuerpos minerales. Además, se mues-

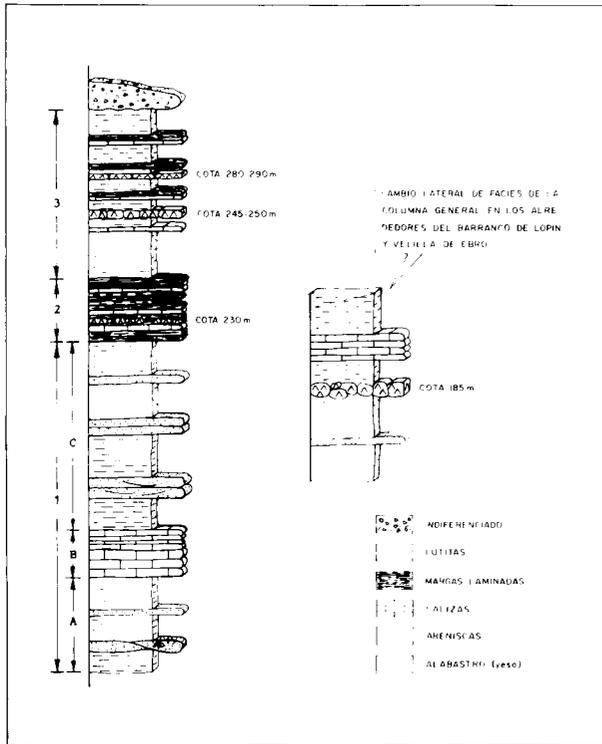


Fig. 3.—Columna estratigráfica general de la zona estudiada.

les de yesos nodulares alabastrinos y sacaroideos. Esta secuencia se localiza por todo el margen Este del río Ebro, desde el pueblo de Velilla de Ebro hasta las inmediaciones de Sástago, pasado el puente de esta localidad.

La parte superior del tramo 1, o también 1C, se caracteriza por la presencia de lutitas carbonatadas rojas con intercalaciones de areniscas cremas, relativamente potentes (hasta 3 m), con estructuras canaliformes y estratificación cruzada en surco. Esta secuencia se puede apreciar entre las localidades de Escatrón, Sástago y La Zaida, en su parte sur, hasta una cota aproximada de 210-220 m, que evoluciona hacia el noroeste de manera gradual, transformándose en lutitas rojas potentes, con nódulos de yeso secundario, y niveles de calizas, que se observan en la planicie al Norte del pueblo de La Zaida, cortadas por el Barranco de Lopín.

Tramo 2.—Este tramo, de unos 20 m de potencia, posee en su conjunto, bajo observación de campo, una coloración grisácea y se caracteriza por la alternancia de niveles margoso-limolíticos laminados, calizas fértidas y lutitas versicolores. En este tramo se localiza un nivel de alabastro que fue objeto de explotación tiempos atrás.

Tramo 3.—Aquí hay un predominio de las lutitas rojas frente a los bancos de calizas y margas limolíticas laminadas que también posee.

Los niveles meganodulares de yesos con textura alabastrina son frecuentes, siendo verdaderamente interesantes los que afloran en el talud de la carretera, al pie del pueblo de Azaila (Teruel), a una cota entre los 240-245 m, que son, a su vez, los que se explotan más al norte por parte de algunas empresas que poseen concesiones mineras en la zona.

Las calizas, más o menos margosas, conforman niveles tabulares de 0,5 a 1,5 m de potencia, con evidentes signos de bioturbación (perforaciones tubulares) que distorsionan la estratificación e

incluso se observan grietas de desecación y laminaciones algales (estromatolitos).

Todas estas estructuras sedimentarias corroboran las afirmaciones de autores como Mandado (1987) y González (1989), entre otros, de que dichos materiales se depositaron en un medio sedimentario tipo de «llanura de barros».

Sobre los niveles de calizas suele encontrarse un paquete, de hasta 1,5 m de potencia, de margas limolíticas laminadas con nódulos de yeso alabastrino, claramente secundario, en el que se observa estratificación cruzada en surco.

Como culminación, dentro de la columna estratigráfica general de la zona, los sedimentos cuaternarios recubren con coluviales los pies de los barrancos y con terrazas y aluviales las riberas del río Ebro. A medida que nos desplazamos al oeste de la zona investigada, un potente glacis cuaternario tiende a enmascarar los sedimentos terciarios existentes.

Descripción de los yacimientos, sondeos y guías de la mineralización

El área investigada concentra, en casi su práctica totalidad, uno de los más importantes afloramientos de alabastro de toda la Cuenca del Ebro y fuera de sus límites el mineral tiende a desaparecer o a variar una de sus propiedades físicas más notables: la translucidez.

El volumen de trabajos mineros dentro del área de estudio es notable y las canteras existentes se hallan en cotas muy variadas, desde las más elevadas, alrededor de los 280-290 m de altura e inactivas en la actualidad, en las cercanías del pueblo de Azaila (Teruel), pasando por los niveles extraídos a una cota aproximada entre 245-250 m, con alabastro de gran calidad y translucidez, que se beneficia actualmente, y también otro nivel (abandonado), a una cota de 230 m. Finalmente, al seguir descendiendo topográficamente en altura podemos encontrarnos, a una cota aproximada de 185 m, el último grupo de canteras donde se extraen los niveles de alabastro.

En la figura 3 se puede contemplar la situación de los niveles productivos de alabastro, anteriormente descritos, dentro de la columna estratigráfica general de la zona.

Atendiendo a la amplia variabilidad de facies que presenta el área de estudio, la correlación litológica es bastante problemática, sobre todo en lo que se refiere a los niveles de alabastro. Morfológicamente, los cuerpos minerales poseen un aspecto nodular y se disponen en capas de gran continuidad lateral (kilómetros). Las canteras situadas a una cota de 260 m benefician un alabastro con una morfología nodular-tabular, con tendencia paralelepípedica, y con una potencia entre 40-50 cm. Por contra, las canteras situadas a una cota de 185 m, en los alrededores del Barranco de Lopín y entre Velilla de Ebro y Alforque, presentan un alabastro en nódulos más redondeados, de grandes dimensiones (métricas), coalescentes entre sí y con textura fluidal internodular.

