

5.- YACIMIENTOS DE SULFATO SODICO-CALCICO
(GLAUBERITA) EN LAS FORMACIONES
FALCES Y LERIN.

5.- YACIMIENTOS DE SULFATO SODICO-CALCICO (GLAUBERITA)

EN LAS FORMACIONES FALCES Y LERIN.

El yacimiento de glauberita de Alcanadre es conocido desde antiguo: RIOS (1963), RIBA (1964) y ORDÓÑEZ et.al. (1982), entre otros autores, citan ya su existencia aunque ninguno de ellos realiza estudios de detalle sobre el mismo. El yacimiento se emplaza entre los yesos de la unidad Los Arcos, que en este sector de la cuenca presenta un gran desarrollo (195 m. de potencia) y aflora en su totalidad en el corte excavado por el río Ebro entre las localidades de Alcanadre y Arrūbal (figs. 46 y 48). En este yacimiento, junto a la glauberita se hallan cantidades variables de polihalita, magnesita y halita (SALVANY y ORTI, 1987).

Otros indicios de glauberita entre las formaciones evaporíticas motivo del presente estudio que hasta ahora no habían sido citados, se presentan en San Adrián, aflorando en el margen Este del río Ega (fig. 47), y entre los niveles evaporíticos cortados por el sondeo de Marcilla en el núcleo del anticlinal de Falces (fig. 27):

En el primer caso, la glauberita se localiza entre los yesos de la unidad Sesma (Fm. Lerín), constituyendo varios niveles nodular-enterolíticos con poca extensión y desarrollo en afloramiento (foto 121). Sus características litológicas y petrográficas son idénticas a las del yacimiento de Alcanadre, por lo que no hemos realizado sobre el mismo estudios de detalle.

En el segundo caso, la glauberita se ha observado en varios niveles del testigo T3 del sondeo de Marcilla, asociada a sal y anhidrita. Presenta también características similares al yacimiento de Alcanadre, que describiremos más adelante (apartado 5.3).

5.1.- ANTECEDENTES.

En la Península Ibérica existen diversas cuencas terciarias con yacimientos de sulfato sódico y sódico-cálcico asociados a formaciones evaporíticas de ori-

gen continental y características sedimentarias similares a las que estamos tratando. Los trabajos de investigación que sobre estos materiales se han publicado en las últimas décadas son diversos, por los que en buena parte se conocen bien sus características petrológicas y genéticas:

A) Cuenca del Tajo:

La glauberita, y también thenardita y mirabilita, se presentan en diferentes puntos del Mioceno de la cuenca del Tajo (fig. 56), donde son motivo de explotación en Villarrubia de Santiago (minas de "El Castellar"), provincia de Toledo y en Villaconejos, provincia de Madrid, y lo han sido también en otras zonas como la "mina Consuelo", en San Martín de La Vega. En estos yacimientos, al igual que en Alcanadre, el sulfato sódico y sódico-cálcico está asociado a magnesita, polihalita y halita.

La presencia de un importante nivel de thenardita y el notable desarrollo de las facies de glauberita y polihalita en la cuenca del Tajo, permiten poner estos yacimientos, a nivel geológico y geoeconómico, en primer lugar en importancia de entre los peninsulares, en su género.

Los trabajos que hasta la fecha se han publicado sobre la petrología y génesis de estos yacimientos son diversos: SAN MIGUEL y MONTOTO (1971), ORDÓÑEZ et.al. (1977), ORTI et.al. (1979), GARCIA DEL CURA et.al. (1979) y ORTI y PUEYO (1980). Todos ellos se basan en el estudio de muestras de las minas y sondeos principalmente del yacimiento de Villarrubia de Santiago.

B) Cuenca del Ebro.

A parte de los yacimientos de las formaciones Lerín (Alcanadre-Arrúbal y San Adrián) y Falces (sondeo de Marcilla) que hemos citado, se conocen niveles de glauberita en el Mioceno de las provincias de Zaragoza y Burgos:

Para el caso de la provincia de Zaragoza, FERNANDEZ NIETO y GALAN (1979) citan la presencia de una capa de glauberita, de 3,2 m. de potencia, en la base de la formación salina de Remolinos. Esta capa fue detectada por

sondeo y no llega a aflorar en ningún punto de la superficie. De ella se tiene poca información pues el material no fue estudiado petrográficamente por los citados autores. Este mismo nivel es citado también por MANDADO (1979, 1987) en su estudio geoquímico y petrológico sobre la sal de Remolinos

Sondeos más recientes, realizados por las empresas explotadoras de la sal de Remolinos, han detectado otros niveles de glauberita próximos a las minas (REMOSAL, S.A. com.pers.) aunque sobre los mismos de momento no tenemos ningún tipo de información.

MANDADO (1987) cita niveles de glauberita también en el subsuelo de Zaragoza y sus proximidades, detectados por sondeos realizados por la empresa TOLSA, S.A: sondeos de Utebo, Garrapinillos y Miralbuena. En ellos la glauberita está asociada a potentes tramos de halita, entre los que también se describen indicios de thenardita.

El yacimiento de glauberítico de Cerezo de Río Tirón (Burgos) se sitúa en la formación yesífera que lleva el mismo nombre, en el extremo occidental de la cuenca del Ebro. Sus materiales son también motivo de explotación y sobre ellos MUENDUIÑA (1982) y MENDUIÑA et.al. (1984) han realizado un estudio geológico que contempla tanto aspectos estratigráficos, petrológicos y geoquímicos (estudio isotópico de sulfatos) así como geoeconómicos. Otros indicios de glauberita en la misma formación han sido detectados de forma más reciente en las proximidades de Belorado.

Algunas notas sobre las glauberitas de Alcanadre, fueron presentadas ya por ORTI et.al. (1986a y b) y ORTI y SALVANY (1986). Estos trabajos aunque breves, exponen ya las principales características petrológicas y sedimentológicas del yacimiento

Como trabajos generales sobre la sedimentación terciaria continental en la Península y la presencia, en este contexto, de los diferentes yacimientos de sulfato sódico, deben citarse también los trabajos publicados por ORTI (1982, 1988).

C) Otras cuencas:

Fuera de las cuencas peninsulares este tipo de sulfatos son poco conocidos:

Entre los materiales paleógenos de la cuenca de Valence (S.E. de Francia) DUMAS (1988) identifica glauberita en subsuelo, intercalada en una serie anhidrítica. La glauberita se presenta en forma de cristales romboédricos, de tamaño milimétrico o centimétrico de forma dispersa entre la anhidrita o bien formando intercalaciones más continuas. A parte de esta cita desconocemos la presencia de otros yacimientos de glauberita y/o thenardita en formaciones evaporíticas antiguas de otras cuencas europeas (sí están presentes en otros lugares de Rusia, Méjico, etc., aunque es muy escasa la información publicada sobre los mismos).

D) Medios actuales.

Por lo que respecta a medios evaporíticos actuales, la glauberita, thenardita o mirabilita han sido descritas en lagos salinos actuales, de tipo "lago salino permanente" o "playa-lake" en diferentes países:

A nivel peninsular, PUEYO (1978-79) y PUEYO y INGLES (1987a) describen glauberita y mirabilita en las lagunas salinas de Los Monegros (Zaragoza) formadas como eflorescencias en los períodos de mayor sequía (verano). Sin embargo, estas sales no llegan a preservarse en el registro sedimentario de las lagunas, pues son disueltas y nuevamente incorporadas a las salmueras durante las lluvias postveraniegas. También en las lagunas salinas de La Mancha (Albacete) DE LA PEÑA y MARFIL (1986) citan la presencia de glauberita, thenardita y mirabilita, así como polihalita y otros minerales evaporíticos, entre sus sedimentos.

Fuera de Europa, estos sulfatos han sido citados en algunos lagos continentales americanos, como el Saline Valley (fig.15) (California, EE.UU.) (HARDIE, 1968) donde la glauberita y thenardita están bien representadas junto con el yeso y halita; el Deep Springs Lake (California, EE.UU.) (JONES, 1965), donde lo está la thenardita; o el Great Salt Lake (Utah, EE.UU.) (EARDLEY, 1930), donde lo es la mirabilita. También se ha descrito sulfato sódico en el lago Tchad (Senegal) (MAGLIONE, 1974), en varios lagos

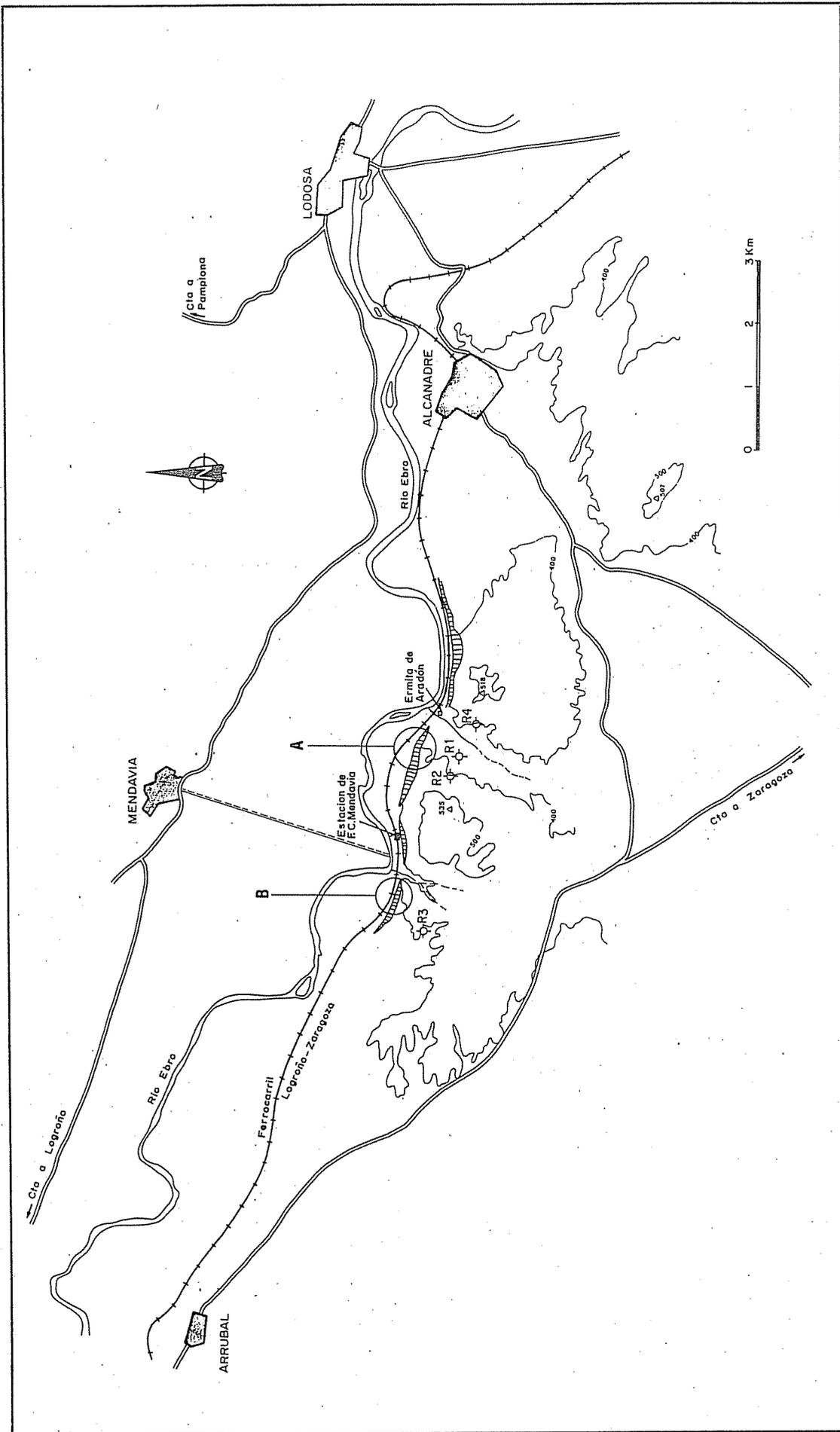


Figura 46.- Mapa de situación del yacimiento de glauberita del sector Alcanadre-Arrubal. Se indica la posición de los sondeos realizados por Unión Salinera de España S.A. en 1983-84, y los puntos de afloramiento de las capas de glauberita: A) zona de la ermita de Aradón; B) zona del término de Arrubal.