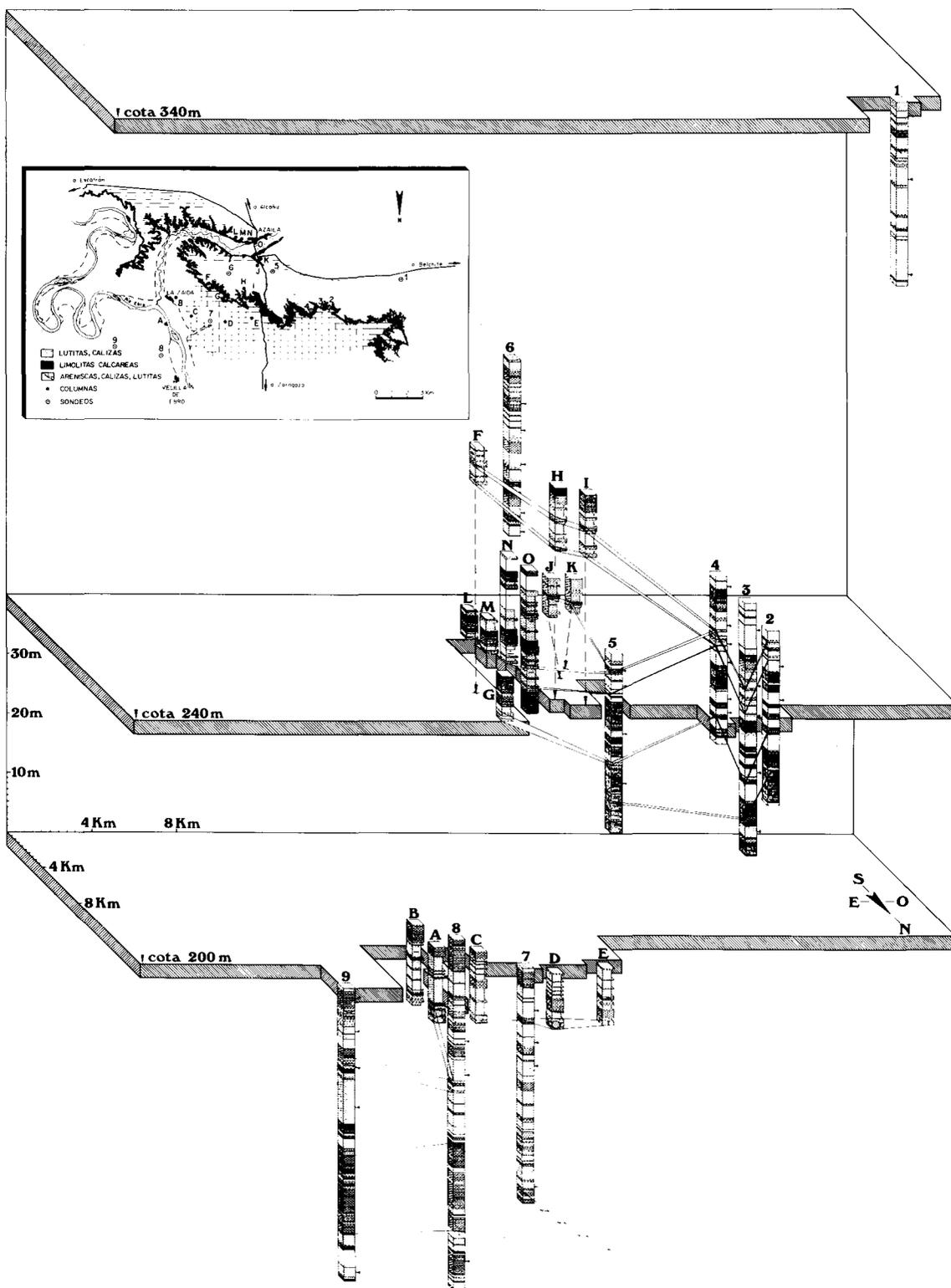


Fig. 4.—Situación geográfico-geológica del emplazamiento de los sondeos y representación tridimensional de las columnas estratigráficas, tanto de los testigos obtenidos como de los distintos afloramientos visitados. Se representa también una correlación entre los distintos niveles de alabastro encontrados.