australianos como el Eyre, así como en diversos salares andinos, en Sudamérica, donde la glauberita y thenardita están presentes de forma esporádica.

Todos estos lagos salinos son de tipo continental y presentan características sedimentológicas, mineralógicas e hidroquímicas bien diferentes entre sí, lo que hacen difícil asociar la presencia de la glauberita y otros sulfatos sódicos a un único modelo de lago salino.

Son escasas las citas de polihalita en medios evaporíticos actuales. A parte de las lagunas de La Mancha que ya hemos citado, la polihalita está presente en la Laguna Ojo de Liebre, en California, EE.UU. (HOLSER, 1966a), tratándose de polihalita diagenética de origen marino que reemplaza al yeso; así como en las sebkhas norteafricanas de Grizim, en el Sahara argelino (CONRAD, 1975), donde la polihalita es de origen continental, y El Melah, en la costa Este de Tunes (BUSSON y PERTHUISOT, 1977), donde la polihalita es también diagenética, aunque en este caso de origen marino.

5.2.- YACIMIENTO DE ALCANADRE-ARRUBAL (Fm. Lerin).

5.2.1.- CARACTERÍSTICAS DEL YACIMIENTO.

En las figuras 46 y 48 se muestra la situación de los puntos de afloramiento de la glauberita en el corte de la Ermita de Aradón, entre las localidades de Alcanadre y Arrúbal.

Los niveles de glauberita se emplazan entre los yesos de la unidad Los Arcos, que en esta zona presentan una estructura monoclinas que buza suavemente hacia el S.O. (15 a 20°). El corte del río Ebro (E.-O.) muestra un buzamiento aparente de unos 5°, de tal forma que en su parte oriental (zona de la Ermita de Aradón) afloran las arcillas rojas con yesos y areniscas de la unidad Lodosa y los niveles basales de la unidad Los Arcos, mientras que en su parte occidental (término de Arrúbal) afloran sólo los niveles altos de la Unidad Los Arcos y el tránsito a las facies de Tudela.

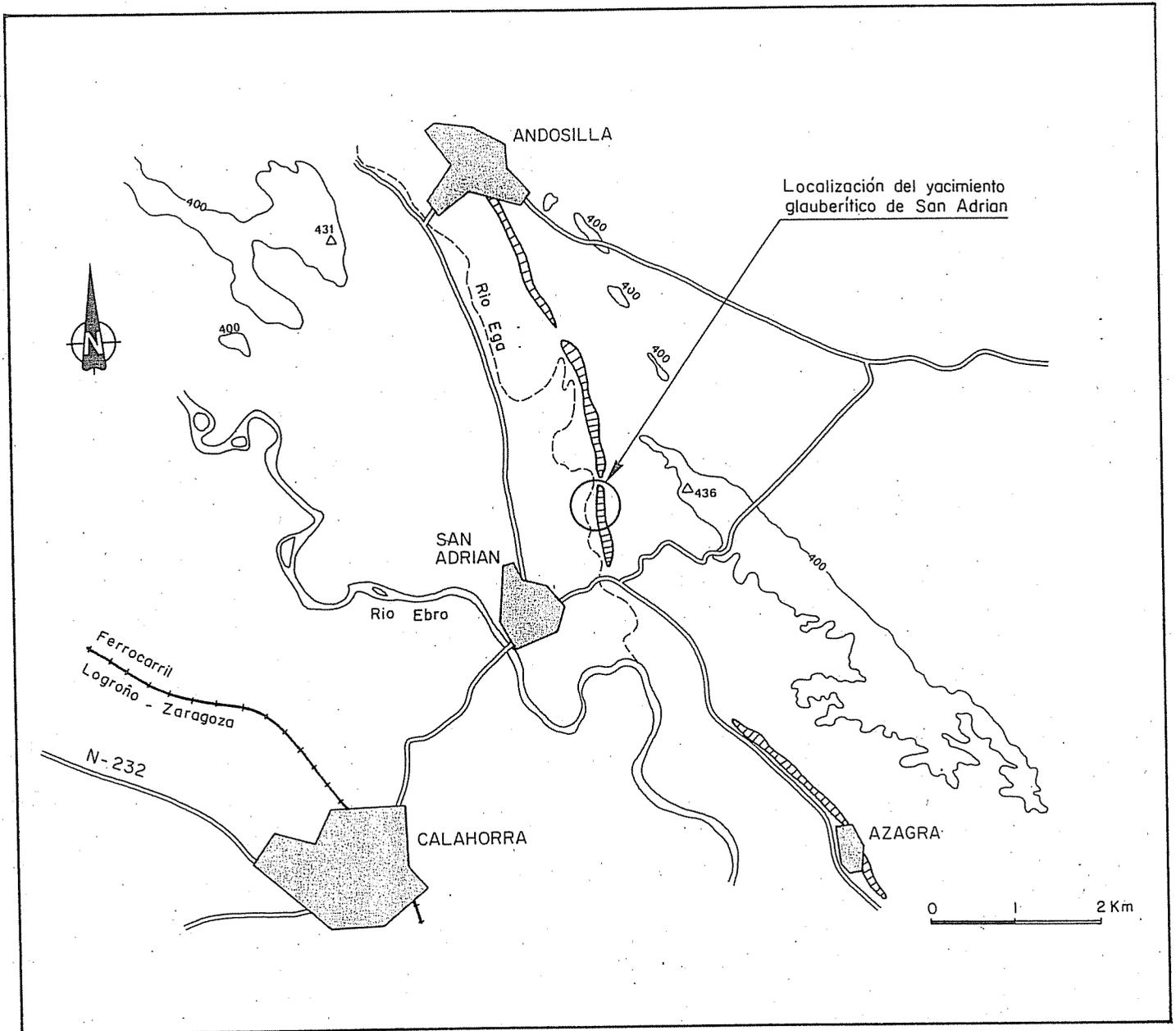


Figura 47.- Mapa de situación del yacimiento de glauberita de San Adrián, situado en el barranco excavado por el río Ega, entre las localidades de Andosilla y San Adrián.

En los años 1983 y 1984, la empresa Unión Salinera de España S.A. realizó cuatro sondeos de testigo continuo con motivo de una campaña de prospección para valorar el potencial económico en sulfato sódico de esta región. La situación de estos sondeos se ofrece en las figuras 46 y 48, y los "logs" litológicos cedidos por la citada empresa se muestran en las figuras 49, 50, 51 y 52. Del estudio comparativo entre los sondeos y el corte de campo se deducen importantes aspectos sobre las características del yacimiento:

1) En la Unidad Los Arcos (área de Alcanadre-Arrúbal) se pueden distinguir tres tramos:

Tramo inferior (A) (35 m.) constituye un paquete yesífero de litofacies predominantemente laminada (se observa bien en las proximidades de la Ermita de Aradón). En la parte inferior de este tramo se individualizan dos capas de glauberita: de 2 m. la inferior y 4.5 m. la superior, en las que se han realizado algunas labores mineras (dos bocaminas en la capa inferior). En el resto del tramo son frecuentes los niveles decimétricos de glauberita intercalados entre los yesos.

Este tramo es cortado por los sondeos R-1, en su totalidad, y R-2, A-1 en sus niveles altos. A pesar de que en superficie se individualizan bien dos niveles glauberíticos importantes, en el sondeo R-1 se distingue un tercer nivel con el mismo grado de desarrollo que los otros dos (fig 49). También se observa en el sondeo, varias intercalaciones de halita y de polihalita que no llegan a reconocerse en superficie (la polihalita sí se ha observado de forma excepcional en afloramiento).

De la totalidad de la serie de Los Arcos éste parece ser el tramo con mayor desarrollo en glauberita, polihalita y sal. Sin embargo, estas facies se acuan rápidamente hacia el Este, tal como muestra el sondeo A-1, situado el Este de la ermita de Aradón, donde el desarrollo de sal y glauberita es muy escaso en los mismos niveles que los sondeos R-1 y R-2 muestran un buen desarrollo de estas facies.

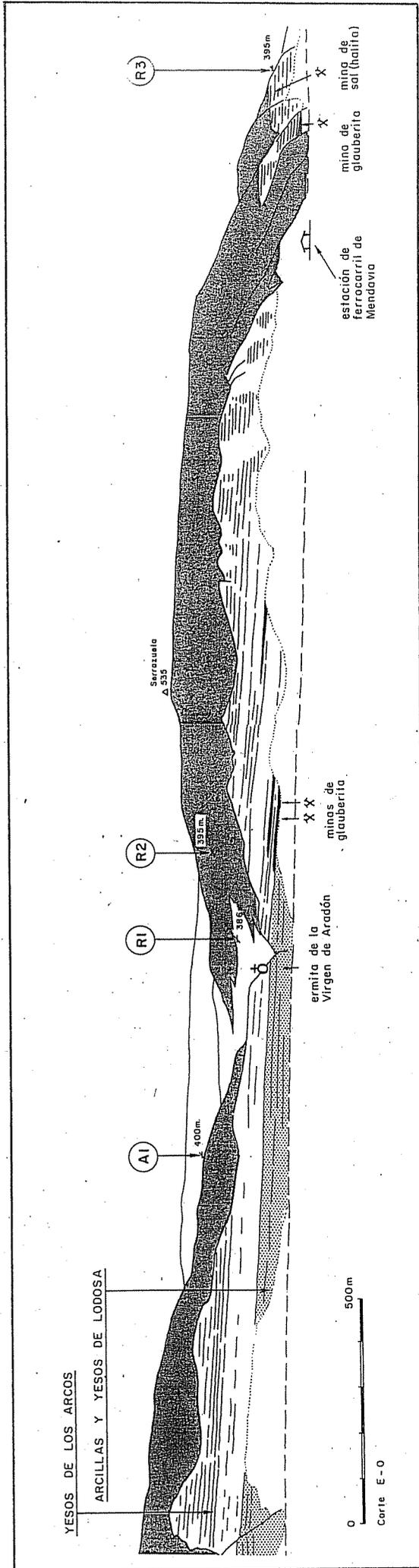


Figura 48.- Vista panorámica del corte excavado por el río Ebro sobre los Yesos de Los Arcos entre las localidades de Alcanadre y Arrúbal. Se indica la posición de los sondeos, niveles de glauberita aflorantes y bocaminas emplazadas en el yacimiento.