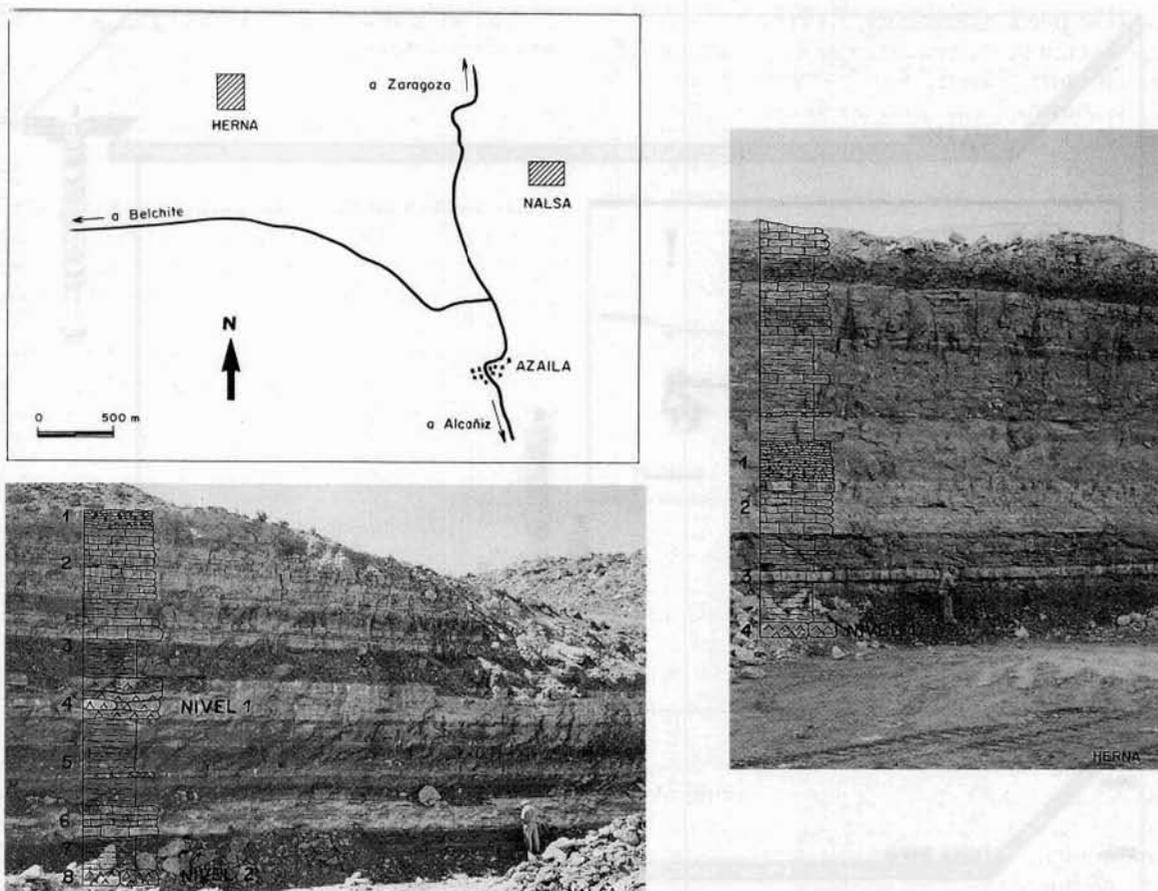


Fig. 5.—Situación geográfica de las canteras de alabastro de las empresas Herna y Nalsa, mostrándose sus frentes de explotación y el corte tipo de correlación establecido.

Esta difícil correlación litológica sobre el terreno de los distintos niveles mineralizados, se intentó paliar mediante una campaña programada de sondeos (en total nueve), cuyo promedio medio de perforación fueron los 40 m. En la figura 4 se puede observar la situación geográfica de los sondeos realizados.

Una vez que se conocen las cotas donde se explotan las canteras de la zona, se pueden establecer dos niveles interrelacionados entre sí. Uno, el nivel más elevado, a una cota de 230-260 m, correlaciona mutuamente los sedimentos perforados por los sondeos 2, 3, 4 y 5, juntamente con las columnas estratigráficas de campo a cotas similares. El segundo nivel, en cotas rondando los 200 m, correlaciona entre sí los sondeos 7, 8 y 9, junto con las columnas realizadas a pie de cantera. En la figura 4 se pueden observar tridimensionalmente estas correlaciones.

En cuanto a las guías de la mineralización, hay que decir que para las canteras que extraen alabastro a una cota aproximada de 250 m existe una secuencia

guía, que se detecta en el campo y es perfectamente observable en la carretera que asciende al pueblo de Azaila (Teruel). En dicho corte, se pueden apreciar dos capas de alabastro, de unos 25-30 cm de potencia, que en las canteras situadas más al norte de este lugar, como las de Herna y Nalsa, son visibles en sus frentes de explotación.

El corte tipo es litológicamente casi constante por los alrededores, siendo la secuencia, de techo a muro, la siguiente:

1. Limolitas calcáreas laminadas con nódulos de yeso.
2. Calizas tableadas crema.
3. Lutitas rojas con capas de calizas intercaladas.
4. *Nivel de alabastro 1* (canterable).
5. Lutitas rojas.
6. Calizas cremas.
7. Lutitas rojas.
8. *Nivel de alabastro 2* (canterable).
9. Lutitas rojas.

Como se puede comprobar al observar los frentes de explotación de las canteras Herna y Nalsa (fig. 5), separadas entre sí unos 2 km, la primera extrae el nivel de alabastro 1 (de unos 35-40 cm de potencia), mientras que la segunda extrae el nivel de alabastro 2, ya que el superior, en este lugar, ha variado sus características texturales y de potencia, apareciendo como una capa de yeso microgranular masivo que los canteros denominan vulgarmente como «salazón».

Las numerosas calicatas y canteras abandonadas que se observan por la zona, siempre rondando la cota de los 245-250 m, han intentado explorar y beneficiar esos dos niveles anteriormente descritos, de ahí el gran interés prospectivo que posee la anterior secuencia guía.

Por lo que respecta a las guías de la mineralización de los niveles de alabastro que se encuentran en cotas próximas a los 200 m, aquí no se puede ser tan preciso. Parece ser que existe una cota de explotación próxima a los 185 m, donde los niveles de alabastro, de gran desarrollo nodular, se hallan inmersos en lutitas rojas, existiendo a techo, generalmente, un conjunto de calizas que suelen coronar los relieves de los alrededores.

Los límites geográficos de la zona estudiada son bien significativos en cuanto a las posibilidades de acumulación-explotabilidad de los niveles de alabastro. Así, hacia el este y el sur, tanto las condiciones sedimentológicas (facies arenosas) como los propios límites del borde de la Cuenca del Ebro, no son buenas zonas para el seguimiento de los niveles de alabastro. En dirección a Zaragoza, nos adentramos hacia el centro de la Cuenca, en concreto hacia el núcleo de las formaciones salinas centrales donde no es frecuente la existencia de alabastro, que se suele concentrar en los bordes marginales o periféricos de aquellas formaciones (Ortí *et al.*, 1989), y así, al norte de Quinto de Ebro, entre los meganódulos de alabastro que se extraen en diversas canteras, es frecuente observar cristales seleníticos de yeso, siendo el alabastro que se comercializa por estas zonas y sus proximidades (Mediana de Ebro y Fuentes de Ebro) el de tipo «Buñuelo». Solamente hacia el W-NW del área estudiada parece que puedan seguirse los niveles de alabastro, aunque los recubrimientos cuaternarios dificultan su observación.

Los datos de extracción de alabastro para la zona de estudio, según datos recabados de los canteros y para el año 1992, fueron de aproximadamente 15.000 Tm, siendo el precio medio de venta, para la variedad de alabastro «transparente», de unas 45 ptas/kg.

La estimación de los recursos potenciales existentes dentro del área investigada (ITGE, 1991) es de unos 31 millones de Tm posibles y de unos 22 millones de Tm aprovechables, teniendo en cuenta que

del bolo de alabastro extraído se aprovecha un 70 % aproximadamente.

Petrología de las rocas sedimentarias del área de estudio

Las rocas sedimentarias existentes dentro del área investigada poseen una variada litología con el predominio, por orden de abundancia, de las lutitas, más o menos carbonatadas, las calizas y los niveles limolítico-areniscosos.

Los niveles limolítico-areniscosos son bastante frecuentes, ya que nos encontramos geológicamente en una zona con frecuentes interdigitaciones entre las formaciones evaporíticas orientales y la formación detrítica de Caspe (Quirantes, 1978). Dichos niveles están constituidos por clastos de cuarzo (tamaño arena fina-limo) y de calcita como componentes mayoritarios y poseen cristales de feldespatos, micas y minerales pesados. El cemento es carbonatado, preferentemente, yesífero y silíceo.

Las calizas están constituidas principalmente por micrita, presentando cierta estratificación ondulada siempre en sets no muy potentes (de 10 a 25 cm). Se observan estructuras estromatolíticas y niveles negruzcos fétidos a modo de aureolas elípticas dentro de las capas. En algunos tramos calizos son visibles signos de bioturbación (tubos irregulares de 1 mm \varnothing de promedio), restos de fósiles (gasterópodos) y grietas de desecación.

Los tipos petrográficos más característicos que se han observado, atendiendo a la columna estratigráfica general de la zona, son los siguientes:

Arenita yesífera: Está representada en las muestras de los sondeos 1 y 8 y está constituida mayoritariamente por clastos subangulosos de cuarzo (200-400 μ m) y por cristales subidimorfos de calcita de aproximadamente 200 μ m. Estos dos componentes mineralógicos están cementados por yeso monocristalino. Como minerales accesorios se pueden encontrar clorita, moscovita, feldespato potásico, alterado a sericita, plagioclasas, fragmentos de roca de naturaleza cuarcítica (muestras del sondeo 1) y calcita autigénica.

Calcarenita con cuarzo: Constituida por clastos subidimórficos de calcita, escasamente rodados, de unas 250 μ m de tamaño promedio, junto con cristales de cuarzo (10 %) angulosos y de tamaño similar a los de calcita. El cemento es micrítico y se pueden observar relictos de fósiles.

Limolitas calcáreas con nódulos de yeso: La textura más habitual de esta microfacies es la laminada, con niveles de limolitas que presentan granos subangulosos de cuarzo (< 30 μ m) y de calcita micrítica (fango calcáreo). Como componentes accesorios des-

tacan la clorita, la moscovita, en cristales prismáticos y orientados según la laminación, la turmalina y el circón. Entre los cristales de cuarzo, se aprecia sílice autigénica a modo de cemento. El yeso que se observa es de textura nodular y suelen apreciarse los relictos de la fase mineral anhidrítica o primaria, a la que reemplaza.

Limolitas calcáreas con pellets: Esta microfacies aparece en un tramo comprendido entre las cotas 240-260 m, aproximadamente, asociada a los niveles de alabastro existentes en dicho tramo. Los pellets posiblemente están relacionados con la destrucción de los niveles algáceos, reconocibles en aquel tramo, y cuya composición mineralógica es dolomítica.

Biodismicrita: Es la microfacies más habitual entre las rocas carbonatadas del área de estudio. Su composición es fundamentalmente micrítica con algún relicto de microesparita, asociada a los escasos fósiles presentes. Se aprecian también cristales de cuarzo en escasísima proporción.

Dismicrita: Las muestras poseen calcita microcristalina (80-90 %) con escasas recristalizaciones microesparíticas. Se pueden observar, en algunas preparaciones, cristales de yeso alotriomorfo ($\approx 80 \mu\text{m}$).

Análisis granulométrico, mineralógico y químico de las rocas arcillosas

En los sedimentos lutíticos, que suelen constituir la principal roca de caja de los cuerpos minerales de alabastro, se analizaron 44 muestras procedentes de los testigos de los sondeos que fueron sometidas a unos análisis granulométricos, mineralógicos y químicos, con el objeto de complementar la interpretación paleogeográfica del entorno estudiado.

El análisis granulométrico se realizó mediante tamización en húmedo, «Cyclosizer®» y «Sedigraph®». Los resultados obtenidos se exponen en la tabla 2 y reflejan un claro predominio de la fracción arcilla sobre los limos y con escaso porcentaje de la fracción arena.

Los intervalos granulométricos arena, limo y arcilla que se han considerado en este estudio se basan en los trabajos de Wentworth (1922).

El análisis mineralógico de los testigos de los sondeos se realizó con un difractómetro Philips (PW 1710), con rendija automática y un voltaje de 40 Kv y una intensidad de 40 mA. Se realizaron dos difractogramas de cada muestra (todo-uno y agregado orientado) y, cuando así lo requería la investigación, a los agregados orientados se les sometió a las clásicas pruebas de hinchamiento, con etilen-glicol, y de colapsamiento, por calentamiento a 550 °C durante dos horas. Para la fracción arcillosa se realiza una es-

timación semicuantitativa, de manera que se considera contenido bajo el menor del 30 % en peso, contenido medio al comprendido entre 30-50 %, contenido alto superior al 50 % y contenido muy alto por encima del 75 %.

En la tabla 2 se recogen los resultados obtenidos de los que se desprenden que los materiales investigados se depositaron en un medio de carácter mixto entre químico y detrítico, con series más o menos lutítico-margosas, yesíferas y carbonatadas, junto con materiales detríticos como el cuarzo y los feldespatos. Así, las muestras de los sondeos 7, 8 y 9 poseen, generalmente, una asociación tripartita de cuarzo, calcita y dolomita, como minerales principales no arcillosos, e incluso tanto la calcita como la dolomita tienden a ser más abundantes que el cuarzo. Los sondeos situados en cotas más elevadas presentan un mayor contenido de minerales detríticos (cuarzo y feldespatos).

Los minerales filosilicatados que se han identificado son: illita y esmectita (los más abundantes), clorita, caolinita y talco.