Tramo medio (B) (55 m.) caracterizado por una alternancia cíclica de capas de yeso y arcilla yesíferas, del orden de varios metros cada capa. Los yesos son laminados o nodulares y las arcillas son de colores rojizos. Este tramo se puede observar bien en la parte alta del acantilado, a ambos lados del barranco de la Ermita de Aradón, y en él las intercalaciones glauberíticas aflorantes están prácticamente ausentes; sólo en la base de la primera capa de yeso de este tramo se individualiza bien un nivel de 1-1.5 m. de espesor que rápidamente se acuña hacia el Este (fig. 48).

Los sondeos A-1, R-1 y R-2 cortan este tramo, poniendo de relieve un mayor desarrollo en profundidad de los niveles glauberíticos, de lo que se aprecia en superficie. También en este tramo se intercalan capas de sal.

Tramo superior (C) (105 m.) constituye un potente y monótono tramo yesífero de facies laminada, con algunas finas intercalaciones arcillosas. En su base se emplazan algunos niveles glauberíticos de poco espesor (inferiores a 1 m.) que afloran en la parte Oeste del Corte (término de Arrūbal). Sobre uno de ellos se localiza una mina que penetra más de un centenar de metros en la formación. En la parte superior de este tramo se encuentra otra mina, hoy abandonada y de difícil acceso, cuyo motivo fue la extracción de sal.

El sondeo R-3 atraviesa la totalidad de este tramo, y al igual que se aprecia en superficie, sólo corta niveles de glauberita en su parte inferior. La sal que se explotaba en la mina constituye un nivel bien individualizada en la parte alta del tramo yesífero (fig. 51).

El tránsito a la Formación Tudela se presenta gradual, con una alternancia de arcillas y yesos (tres ciclos) entre el potente tramo sulfatado descrito y las facies de Tudela. Estos niveles de transición se distinguen bien tanto en afloramiento como en sondeo.

2) En el corte los niveles de glauberita aflorantes se observan bien a simple vista entre los yesos, pues presentan una tonalidad blanca intensa debido a la formación de eflorescencias por alteración superficial de este mineral. Estas eflorescencias son de sulfato sódico, y no deben

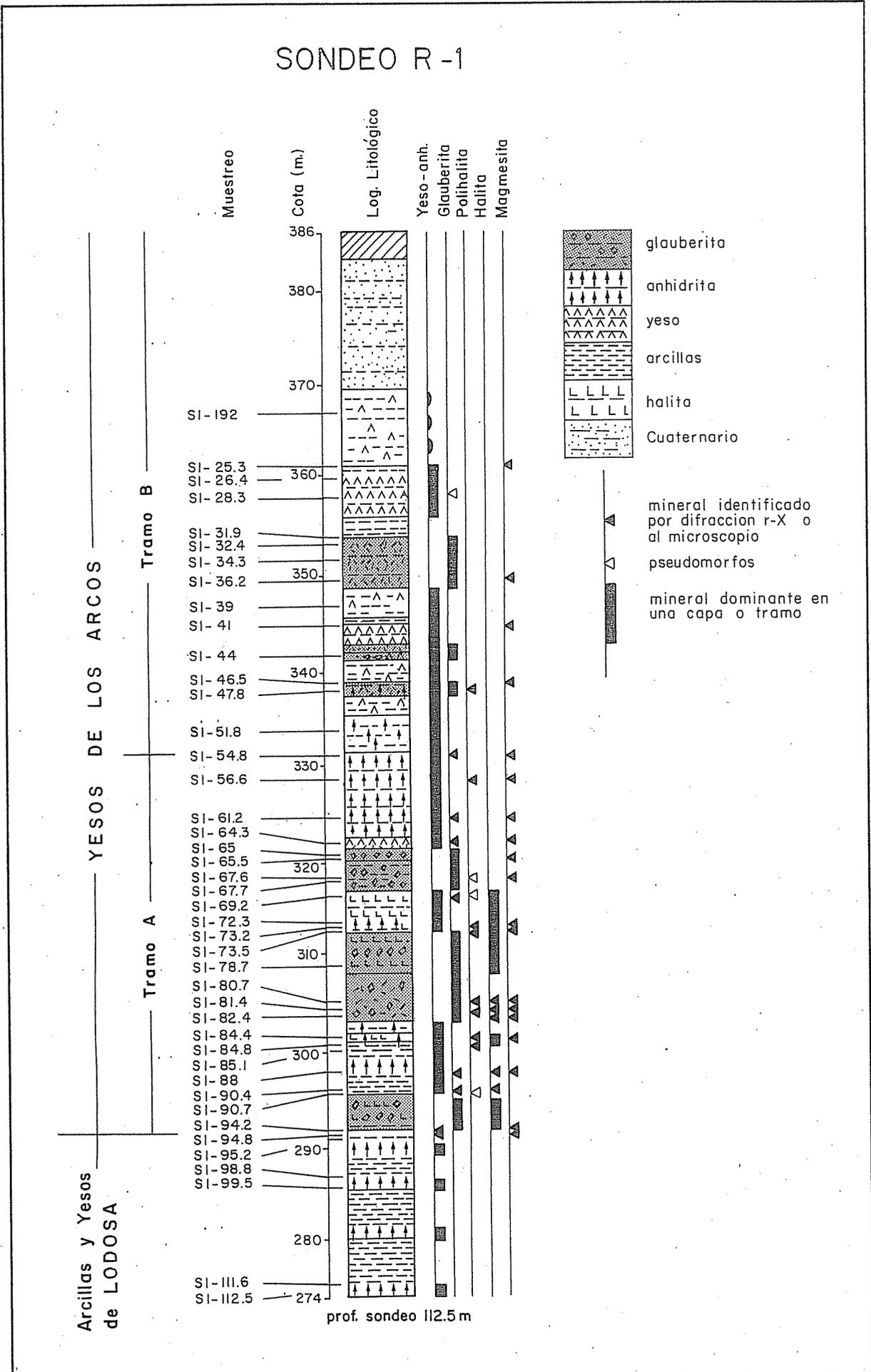


Figura 49.- perfil litológico del sondeo Rioja-1 (R-1) realizado por Unión Salinera de España S.A. en las proximidades de la ermita de Aradón. Se indican las unidades y mineralogías identificadas.

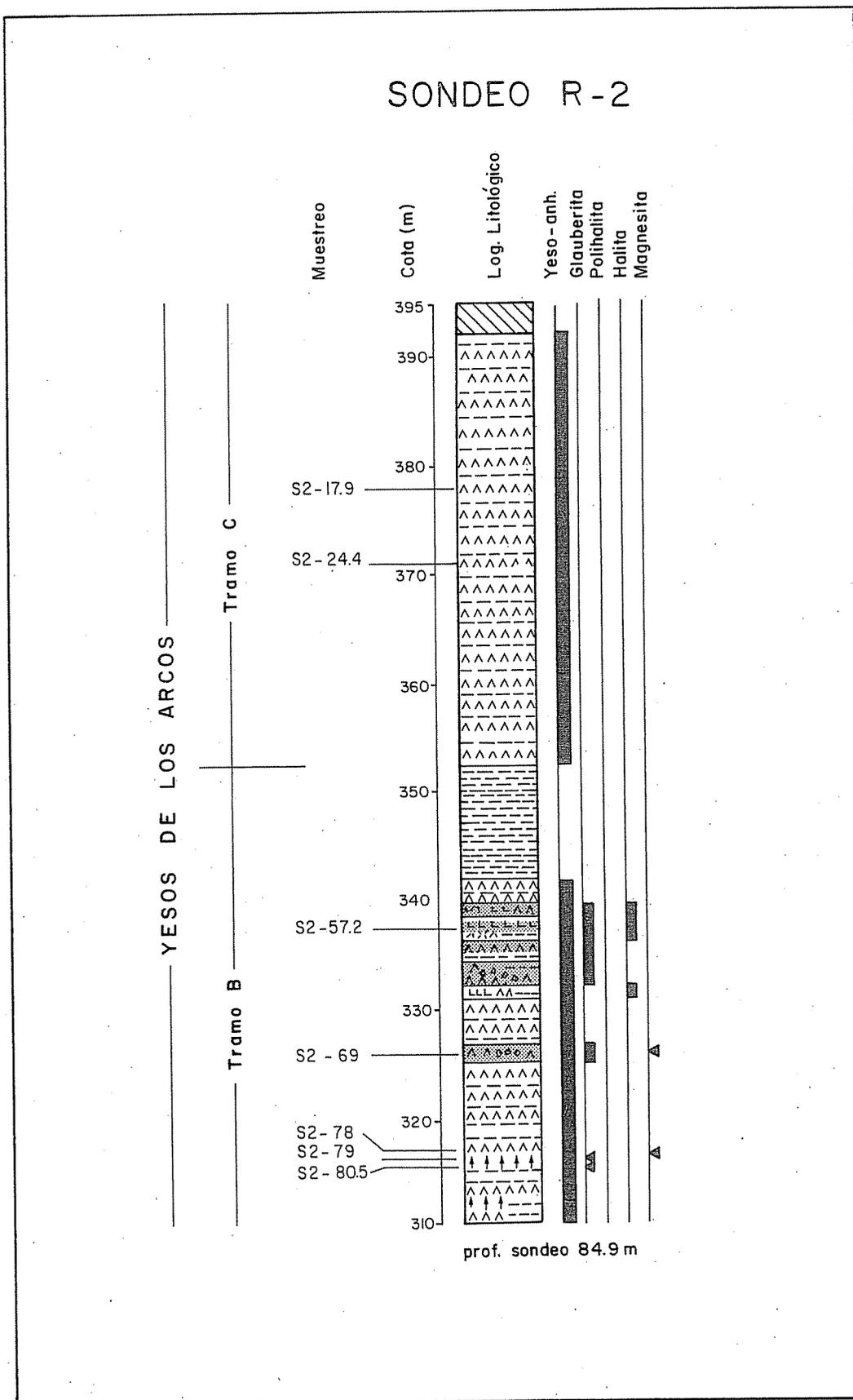


Figura 50.- perfil litológico del sondeo Rioja-2 (R-2) realizado por Unión Salinera de España S.A. en las proximidades de la ermita de Aradón. Se indican las unidades, muestreo y mineralogías identificadas.

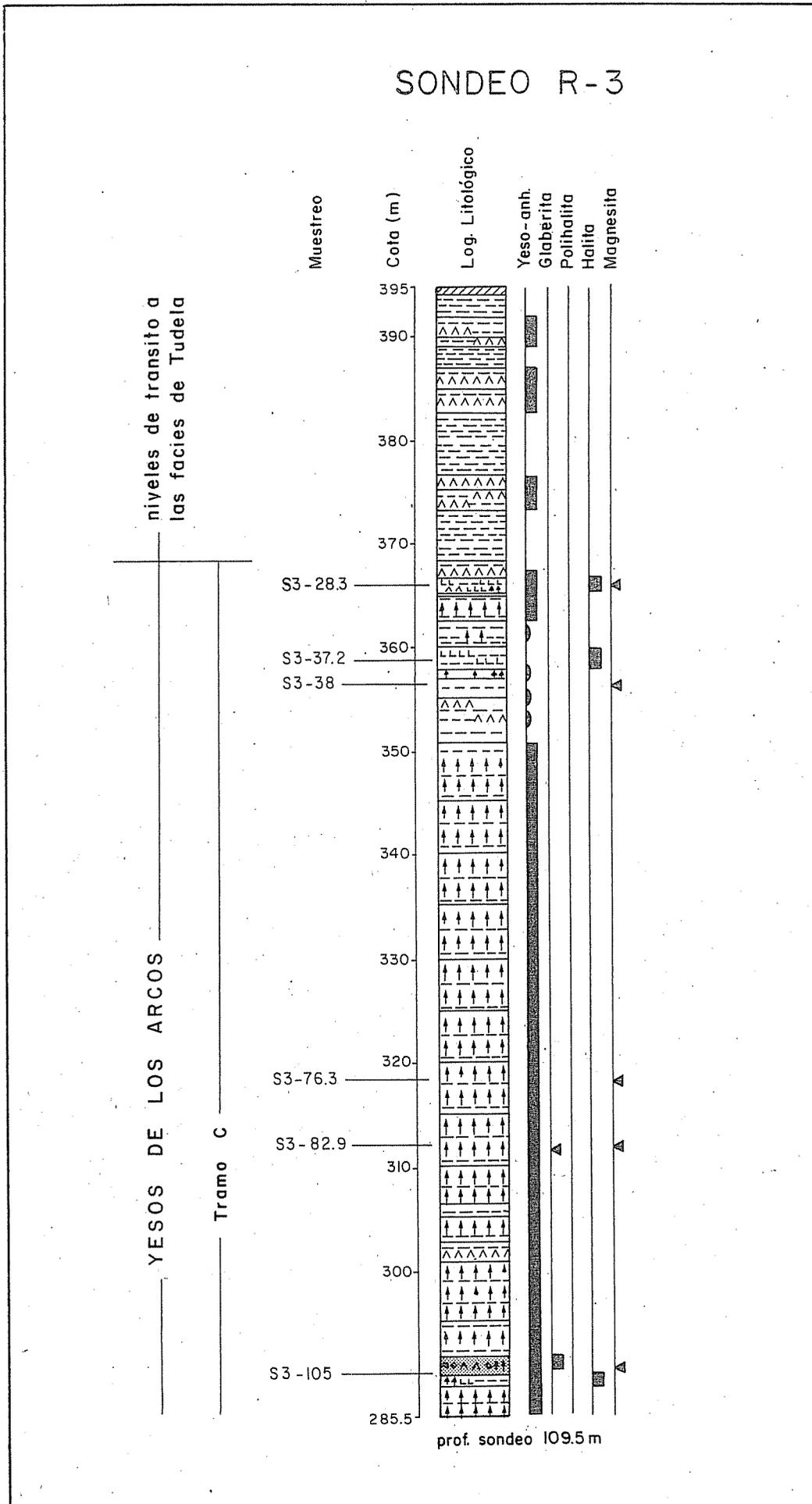


Figura 51.- perfil litológico del sondeo Rioja-3 (R-3) realizado por Unión Salinera de España S.A. en el término de Arrúbal. Se indican las unidades, muestreo y mineralogías identificadas.

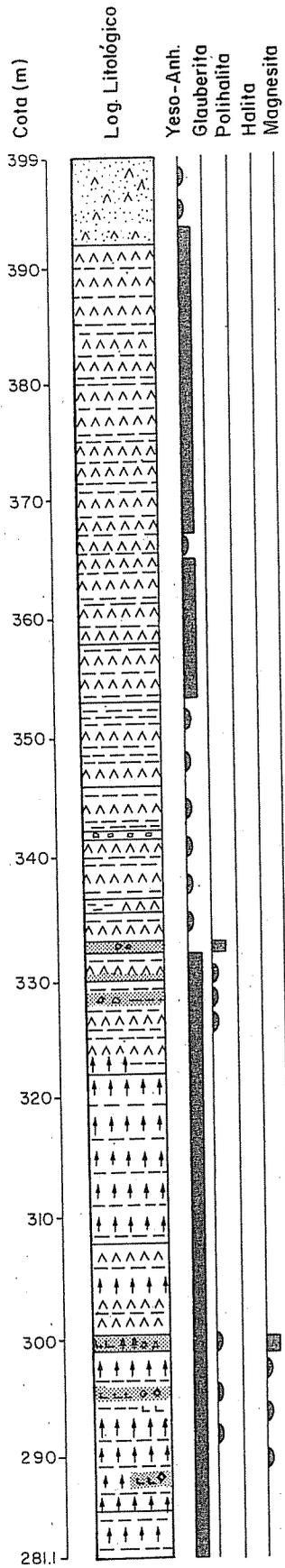
SONDEO A-1

YESOS DE LOS ARCOS

Tramo B

Tramo A

?



prof. sondeo 117.9 m.

Figura 52.- perfil litológico del sondeo Alcanadre-1 (A-1) realizado por Unión Salinera de España S.A. en las proximidades de la ermita de Aradón. Se indican las unidades y mineralogías identificadas.

confundirse con las que de una forma más general tapizan corrientemente los niveles arcillosos en las zonas protegidas de las aguas de lluvia, que como ya se ha visto son de sulfato magnésico (hexahidrita).

3) En profundidad el número y desarrollo de capas de glauberita es, como muestran los sondeos, superior al observado en afloramiento. No obstante, los principales niveles glauberíticos cortados por los sondeos corresponden perfectamente con los aflorantes en el corte. La sal no llega a aflorar en ningún punto, y la polihalita sólo ha sido detectada en superficie de forma excepcional (muestra EA-12).

4) El grado de penetración del yeso secundario en subsuelo es importante, pues este mineral es cortado por los sondeos hasta profundidades de 40 a 60 m., antes de llegar a ser la anhidrita el tipo de sulfato cálcico dominante.

5) Las capas de glauberita se acuñan hacia el Este escalonadamente en la serie, de tal forma que los niveles glauberíticos más bajos (proximidades de la Ermita de Aradón) son los que más se extienden hacia el Este y los niveles más altos que afloran más hacia el Oeste, se acuñan rápidamente y no llegan a superponerse sobre los inferiores. Este aspecto se observa por igual en subsuelo y en afloramiento, y es un reflejo del sentido de desplazamiento de las facies evaporíticas hacia el Oeste (fig. 48).

6) Las capas de glauberita más potentes se sitúan preferentemente en la base de los principales tramos yesíferos. Hacia techo la glauberita pierde desarrollo pero lo ganan los niveles de sal y polihalita. La figura 31 (derecha) muestra la distribución vertical de facies en un ciclo yesífero-glauberítico ideal.

5.2.2.- PETROLOGIA DE LOS MATERIALES.

Las muestras utilizadas para el estudio de este yacimiento han sido tanto de superficie (serie de campo EA)

como de sondeo, y su localización se presenta en las figuras 49, 50, 51 y A-7. El tipo de tratamiento que sobre estas muestras se ha efectuado es de difracción de rayos-X (tablas 17, 18 y 19) y estudio petrográfico en lámina delgada. De los resultados de las observaciones de campo y de las muestras analizadas poden exponerse las siguientes características:

5.2.2.1.- LA GLAUBERITA.

A) Litofacies.

El tipo de litofacies que de forma dominante caracteriza este mineral es la nodular o enterolítica (fotos 80, 81, 82 y 121), formando niveles de orden decimétrico que pueden superponerse y dar capas de mayor espesor (orden métrico) (foto 79), o bien estar aislados entre yeso como niveles individuales. En este segundo caso los nódulos o enterolitos tienen poca continuidad lateral y se observa bien su acuñamiento entre los yesos encajantes, que son de litofacies laminada.

Estos niveles glauberíticos presentan una textura cristalina variable, que muestra con frecuencia un tamaño cristalino creciente desde el centro hacia los bordes de los enterolitos (fotos 34 y 97). En los bordes los cristales de glauberita son idiomórficos (prismático monoclinicos, de tendencia tabular), presentan tamaños de 5-20 mm., y se disponen en empalizada, enclavados contra el sedimento encajante. En la parte central los cristales son de tamaño menor (100-500 μm .) y forman un fino agregado de glauberita muy pura.

La glauberita también se presenta como niveles tabulares con estructura masiva o bandeada y espesor decimétrico. Estos niveles están constituídos por cristales gruesos de glauberita (5-20 mm.) con una estructura desorientada y matriz lutítica intercristalina más o menos abundante. Esta matriz da a la roca una coloración rosada o grisácea característica, así como un carácter poco compacto o deleznable.

Entre las litofacies laminadas de yeso o yeso-carbonato, son también frecuentes los cristales de glauberita, aislados o en agregados, con tendencia subvertical o en empalizada. Estos cristales son de tamaño milimétrico.

Como casos particulares están los niveles de glauberita de grano fino, de litofacies nodular o tabular, que presentan estructuras fluidales (fotos 83 y 87), y los niveles tabulares de grano fino, con base nodular de grano grueso.

En todos estos casos, la glauberita ha crecido intersticialmente como producto primario, a partir de las salmueras que empapan el sedimento en estado de alta concentración, o bien como mineral secundario reemplazando a la anhidrita o al yeso.

B) Petrografía.