La illita se halla en la totalidad de las muestras analizadas, tanto como fase mineral principal como accesoria y se la puede considerar como un mineral arcilloso heredado de micas aportadas a la cuenca de sedimentación. Diversos autores (González Martínez *et al.*, 1986), en zonas próximas a la investigada, apoyan esta hipótesis. La illita es claramente predominante en los tramos 2 y 3 (parte superior) de la columna estratigráfica general del área de estudio.

La esmectita es de tipo dioctaédrico y posee una gran cristalinidad. Esta característica permite suponer que se trata de minerales de neoformación, como así ocurre en los materiales analizados por González Martínez *et al.*, (*op. cit.*) en los alrededores de Escatrón-Sástago. Aunque tampoco haya que desdeñar la posibilidad de que procedan de la degradación de illitas, representando episodios finales de alteración de cada ciclo de aporte de sedimentos a la cuenca cuando la alteración química es más intensa.

La caolinita es un mineral poco abundante y se relaciona su presencia con las litologías donde el aporte detrítico es notorio. Su presencia en niveles con facies de yesos, de marcado carácter químico, nos indica su gran estabilidad en las nuevas condiciones físico-químicas en las que se encuentra dentro de la cuenca.

La clorita es un mineral arcilloso escaso y de baja cristalinidad y su presencia se encuentra relacionada con la illita, la caolinita y el talco.

El talco se encuentra generalmente asociado a la clorita y aparece en forma de trazas. Se ha detectado en la parte alta del tramo 2, en la zona de tránsito con el tramo 3 y, también, en el sondeo 1. Se le puede considerar como un mineral heredado, acom-

pañando a otros minerales detríticos como el cuarzo y la caolinita, ya que la diagénesis temprana, si le hubiese afectado, tendría su reflejo en un aumento de la cristalinidad de otros minerales arcillosos y ello no ocurre. Como señala Weaver (1989), el talco suele presentarse con frecuencia en compañía de minerales anhidríticos.

Finalmente, *los análisis químicos* se realizaron por fluorescencia de rayos X, equipo Philips 1404, por espectrofotometría de absorción atómica (solamente para el Na, equipo IL-951) y por gravimetría (contenido en sulfatos), estando los resultados en la tabla 2.

De todo lo expuesto en este apartado se desprende que la evolución vertical de la secuencia sedimentaria existente en el área de estudio comienza con unos estadios de asentamiento de facies lacustres, relativamente someras, con procesos de dolomitización, precipitación de yeso y nódulos de anhidrita, y aportes detríticos de cierta potencia, con estructuras arenosas canalizadas, colmatadas por sedimentos finos (lutitas). Por progradación, y sobre los materiales anteriores, se depositan limolitas finamente laminadas en un medio somero y de carácter reductor, sobre las que se vuelven a depositar, por un efecto de regresión, sedimentos lacustres secuenciales (lutita, caliza, limolita). Hacia los niveles superiores, dentro de la serie general de la zona, en cotas de los 320 m, los aportes detríticos vuelven a ser nuevamente evidentes (sondeo 1).

Petrología de las rocas sulfatadas

En general, atendiendo a los mecanismos diagenéticos que intervienen en la génesis de los minerales evaporíticos sulfatados, las estructuras y texturas que se han podido observar en el área de estudio, tanto macroscópica como microscópicamente, son de dos tipos: primarias y secundarias.

Entre las estructuras primarias observables destaca la de tipo detrítica, representada por las arenitas yesíferas detectadas en los sondeos 1 y 8, en cuyas muestras, a través del microscopio de polarización, se aprecia como los clastos detríticos (cuarzo y calcita fundamentalmente) están cementados por yeso monocristalino y con continuidad óptica, que se ha generado por precipitación química de una solución saturada y en condiciones diagenéticas tempranas. También, en las láminas delgadas de las calizas de diversos sondeos (n.ºs 3, 4, 8, 9) se han detectado yesos lenticulares, que *de visu* proporcionan a la roca caliza un aspecto picoteado (porosidad móldica) debido a la disolución de los cristales de yeso.

Entre las estructuras y texturas de tipo secundario, se describirán solamente las referentes al yeso secundario, que es la única fase mineral sulfatada cálcica

(salvo escasos relictos de anhidrita) que se ha detectado en la zona de estudio, y cuyas variedades petrográficas son (Ortí, 1977):

- a) Yeso porfidoblástico.
- b) Yeso alabastrino.
- c) Yeso megacristalino.

La estructura principal de tipo secundario en el yeso investigado es la nodular, cuyo carácter secundario se ha comprobado mediante las observaciones de campo (deformaciones de estratos en contacto con la mineralización yesífera y venas de inyección, producidas por el exceso de yeso originado en los procesos de hidratación, que fractura el sedimento circundante) y los estudios microscópicos (presencia de relictos de anhidrita).

Por otra parte, siguiendo la nomenclatura de Mandado (1987), la estructura nodular del yeso secundario existente en el área investigada presenta las siguientes variedades:

- a) *Estructura nodular discontinua*. Hace referencia al aislamiento o dispersión que presentan los nódulos yesíferos en el seno de los materiales lutíticos, en los que se hallan inmersos. Esta estructura es bastante frecuente en el área, sobre todo en los niveles más inferiores de la columna general de la zona y de manera particular asociada a los niveles de lutitas rojas.
- b) *Estructura nodular en empalizada*. Los nódulos yesíferos presentan una elongación pronunciada en la vertical. Esta estructura no es tan frecuente como la anterior y se ha observado en los alrededores del pueblo de Azaila.
- c) *Estructura nodular «en turrón»*. Es un término equivalente a la denominación inglesa «chicken wire» y constituye la estructura predominante dentro de la zona estudiada.

Del estudio microscópico de las muestras sulfatadas obtenidas de los testigos de los sondeos, se puede establecer una diferencia textural por agrupación de los mismos.

Así, los sondeos 2, 3, 4, 5 y 6 (Grupo 1) se engloban dentro de un conjunto en el que las texturas que se observan presentan microtexturas alabastrinas de agregados microcristalinos, de 20-25 μm de tamaño promedio (fig. 6A), existiendo algunas preparaciones microscópicas en las que se observan cristales subidiomorfos (fig. 6B) y porfidoblastos alotriomorfos (fig. 6C), aislados en el seno de una matriz microcristalina.