La glauberita es un mineral que cristaliza en el sistema monoclinico con hábitos prismáticos o tabulares, es biáxica negativa y presenta relieve bajo e índice de refracción alto (colores vivos de interferencia).

Al microscopio se observa como monocristales con extinción uniforme, aspecto nítido y escasa o nula exfoliación. Los cristales presentan hábitos desde idiomórficas (romboedros característicos) (foto 95) hasta anhedrales (foto 96) y forman siempre microestructuras desorientadas. El idiomorfismo está en buena parte condicionado por la cantidad de matriz intercrystalina de la roca: en aquellas muestras donde el contenido en matriz es alto suelen presentarse los cristales con formas bien desarrolladas, mientras que en las muestras de glauberita más pura los cristales están compactados e interpenetrados formando un denso mosaico subidiomórfico o anhedral.

El tamaño de los cristales es variable y, aunque pueden darse toda la gradación completa entre los más finos y los más gruesos, a grandes rasgos se distinguen tres tipos diferentes:

a) Tamaño grueso: de 2-20 mm.. Suelen presentar hábito idiomórfico o subidiomórfico entre matriz de carbonato o arcilla que siempre está en mayor o menor grado presente. Entre estos cristales son frecuentes los bordes interpenetrados y las líneas de fractura. También son corrientes los sobrecrecimientos, atrapando en ocasiones pequeñas cantidades de matriz (micrita) que quedan como inclusiones en el cristal. No hemos observado grandes cristales idiomórficos de varios centímetros como se cita en la cuenca del Tajo (ORTI et.al. 1979)

b) Tamaño medio: de 150-800 μ m. Generalmente son los cristales que presentan un idiomorfismo mejor desarrollado y gran nitidez (foto 111).

c) Tamaño fino o matriz glauberítica: inferior a las 100 μ m. Ocupa en ocasiones el espacio intercrystalino entre la glauberita de tamaño grueso. En otros casos forma zonas o niveles entre glauberita de tamaño mayor.

Desde un punto de vista genético, podemos distinguir tres tipos diferentes de glauberita:

a) Glauberita primaria. Los cristales de glauberita han precipitado directamente a partir de las salmueras intersticiales, desplazando en su crecimiento al sedimento blando entre el que se hallan. Los cristales son de cualquiera de los tamaños descritos, idiomórficos o subidiomórficos y el sedimento encajante es de tipo lutítico, carbonatado o yesífero (fotos 95 y 111).

No hemos encontrado criterios que nos hagan pensar en glauberita precipitada en el fondo de los lagos salinos de forma similar a la aducida por MENDUIÑA et.al. (1984) por el caso del yacimiento de Cerezo de Rio Tirón. Aunque no descartamos esta posibilidad, este sería un caso poco representativo, vista la dominancia de las facies claramente de origen intersticial sobre cualquier posible facies laminada de fondo de laguna.

b) Glauberita secundaria temprana. Algunos cristales de glauberita, presentan inclusiones de anhidrita (foto 98) que

ponen de manifiesto su origen secundario por reemplazamiento de este mineral. Estos cristales tienen características similares a los primarios y están genéticamente muy relacionados con los mismos, por lo que no siempre está clara la diferencia entre ambas variedades de glauberita.

La asociación de ambos tipos de glauberita puede explicarse como consecuencia de una primera fase en la que las salmueras reaccionan con la anhidrita para transformarla en glauberita secundaria, y una fase posterior o simultánea, en que la glauberita prosigue su crecimiento de forma primaria alrededor de la que se formó inicialmente o formando nuevos horizontes.

Este fenómeno se refleja bien en los niveles nodulares y enterolíticos, en los que se observa una zonación de crecimiento, con un núcleo formado por un mosaico anhedral de cristales de glauberita, que con frecuencia presentan inclusiones de anhidrita, y una envoltura de cristales de glauberita primaria, idiomórficos, creciendo contra el sedimento encajante. En los niveles tabulares, la glauberita ha crecido como mineral primario.

c) Glauberita poiquilítica . Reemplaza a la polihalita formando cristales de tamaño grande (> 500 μm normalmente), anhedrales (localmente pueden dar formas idiomórficas) y de carácter poiquilítico (fotos 106, 107, 109 y 110). Presentan frecuentes pseudomorfos e inclusiones de la polihalita precursora e inclusiones del carbonato que atrapan durante su crecimiento. Se presenta únicamente en facies laminadas.

Esta glauberita tiene un origen retrodiagenético, pues reemplaza a la polihalita que es un mineral que a su vez reemplaza a las glauberitas de los tipos a) y b) antes descritas (en cierta forma puede decirse que es una glauberita de segunda generación). Su origen es diagénico temprano, debido a la reacción de salmueras diluidas con sales precipitadas en estadios de mayor concentración de las mismas (polihalita).

En algunas láminas delgadas correspondientes a los testigos del sondeo de Marcilla, se ha observado este tipo de glauberita reemplazando yeso primario microlenticular (foto 123). Esta particularidad puede estar relacionada con el hecho también particular de que en este sondeo no se ha observado polihalita (apartado 5.3).

En las glauberitas de los tipos a) y b) también se presentan como fenómenos retrodiagenéticos, pequeños cristales de anhidrita (porfiroblastos de anhidrita sobre glauberita), que se diferencian bien de las inclusiones de anhidrita reemplazada (foto 98), al constituir cristales bien formados, con hábitos cuadrado-rectangular típicos de este mineral (fotos 124 y 125). Las inclusiones de anhidrita reemplazada presentan una morfología anhedral, con los bordes muy corroídos por su transformación.

En la diagénesis tardía (exhumación del yacimiento), la glauberita es finalmente transformada a yeso secundario (fotos 99 y 100). Este fenómeno se puede observar bien "de visu" en los afloramientos, donde el yeso forma una envoltura de tamaño centimétrico alrededor de los niveles de glauberita (foto 81), que avanza hacia el interior de la capa hasta su total transformación. En las capas de glauberita transformadas a yeso secundario llegan a observarse, al microscopio, pseudomorfos de la textura original de la este mineral (foto 112), aunque este hecho no es muy común.

5.2.2.2.- LA POLIHALITA.

A) Litofacies:

La polihalita se presenta en facies laminadas asociada a carbonato, glauberita, halita y anhidrita (fotos 101, 102, 103 y 104). La laminación es milimétrica o centimétrica, planoparalela con formas más o menos onduladas y tonalidades oscuras. En estas facies, originalmente de yeso primario de grano fino, carbonato y glauberita, la polihalita actúa como mineral diagenético que reemplaza al yeso y glauberita, sin producir prácticamente ninguna distorsión en la estructura original del sedimento. También puede crecer como mineral primario, ocupando la porosidad del sedimento (cemento) o bien de forma intersticial entre el carbonato (foto 105). En los niveles de halita este mineral también es frecuente, creciendo sobre la halita a través de sus bordes intercristalinos (foto 115).

B) Petrografía:

La polihalita cristaliza en el sistema triclinico, es biáxica negativa y presenta bajo relieve y colores débiles de interferencia: rojo-amarillentos o grises. En ella son frecuentes la maclas del tipo polisintético o en forma de cruz de cuatro individuos.

En nuestro caso la podemos observar con dos hábitos diferentes: a) como cristales fibrosos o aciculares en disposición radial formando esferulitos (foto 105), o bien b) como fino agregado granular entre los esferulitos, con apariencia de matriz.

a) El primer caso es el dominante. Los esferulitos tienen un tamaño que puede variar entre 200-400 μm y 1-2 mms. En los casos de mayor tamaño los esferulitos llegan a apreciarse a simple vista (foto 103), sobre todo en aquellas muestras donde hay abundante matriz de carbonato o arcilla. Cuando la polihalita es muy pura a simple vista se presenta como una homogénea masa microcristalina difícil de distinguir del yeso.

En algunas ocasiones los cristales aciculares de polihalita se presentan rellenando porosidades de la roca creciendo perpendicularmente en sus paredes. Esta porosidad puede ser original del sedimento o bien deberse a la disolución de cristales anteriormente formados. En ambos casos la polihalita actúa como cemento y puede rellenar totalmente la cavidad o bien constituir como una primera generación de cemento seguida de otra de halita que ocupa el espacio central restante.

b) En agregado granular, los cristales de polihalita presentan formas prismáticas o rectangulares, con tamaños del orden de 50-100 μm . En ellos se distinguen con frecuencia maclas polisintéticas o de cuatro individuos típicas de este mineral.

El reemplazamiento del yeso primario y glauberita por polihalita se produce en una fase diagenética temprana en la que el sedimento está aun inconsolidado. Ello se pone de manifiesto por la facilidad con que este mineral se ha desarrollado entre el carbonato (desplazándolo) y los

espacios libres del sedimento (porosidades). El reemplazamiento se ha producido prácticamente sin distorsión de la estructura original del sedimento, conservándose perfectamente como pseudomorfos los minerales reemplazados (fotos 110 y 114).

La relación observada al microscopio entre la halita y polihalita en las muestras de sal, pone de manifiesto que la polihalita ha precipitado en estadios de alta concentración de las salmueras, durante o con posterioridad a la precipitación de la halita.

Las características de este mineral son muy similares a las descritas por HOLSER (1966a) en la Laguna Ojo de Liebre en los EE.UU, donde la polihalita reemplaza al yeso intersticial de forma diagenética temprana, en la llanura lutítico-halítica supramareal. En el reemplazamiento al igual que en nuestro caso, no hay deformaciones del sedimento y se polihalitiza tanto los cristales como la matriz, preservándose perfectamente como pseudomorfo el yeso antecesor.

Como fenómenos retrodiagenéticos, la polihalita se observa con frecuencia reemplazada por anhidrita o glauberita. En el primer caso (fotos 107, 108 y 114) se trata de anhidrita con hábito tabular, que en lámina delgada se observa como finas agujas que atraviesan la polihalita en cualquier dirección. Estos cristales tabulares de anhidrita atrapan el material encajante de la polihalita (micrita) en su crecimiento, y no deforman a la estructura original de la roca. Esta anhidrita sólo se ha observado en relación con la polihalita, y llega a formar cristales de varios milímetros de longitud, que se intersectan entre sí en su crecimiento, o bien se disponen aisladamente entre la polihalita que reemplazan.

El tipo de glauberita que reemplaza a la polihalita es siempre del tipo poiquilítico (fotos 107 y 109), con las características que ya se han descrito. Esta transformación se realiza también sin ningún tipo de distorsión en el sedimento, en el que los esferulitos de polihalita se preservan como pseudomorfos. El hecho de que la polihalita tienda a preservar como pseudomorfos al yeso o glauberita primaria que reemplaza, y que la glauberita poiquilítica tienda a preservar como pseudomorfos a los esferulitos de polihalita que reemplaza, hace que en algunos casos puedan

observarse sobreimpuestas estructuras pseudomórficas de glauberita y/o yeso, y polihalita, en glauberita piquilítica (foto 110).

Con frecuencia, la glauberita poiquilítica y la anhidrita tabular están asociadas en un mismo nivel. En estos casos la anhidrita parece tener un origen anterior, pues el crecimiento de la glauberita se ve obstaculizado con frecuencia por la anhidrita al chocar contra uno o varios de sus cristales tabulares, y no se ha observado a la inversa (este fenómeno se presenta en diversos casos, por lo que no creemos que tenga un carácter particular).

Como proceso diagenético tardío, durante la exhumación del yacimiento, la polihalita es reemplazada también por yeso secundario.

5.2.2.3.- LA HALITA.

La halita está asociada principalmente a las facies laminadas de yeso, bien como niveles individuales de varios centímetros de espesor (foto 88), o bien como material intersticial (fotos 102 y 104) rellenando porosidades o reemplazando otros minerales. De "visu" presenta aspecto turbio y tonalidades rojizas o incolora. En algunos tramos la halita puede superar en cantidad al yeso, pero no hemos observado capas potentes de este mineral, con el grado de desarrollo y pureza como se ofrece en otras formaciones continentales (Remolinos...). No obstante, no descartamos la posibilidad de que en otros puntos de la formación la sal tenga mayor desarrollo que el observado en los sondeos.

Al microscopio se muestra en forma de mosaico granular anhedral de tamaño milimétrico (foto 115), en el que los cristales pueden estar en contacto directo mediante líneas de sutura irregulares, o bien pueden estar separados por finas intercalaciones de arcilla o carbonato como matriz intercrystalina.

En la halita se reconocen con frecuencia inclusiones fluidas (foto 116), sobre todo en las zonas centrales de los cristales, definiendo zonaciones de crecimiento. También se observan inclusiones de anhidrita, polihalita y glauberita.

La halita puede tener dos diferentes orígenes: a) como precipitado primario en el seno del lago salino del playa-lake, en las etapas de mayor concentración de las salmueras. b) como precipitado intersticial, rellenando porosidades del sedimento, como cemento, o bien reemplazando minerales de más baja concentración (glauberita, yeso ?). Este segundo caso es menos relevante.

5.2.2.4.- LA MAGNESITA.

El tipo de carbonato que de forma corriente acompaña a la glauberita y polihalita es la magnesita. Este mineral es poco común entre las facies de sulfato cálcico, donde es la dolomita el carbonato que las acompaña. En ambos casos (dolomita y magnesita) se presentan con textura micrítica, lo que hace que sólo puedan ser diferenciados por difracción de rayos-X. El estudio de la magnesita mediante el microscopio petrográfico y el microscopio electrónico no han permitido reconocer ningún tipo de componente entre la micrita.

La magnesita, al igual que la dolomita, tiene un origen diagenético temprano, como consecuencia de la reacción de los carbonatos primarios (calcita, aragonito) con las salmueras enriquecidas en Mg durante la etapas de mayor concentración de las mismas.

5.3.- GLAUBERITAS DEL SONDEO DE MARCILLA.

El testigo número 3 del sondeo de Marcilla, situado a una profundidad de 2084.5-2091 metros (fig. 27), presenta varios niveles de glauberita con litofacies nodular-enterolítica. Las características de este mineral son muy similares a las descritas para el yacimiento de Alcanadre, aunque de su estudio petrológico se deducen algunas particularidades:

En primer lugar, es de destacar la ausencia de polihalita, de la que no hemos observado ningún indicio

TABLA nüm 17		sulfatos y carbonatos correspondientes al sondeo RIOJA-1. Sector Alcanadre-Arrübal.									
muestra	ys	an	ce	gl	hx	po	ha	cc	do	mg	cz
S1-12.3		*		■							*
S1-19.2	■									◆	◆
S1-25.3	■	◆									
S1-31.9				■							
S1-36.2	■	*								*	
S1-41	■	◆								◆	◆
S1-46.5	■	*								*	*
S1-47.8		■				*					
S1-54.8	■	◆								◆	◆
S1-56.6	■	■				◆				■	◆
S1-61.2	■	■								◆	◆
S1-64.3	*	*		■						◆	*
S1-65.5				■						*	
S1-67.6		*		■						◆	◆
S1-67.7		*		■						◆	◆
S1-73.2						■	◆			◆	*
S1-73.5				◆		■	■			◆	
S1-80.5		■		■						◆	◆
S1-80.7a				*		■	◆			◆	
S1-80.7b				■			■			◆	
S1-81.4		*		■			■			◆	*
S1-82.1				■		■	■			◆	
S1-84.4a		◆				■				◆	
S1-84.4b							■			*	
S1-88	*	◆		■			■			◆	*
S1-90.4		*		*			■				
S1-94.2		■								◆	
S1-94.8		■								◆	◆
S1-98.8		■							◆		◆
S1-99.5		■							◆		◆

(inclusiones, pseudomorfos...). Este hecho puede deberse al carácter nodular de las facies que se reconocen en el sondeo (la polihalita es un mineral principalmente asociado a litofacies laminadas). Por ello, no descartamos la posibilidad de que este mineral esté presente en otros niveles de la formación.

TABLA nüm 18		sulfatos y carbonatos correspondientes a los sondeos RIOJA-2 y RIOJA-3.									
muestra	ys	an	ce	gl	hx	po	ha	cc	do	mg	cz
S2-69	■			*						◇	◇
S2-79	■	■		■						*	*
S2-28.3	◇	■					■			◇	*
S3-38	■	■								◇	*
S3-76.3	■	◇								◇	*
S3-82.9	■	◇								■	◇
S3-105							■			◇	

TABLA nüm 19		carbonatos y sulfatos correspondientes al corte de la ermita de Aradón.									
muestra	ys	an	ce	gl	hx	po	ha	cc	do	mg	cz
EA-1	■	◇									◇
EA-3	◇	■									
EA-4	◇	■									
EA-5	◇	■								*	*
EA-7	■	■									*
EA-9	*			■						◇	*
EA-10	*	*		■						◇	◇
EA-11				■						*	
EA-12	*					■					
EA-13	■			■							
EA-14	■			■							*
EA-15	■	◇									*
EA-17	◇	■									
EA-18	◇	◇		■							
EA-19	■			*						*	*
EA-20	■										*
EA-21	*			■						*	*
EA-22							■				
EA-23	*			■						◇	*
EA-s/n	◇			■						◇	◇

Las tablas número 17, 18 y 19, muestran los resultados de difracción de rayos-X en roca total, correspondientes a muestras de sulfatos y carbonatos de los yacimientos de Alcanadre-Arrúbal (Yesos de Los Arcos, Fm. Lerín). Las mineralogías que se indican son:

ys = yeso hx = hexahidrita do = dolomita
 an = anhidrita po = polihalita mg = magnesita
 ce = celestina ha = halita cz = cuarzo
 gl = glauberita cc = calcita
 ■ = mine. dominante ◇ = mine. secundario * = mine. traza

La glauberita, por el contrario, se presenta con las tres variedades que hemos descrito para el yacimiento de Alcanadre: primaria, secundaria por reemplazamiento de anhidrita, y poiquilítica. En este último caso, la glauberita reemplaza al yeso primario (foto 123), que se reconoce como pseudomorfo entre los cristales poiquilíticos. Este aspecto no ha sido observado en Alcanadre, pues la glauberita poiquilítica en aquel yacimiento, como ya se ha comentado, proviene del reemplazamiento de la polihalita.

Otro aspecto, también interesante a destacar sobre la glauberita del sondeo de Marcilla, es la presencia de frecuentes porfiroblastos de anhidrita (fotos 124 y 125), de hábito prismático, creciendo en el seno de sus cristales o bien sobre los contactos intercristalinos. También se observan buenos ejemplos de glauberita reemplazando anhidrita nodular (foto 126). Este reemplazamiento se inicia por los bordes de los nódulos y avanza hacia el interior de los mismos, o bien se presenta como porfiroblastos creciendo sobre la anhidrita.

La halita, con características también muy similares a la de los sondeos de Alcanadre, presenta frecuentes inclusiones de anhidrita y glauberita.

5.4.- GENESIS Y EVOLUCION DE LOS YACIMIENTOS

DE LAS FORMACIONES FALCES Y LERIN.

5.4.1.- EL MODELO DE PLAYA-LAKE CON DESARROLLO

DE GLAUBERITA-POLIHALITA-MAGNESITA

Al exponer la interpretación sedimentológica de las formaciones Falces y Lerín (apartado 4.2.5) hemos descrito el modelo de playa-lake como ambiente sedimentario que mejor permite explicar la distribución de facies y características de este tipo de evaporitas (figs. 25 y 26). Sin embargo, hasta ahora no hemos considerado la presencia de glauberitas y polihalitas en este ambiente deposicional y su significado sedimentológico.

La glauberita, junto con la thenardita, mirabilita y otros sulfatos, ha sido descrita como mineral frecuente en diversos playa-lakes actuales (HARDIE, 1968; JONES, 1965; EARDLEY, 1930; etc.), bien como eflorescencias en la superficie de los mismos, o bien como crecimientos intersticiales entre sus sedimentos. Las características hidroquímicas y sedimentológicas de los playa-lakes que describen estos y otros autores difieren siempre entre sí, por lo que resulta difícil establecer un único modelo genético que permita comparar con los yacimientos de las formaciones antiguas.

Para el caso de los yacimientos de glauberita (y/o thenardita) peninsulares que hemos citado, únicamente el modelo descrito por HARDIE (1968) sobre el Saline Valley, en el estado de California (E.E.UU.), presenta unas características comparables. El Saline Valley es un playa-lake en el que ha precipitado yeso, glauberita y halita, así como thenardita y mirabilita en menor importancia. Estas evaporitas, generadas principalmente de forma intersticial, se disponen formando una secuencia mineral que refleja claramente un gradiente salino creciente de las aguas subterráneas desde la periferia hacia el centro del playa-lake.

Las figuras 15 y 16, correspondientes al Saline Valley, permiten ver respectivamente: A) la zonación mineral yeso - yeso+glauberita - glauberita - glauberita+halita que resulta intersticialmente en el playa-lake como consecuencia del gradiente de salinidad. B) la evolución de la salmuera, inicialmente de composición $\text{Ca-Na-SO}_4\text{-HCO}_3$ y baja salinidad (10-30 gr/.), a otra de composición $\text{Na-Cl-(SO}_4\text{)}$ muy concentrada (270-290 gr/l.) en el centro del playa-lake.

A pesar de esta paragénesis mineral similar, hay en el Saline Valley varios aspectos sedimentológicos que difieren del caso de los yacimientos peninsulares, como son la ausencia en el mismo de polihalita y carbonatos (estos últimos han precipitado tempranamente entre los materiales aluviales que bordean al playa-lake), la ausencia también de anhidrita nodular y yeso laminado primario, y la presencia de sepiolitas como sedimento encajante entre los sulfatos del Saline Valley, que no se han reconocido en las formaciones peninsulares.