El otro grupo de sondeos (n.ºs 7, 8 y 9) (Grupo 2) presentan texturas porfídico-alabastrinas, donde abundan los cristales de yeso prismático subidiomorfos en el seno de una matriz microcristalina (fig. 6D), texturas alabastrinas de extinción no uni-

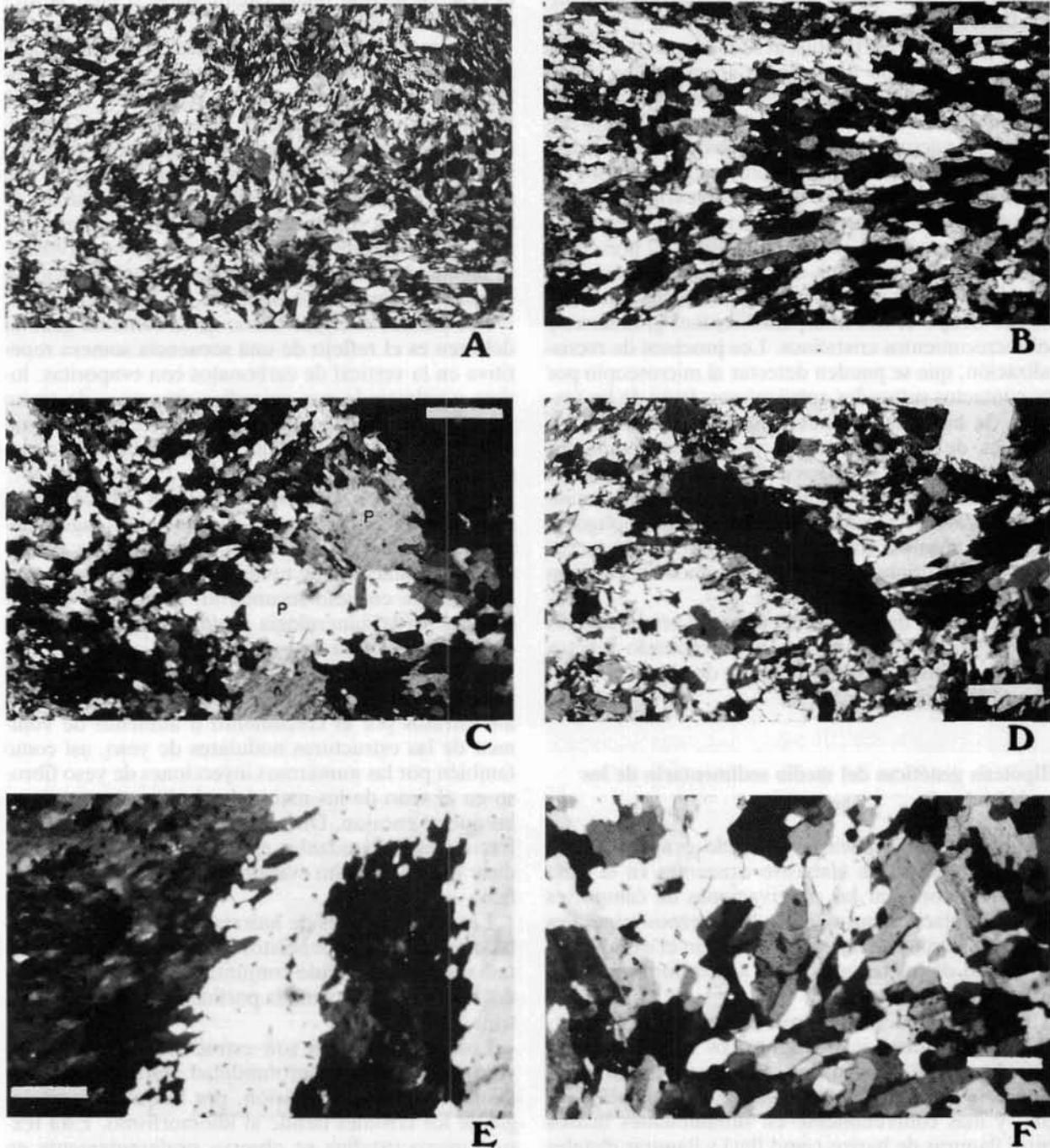


Fig. 6.—Microfotografías de las diferentes texturas de muestras de alabastro procedentes de los testigos de los sondeos. A) Microtextura alabastrina de agregados microcristalinos (sondeo 3); B) Microtextura alabastrina con cristales subhedrales ligeramente orientados (sondeo 4); C) Microtextura alabastrina con porfidoblastos alotriomorfos (P) (sondeo 6); D) Grandes cristales de yeso porfidoblástico en el seno de una matriz microcristalina (sondeo 7); E) Componentes cristalinos con extinción no uniforme (c.e.n.u.) que muestran contactos suturados poligonales fruto de fenómenos de recristalización (sondeo 7); F) Microtextura alabastrina granoblástica con cristales heterométricos (sondeo 9). Barra de escala 500 µm.

forme (c.e.n.u.) (fig. 6E), en la que los componentes alabastrinos fundamentales son los cristales de extinción no uniforme (c.e.n.u.), y microtexturas alabastrinas granoblásticas, muy frecuentes en los testigos de los sondeos 8 y 9 (fig. 6F).

Los cristales porfidoblásticos observados en los sondeos del Grupo 1, en líneas generales, se sitúan en los bordes del megánodulo de alabastro y en las proximidades de poros y fisuras. Se aprecia, bajo observación microscópica, una paulatina disminución del tamaño de grano hacia el núcleo del nódulo, indicándonos que el proceso de alabastrización ha sido centrípeto, es decir, de afuera hacia dentro.