Para el caso de los yacimientos glauberíticos de las formaciones Falces y Lerín, la relación de litofacies permite establecer un modelo sedimentario de tipo playa-lake como el que se describe en la figura 30. Este modelo es igual al propuesto con carácter más amplio para el conjunto de ambas formaciones, aunque en este caso se superponen la glauberita, polihalita y magnesita a las facies de yeso-anhidrita en la zona más próxima al lago salino (zonas "D" y "E"). Las zonas más distales permanecen invariables.

La glauberita, con respecto a la polihalita, ocupa una posición más externa, y hacia el centro del playa-lake pierde progresivamente desarrollo entre las facies laminadas de yeso. La polihalita se presenta más próxima al lago salino (zona "E"), y en menor importancia también entre la halita precipitada en el propio lago salino (zona "F"). La magnesita está bien representada como carbonato encajante en toda el área del playa-lake (zonas "D", "E" y "F"), alternando con la dolomita en las zonas más externas o bien como carbonato dominante en las más internas.

5.4.2.- PRECIPITADOS PRIMARIOS Y DIAGENESIS TEMPRANA.

En una secuencia de salinidad creciente debida a progresiva evaporación de las aguas superficiales y subterráneas del playa-lake, podemos distinguir la siguiente sucesión de procesos sedimentarios (fig 54):

A) Durante los periodos de lluvias el agua que desciende de las cordilleras a través de los sistemas aluviales, en forma de lámina de agua no canalizada ("sheet-flood"), recarga el sistema evaporítico. En este momento el playa-lake presenta su mayor dilución y expansión lacustre. Con el agua llega en suspensión cantidades variable de sedimento detrítico fino (lutitas), que se depositan principalmente en los márgenes del playa-lake, dando lugar al material encajante, aunque en menor grado también puede llegar a extenderse sobre el lago salino.

B) Para poder explicar la formación de las diferentes mineralogías que constituyen el yacimiento nos es preciso

partir de una composición inicial de las aguas del tipo Ca-Na-SO₄-(HCO₃)-(Mg)-(Cl)-(K) (similar en buena parte a la descrita por HARDIE para el Saline Valley).

Los primeros estadios de concentración producen la precipitación de carbonatos en la interfase agua-sedimento. Este fenómeno producirá un empobrecimiento en el agua de HCO₃ y también en Ca. De la escasa cantidad de carbonato que se observa en el yacimiento, en relación con el yeso precipitado en estadios más avanzados de concentración, se deduce que la relación HCO₃/Ca es baja. Dado que en este momento el lago tiene su mayor extensión sobre el medio sedimentario, el carbonato precipitado tendrá también un radio de dispersión mayor que las sales que precipitarán más adelante.

C) Con la evaporación el área lacustre disminuye progresivamente y el agua se va concentrando. Tras la precipitación de los carbonatos sigue la del sulfato cálcico como yeso que sedimenta en el fondo del lago salino en forma de finos cristales, o bien entre el sedimento blando que bordea el lago como cristales de yeso intersticial. Esta fase producirá un empobrecimiento de las salmueras en SO₄ y especialmente en Ca. La salmuera resultante presentará al final de la precipitación del yeso una composición fundamentalmente del tipo Na-Cl-(SO₄)-(Ca)-(Mg)-(K).

En una posición marginal en el playa-lake, y a partir de las salmueras intersticiales, precipitará también el sulfato cálcico como anhidrita nodular.

D) Tras la precipitación del yeso el lago salino tiene un área de expansión muy reducida y la mayor parte de procesos sedimentarios proseguirán en subsuelo, como crecimientos intersticiales.

La glauberita se formará posiblemente en la fase previa y durante la precipitación de la halita en el lago salino, cuando la relación Ca/SO₄ es muy baja, y el Na sustituye en parte al Ca en la precipitación del sulfato. No está claro si las variedades de glauberita primaria y secundaria se forman simultáneamente, o bien una de ellas tiene un carácter precoz con respecto a la otra. Es posible que en un mismo nivel se produzca primero una glauberita por

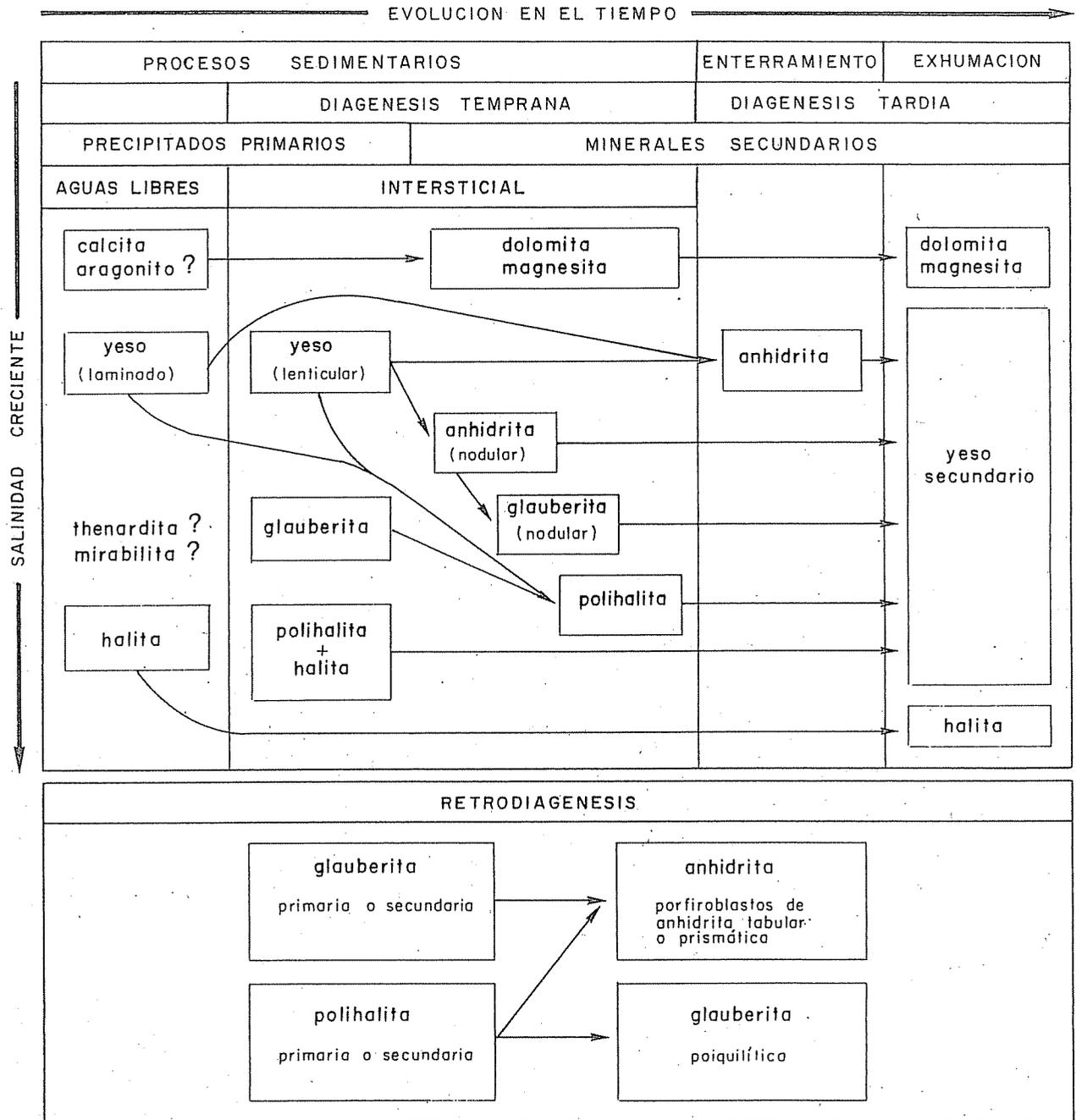


Figura 53.- Esquema de evolución diagenética de los minerales evaporíticos que constituyen el yacimiento de Alcanadre.

reemplazamiento y posteriormente prosiga el crecimiento de ésta de forma primaria como sobrecrecimiento. También puede darse un crecimiento, a la vez, de glauberita primaria y secundaria, formandose la primera entre el sedimento lutítico o carbonatado y la segunda por reemplazamiento de anhidrita nodular. En cualquier caso, el origen de ambas variedades de glauberita están en relación con un mismo estadio de evolución de las salmueras.

La presencia de cristales de glauberita entre la sal y los fenómenos de reemplazamiento de glauberita por la sal justifica que la precipitación de ambos minerales no puede estar tampoco muy alejada entre sí en la evolución de las salmueras.

E) La precipitación de halita en el lago supone el estadio previo a su total desecación. En este momento las salmueras han liberado los elementos que originalmente constituían su composición principal, y queda ahora enriquecida en los iones que no han formado parte de las fases sólidas precipitadas. En este caso son de destacar el Mg y K como elementos importantes en las salmueras residuales, que reaccionarán con los carbonatos y sulfatos de más baja concentración para dar la polihalita y magnesita.

La polihalita está relacionada con la fase final de precipitación de la halita, o con posterioridad a la precipitación de la misma, mientras que la glauberita es previa a la precipitación de la halita, o bien sincrónica a las primeras etapas de su precipitación.

No se descarta la posibilidad de que originalmente en el medio sedimentario precipitaran otras sales, como thenardita o mirabilita, de las que en la actualidad no nos queda ningún tipo de indicio por haberse disuelto o transformado durante la diagénesis temprana.

En resumen puede decirse, que los yacimientos descritos son el resultado de la evolución de las salmueras, formando una secuencia evaporítica que a salinidad creciente viene representada por las siguientes fases minerales:

- 1º carbonatos
- 2º yeso/anhidrita
- 3º glauberita/halita
- 4º halita/polihalita

5.4.3.- PROCESOS RETRODIAGENETICOS.

Hemos expuesto, al describir la glauberita y polihalita, algunos fenómenos de reemplazamiento de minerales de alta salinidad, por minerales de más baja salinidad, que indican reacciones diagenéticas inversas o retrodiagenéticas.

Interpretamos estos fenómenos como el resultado de la dilución de las salmueras y reacción de éstas con minerales de alta salinidad para dar nuevos minerales más baja concentración. Estas diluciones pueden ocurrir periódicamente como consecuencia de las recargas del medio evaporítico con aguas procedentes de los márgenes de cuenca, lluvias, etc.

Entre estos fenómenos retrodiagenéticos son de destacar (fig. 55):

- * Reemplazamiento de polihalita por glauberita poiquilítica.
- * Reemplazamiento de polihalita por anhidrita tabular.
- * Reemplazamiento de glauberita por anhidrita prismática.