Los testigos de los sondeos del Grupo 2 presentan evidencias microscópicas de haber estado sometidos a un cierto grado de recristalización, no apreciada en los del Grupo 1, con interpenetraciones granulares y sobrecrecimientos cristalinos. Los procesos de recristalización, que se pueden detectar al microscopio por los contactos suturados entre granos, fruto de las texturas de hidratación directa, se manifiestan en los cristales de gran desarrollo morfológico como los c.e.n.u. (fig. 6E). En éstos es frecuente ver cómo los individuos cristalinos que los conforman tienden a individualizarse y a generar un cierto límite poligonal entre los mismos. En estadios posteriores de recristalización se originan las texturas granoblásticas, con cristales equidimensionales (fig. 6F).

Finalmente, dentro de las diversas preparaciones microscópicas estudiadas, se han detectado relictos de cristales aislados alotriomorfos, de aspecto esquelético, de celestina (SrSO_4).

Hipótesis genéticas del medio sedimentario de los yacimientos

Para intentar explicar un modelo genético válido con los depósitos de alabastro existentes en la zona es preciso conjugar las observaciones de campo, es decir, la relación mutua entre los cuerpos minerales y los sedimentos encajantes, junto con el estudio petrográfico de las texturas y las asociaciones minerales encontradas.

Todos los análisis de campo efectuados nos confirman que los depósitos evaporíticos que se encuentran dentro de la zona investigada se generaron en un medio continental muy somero, de tipo «playa-lago», y más concretamente en subambientes mixtos entre llanuras de barros (mud flat) y llanuras distales fluviales. Así, atendiendo a la columna estratigráfica general de la zona, hasta una cota aproximada de 220 m, se aprecian potentes acumulaciones de lutitas rojas, con episodios evaporíticos nodulares, e intercalaciones de calizas que suelen contener cristallitos de yeso, propio de condiciones supramareales den-

tro de la zona de depósito. A su vez, por toda la parte SE del área investigada abundan los lechos arenosos de morfología canalizada, que evolucionan hacia el NW perdiendo dicha canalización o bien la atenuan.

El tramo 2 de la columna general presenta evidencias de haber estado sometido a una mayor influencia de la acción tractiva de las corrientes, lo que se traduce en un mayor aporte de terrígenos al medio, con clastos limolíticos, entremezclados con una matriz micrítica, finamente laminados. También son abundantes las calizas micríticas grises-negruzcas, ricas en materia orgánica (pellets y construcciones algáceas), de medios muy someros y bajo una constante lámina de agua. Son frecuentes las nodulizaciones de yeso, originalmente anhidrita, de tipo secundario.

Por último, el tercer tramo de la columna general del área es el reflejo de una secuencia somera repetitiva en la vertical de carbonatos con evaporitas, lutitas y colmatada por episodios arenosos, de grano muy fino, propia de ambientes mixtos entre intermareales y supramareales dentro de la «sabka» de depósito.

Los minerales evaporíticos que se originaron en este ambiente sedimentario de tipo «playa-lago» fueron anhidrita y yeso, que por los posteriores procesos de hidratación que tuvieron lugar, transformaron la anhidrita en yeso secundario, incluido el alabastro, que es la mineralogía preferencial que se aprecia en todo el área de estudio.

Los procesos de hidratación acaecidos se manifiestan sobre el terreno al observar las deformaciones de los estratos por el crecimiento o aumento de volumen de las estructuras nodulares de yeso, así como también por las numerosas inyecciones de yeso fibroso en el seno de los materiales lutítico-margosos en las que se encajan. Dichas estructuras nodulares, tan frecuentes y abundantes en el área, nos vienen a indicar que el depósito evaporítico original fue anhidrítico.

Las distintas fases de hidratación a las que han estado sometidos los depósitos evaporíticos del área estudiada han producido conjuntamente, y por separado, microtexturas como la porfidoblástica y la alabastrina.

Los porfidoblastos son estructuras cristalinas de yeso que crecen en profundidad (Ortí, 1977), mediante una lenta nucleación, por lo que la morfología de los cristales tiende al idiomorfismo. Esta textura microcristalina se observa preferentemente en los niveles de alabastro de los sondeos 7, 8 y 9, que son los que estratigráficamente se encuentran a cotas más bajas.

La textura alabastrina es la más abundante dentro de la zona y se ha producido por una hidratación brusca de la fase anhidrítica primaria, que origina

cristales alotriomorfos fuertemente interpenetrados. Este tipo brusco de hidratación suele verificarse en condiciones más próximas a la superficie, siendo, entre otros, la temperatura (profundidad) y la disponibilidad de agua los factores básicos que controlan la presencia de los distintos tipos petrográficos de hidratación.

Se ha podido comprobar una secuencia idealizada de progresiva hidratación, dentro de la columna estratigráfica general de la zona de estudio, en las muestras de alabastro de los sondeos efectuados en diferentes cotas. Así, se pueden contemplar al microscopio abundantes porfidoblastos y cristales c.e.n.u. en los sondeos 7, 8 y 9 y a medida que ascendemos de cota, sondeos 6, 5, 4, 3 y 2, predominan los agregados microcristalinos alotriomorfos. Todo ello nos indica que se han producido unos hipotéticos procesos de hidratación, desde condiciones próximas al equilibrio hasta una desorganización total, en el proceso de nucleación de los microcristales de yeso, por la infiltración de aguas subterráneas y la rápida emersión de los niveles anhidríticos originales, todo ello relacionado, muy posiblemente, con el descenso del nivel de base del río Ebro.

El modelo de hidratación concéntrica es el que se ha verificado fundamentalmente en la zona de estudio y se produce por la acción de un fluido diagenético (aguas connatas y de infiltración), que aprovechando las discontinuidades y zonas de permeabilidad que rodean al mineral anhidrítico precursor (morfología nodular), provoca un frente de hidratación desde el exterior al interior del nódulo.

En el área de estudio, concretamente los meganódulos que se explotan en los alrededores del Barranco de Lopín, se puede observar su carácter coalescente y la textura fluidal de los sedimentos que los envuelven, cuyas discontinuidades han contribuido a la penetración de las aguas de hidratación. Por otro lado, es habitual observar bajo el microscopio, en la mayoría de los nódulos de los testigos muestreados, cristales porfidoblásticos por todo el entorno exterior y a medida que nos introducimos en el núcleo se transforman en tamaños micrométricos (textura alabastrina).

Para este tipo de modelo, el mecanismo de hidratación, según Holliday (1970), sería por solución-precipitación, como así lo indican las frecuentes venas de inyección, que representan a los excedentes de volumen de la nueva fase mineral originada (yeso), y los cristales esqueléticos de celestina, en los intersticios de la matriz yesífera, siempre a partir de la fase anhidrítica primaria (Mandado, 1987).

El mecanismo de aporte de sulfato al medio sedimentario en el que precipitan los minerales evaporíticos podría recaer en el denominado «bombeo evaporítico» (Mandado, 1987). Como señala este autor,

la Cuenca del Ebro, durante el Mioceno, conformaba una gran depresión endorreica sin salida de sus aguas al mar, por lo que las sales que iban disueltas en los numerosos arroyos y otras aguas subterráneas, que confluían en el río Ebro, precipitaron dentro de la propia Cuenca, siendo el mecanismo de «bombeo evaporítico» una herramienta básica de concentración de los abundantes sulfatos que precipitaron y hoy en día se conservan. Este mecanismo de bombeo provoca que los nódulos sulfatados crezcan por precipitación de sulfato cálcico a partir de las aguas intersticiales, formando masas de cristales que desplazan a los sedimentos circundantes. Cody y Hull (1980) señalan que en el entorno de los medios continentales tipo «sabka» se produce no sólo la anhidritización diagenética temprana de los depósitos de yeso, sino la precipitación directa de anhidrita debido a las altas temperaturas del medio, la baja actividad química del agua y la abundancia de materia orgánica, procedente de los restos de tapices algales y flora, que podrían favorecer la nucleación de la anhidrita. En el área de estudio son frecuentes los restos orgánicos (algas y pellets) y los signos de bioturbación por raíces en las proximidades de los niveles de alabastro.

Conclusiones

Las principales conclusiones que se desprenden en este trabajo son las siguientes:

1) Estratigráficamente, los materiales aflorantes dentro del área de estudio pertenecen a la Unidad Tectosedimentaria T₄ (UTS T₄) (parte alta del Oligoceno Superior).

2) Se han detectado tres niveles de alabastro de interés comercial y, a nivel prospectivo, se describe una secuencia guía de la mineralización para el nivel superior (cota 245-250 m).

3) Los depósitos evaporíticos del área de estudio se generaron en un medio continental endorreico muy somero, de tipo playa-lago, en subambientes mixtos entre llanuras de barros y llanuras distales fluviales.

4) El modelo de hidratación que se observa en el área para los nódulos de alabastro es el de tipo «concéntrica», que produce un estado inicial de porfidoblástesis externa al nódulo y una alabastrinización final en el núcleo.

5) Se aprecia en la columna estratigráfica general de la zona investigada, y dentro de los niveles de alabastro, una secuencia idealizada de progresiva hidratación, de muro a techo, con los siguientes crecimientos cristalinos:

- Agregados microcristalinos.
- c.e.n.u.
- Porfidoblastos.

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Tecnológico *GeoMinero* de España por las facilidades encontradas para la divulgación de los datos utilizados en este trabajo, que son fruto del proyecto de investigación: «Estimación del Potencial de Alabastro en el Valle del Ebro (1991).»

Referencias

- Cody, R. D. y Hull, A. B. (1980). Experimental growth or primary anhydrite at low temperature and water salinities. *Geology*, 8-10, 505-509.
- Díaz Rodríguez, L. A. (1991). El alabastro: Un enigmático mineral industrial ornamental. Criterios para su reconocimiento. *Bol. Museo Arqueológico Nac.*, 9, 101-112.
- González, A. (1989). *Análisis tectosedimentario del Terciario del borde SE de la Depresión del Ebro (Sector Bajoaragonés) y cubetas ibéricas marginales*. Tesis Doctoral Inédita, Univ. de Zaragoza, 507 págs.
- González, A., Pardo, G., Villena, J. y Pérez, A. (1984). Estratigrafía y sedimentología del Terciario de la cubeta de Alloza (prov. Teruel). *Bol. Geol. Min.*, 95, 407-428.
- González Martínez, J., Fernández-Nieto, C., González López, J. M., González, A. y López-Aguayo, F. (1986). Mineralogía del perfil de Sástago (Terciario del Sector Central de la Depresión del Ebro, prov. de Zaragoza). *Bol. Soc. Esp. Mineral.*, 9, 53-61.
- Holliday, D. W. (1970). The petrology of secondary gypsum rocks: a review. *J. Sedim. Petrol.*, 40, 734-744.
- ITGE (1991). Estimación del potencial de alabastro en el Valle del Ebro. *Fondo Documental del ITGE*, informe inédito, 185 págs.
- Mandado, J. (1987). *Litofacies yesíferas del Sector Aragonés de la Cuenca Terciaria del Ebro. Petrogénesis y Geoquímica*. Tesis Doctoral, Univ. de Zaragoza, 443 págs.
- Mandado, J. y Tena, J. M. (1988). Interpretación geoquímica del análisis químico de rocas yesíferas de la Cuenca del Ebro mediante análisis estadístico. *Geociencias*, 3, 189-197.
- Ortí, F. (1977). Aproximación al estudio petrográfico de las microestructuras de las rocas de yeso secundario y a su origen. *Inst. Inves. Geol. Dip. Prov. Barcelona*, 32, 87-152.
- Ortí, F., Rosell, L., Salvany, J. M., Inglés, M., Permanyer, A. y García-Veigas, J. (1989). Sedimentología y diagénesis como criterios de prospección de recursos en el Terciario evaporítico de la Cuenca del Ebro. *XII Congreso Español de Sedimentología*, 253-262.
- Quirantes, J. (1978). Estudio sedimentológico y estratigráfico del Terciario continental de los Monegros. *Inst. «Fernando El Católico»*, CSIC, Zaragoza, 207 págs.
- Weaver, C. E. (1989). Clays, Muds, and Shales. *Developments in Sedimentology*, Elsevier, 44, 819 págs.
- Wentworth, C. K. (1922). A scale of grade and clase terms for clastic sediments. *J. Geol.*, 30, 377-392.

Recibido el 22 de mayo de 1993
Aceptado el 1 de marzo de 1994