5.4.4.- DIAGENESIS TARDIA.

Durante el enterramiento, el único proceso diagenético significativo que tiene lugar es la anhidritización del yeso primario que no ha sido transformado en otros minerales en diagénesis temprana. Las diferentes variedades de polihalita, glauberita y anhidrita, no muestran cambios significativos por causa del enterramiento.

Cuando el yacimiento es nuevamente exhumado, se activan de nuevo los procesos diagenéticos (diagénesis tardía), como consecuencia de la acción de las aguas meteóricas sobre las evaporitas. Este hecho, además de producir la transformación habitual de la anhidrita a yeso secundario, también afecta a los otros sulfatos y a la sal:

La glauberita y polihalita tienden también a ser transformados en yeso secundario en superficie o subsuperficie. Al igual que ocurre con la anhidrita, esta

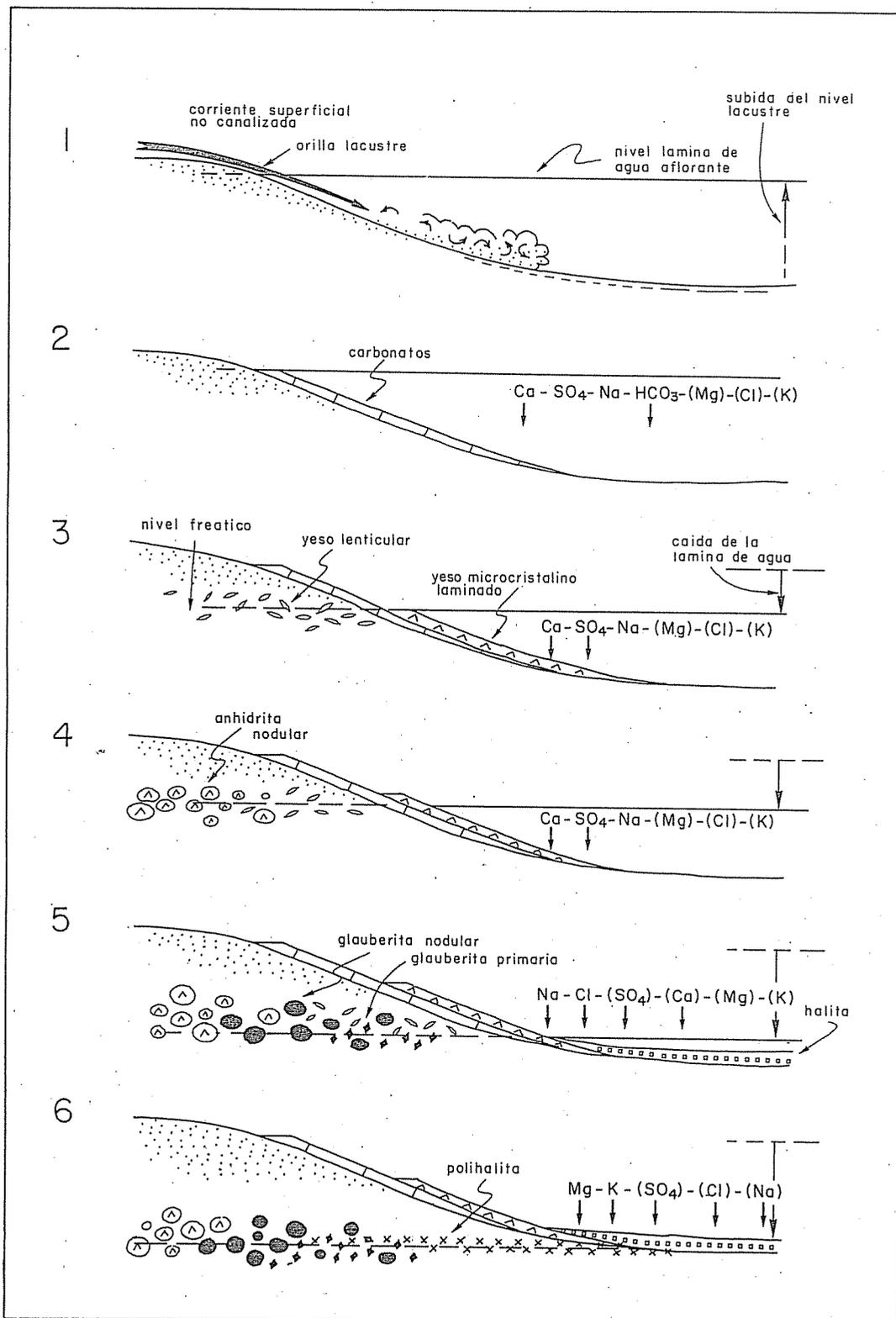


Figura 54.- Esquema evolutivo ideal de una cuenca evaporítica con precipitación, a salinidad creciente, de carbonatos, yeso, anhidrita, glauberita, halita y polihalita, como es el caso de las formaciones Falces y Lerín.

transformación no produce cambios de volumen o deformaciones. La polihalita o glauberita se reconocen en estos casos como pseudomorfos en el yeso en lámina delgada.

También se dan procesos de disolución total o incongruente en estas sales en superficie como consecuencia de la circulación de aguas, ya que estos materiales tienen una elevada solubilidad. La halita es mucho más susceptible a la disolución por lo que raramente llega a mostrarse en superficie.

5.4.5.- SIGNIFICADO SEDIMENTOLOGICO DE LOS YACIMIENTOS DE GLAUBERITA.

La mayor parte de los materiales evaporíticos que constituyen las formaciones Falces y Lerín reflejan un ambiente sedimentario con precipitación principalmente de sulfato cálcico (yeso, anhidrita) y halita. En este sentido, la presencia de yacimientos de glauberita pueden tener dos posibles explicaciones: 1) momentos de especial desarrollo evaporítico en la cuenca (cambios climáticos, cambios en el quimismo de las salmueras, ...), 2) niveles en los que se han dado las condiciones favorables para la preservación de estos sulfatos en el registro evaporítico de la cuenca.

De estos dos puntos nos inclinamos más por aceptar el segundo, pues las condiciones sedimentológicas que reflejan las evaporitas de las formaciones Falces y Lerín son constantes a lo largo de toda la serie, sin que en ellas se reflejen especiales cambios ambientales que puedan justificar el desarrollo periódico de niveles de glauberita. Parece más aceptable el hecho de que la glauberita y/o polihalita puedan haberse formado en cualquier nivel de las formaciones Falces y Lerín, y que sólo en algunos de estos niveles hayan llegado a preservarse, habiéndose disuelto o transformado en el resto de la serie como consecuencia de su carácter soluble en un medio evaporítico periódicamente inundado por las aguas aluviales.

Esta explicación concuerda con el hecho de que los yacimientos de glauberita estén situados principalmente en los niveles de mayor desarrollo y expansión de las facies

evaporíticas, que representan a la vez los momentos de mínima influencia aluvial.

La precipitación de sales efímeras en los medios evaporíticos continentales son corrientes, especialmente por lo que se refiere a las sales más solubles. Los procesos retrodiagenéticos que se han observado en los yacimientos de Alcanadre y Marcilla permiten también explicar la transformación de los sulfatos más solubles a anhidrita o yeso. Ambos fenómenos (disolución y reemplazamiento) son suficientes para explicar que de forma temprana la glauberita y polihalita hayan podido desaparecer, y en la actualidad no nos quede de ellas ningún vestigio.

Estas consideraciones, no obstante, se basan en una visión parcial de los yacimientos glauberíticos en las formaciones estudiadas pues, como ya hemos comentado, estos yacimientos tienen con toda seguridad un mayor desarrollo en subsuelo del que hemos observado en superficie y sondeos.

5.5.- COMPARACION CON OTROS YACIMIENTOS PENINSULARES.

Los yacimientos de Villarrubia de Santiago y Cerezo de Río Tirón presentan ciertas diferencias con respecto a los yacimientos que hemos descrito en Navarra y La Rioja. En los diferentes casos el contexto sedimentológico es similar, tratándose de lagos salinos efímeros que ocupan la parte central de cuencas continentales endorreicas. Sin embargo, las características petrológicas son particulares en cada caso:

5.5.1.- VILLARRUBIA DE SANTIAGO (Toledo).

Este yacimiento es con toda seguridad el mejor conocido dados los diversos estudios geológicos y geoeconómicos que sobre el mismo se han realizado en las últimas décadas (ver apartados de antecedentes). Está constituido por glauberita, thenardita y polihalita, así como mirabilita y magnesita de forma subordinada (figs. 53 y 54). La thenardita forma un único tramo de unos 5 a 20 m. de potencia, intercalado en la

parte superior de la serie evaporítica. Por debajo de este tramo se presenta una serie donde alternan las capas de glauberita, halita y polihalita con matriz arcillosa y carbonatada (ORTI et.al., 1979).

La capa de thenardita presenta una estructura en niveles de aspecto cristalino masivo, con juntas de estrato onduladas con arcillas y glauberita como material encajante. La glauberita también se presenta como inclusiones entre la thenardita. ORTI et.al. (1979) consideran el origen de la thenardita como secundario, reemplazando a mirabilita primaria, de forma ligeramente posterior a la sedimentación de la misma.

La mirabilita, thenardita y las fases de glauberita hidratada que se describe en Villarrubia (ORTI. et.al. 1979) no están presentes en Alcanadre. La mirabilita proviene de la hidratación de la thenardita, por efecto de circulación de aguas de infiltración. El tipo de glauberita hidratada no es del todo bien conocida: puede tratarse, (según los mismos autores) de hidroglauberita ($5\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) o bien de la variedad de hidrato de glauberita de composición $\text{CaSO}_4 \cdot 1,6\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 1,5\text{H}_2\text{O}$.

Otro aspecto de interés que diferencia ambos yacimientos es el que se refiere al material encajante, pues en Villarrubia éste es fundamentalmente siliciclástico (arcillas) con menor presencia de carbonato (magnesita). En Alcanadre, como ya hemos visto, la dolomita y magnesita están bien representadas en todos los niveles como matriz. La polihalita muestra idénticas características en ambos yacimientos pero parece estar mejor desarrollada en Alcanadre.

En cuanto a la glauberita, si bien el Villarrubia se describe una mayor variedad de facies minerales, muchas de las cuales no hemos reconocido en Alcanadre (variedades ramoso-fascicular, fibrosa, porfiroblástica...), en este último yacimiento parece que la historia diagenética de la glauberita es más completa al presentar facies retrodiagenéticas que no están presentes en Villarrubia.

Finalmente, un último aspecto que diferencia los dos yacimientos es el que se refiere a las facies de sulfato cálcico (yeso-anhidrita) entre las que se emplazan las

glauberitas y thenarditas: en Alcanadre los niveles de glauberita se sitúan entre facies yesíferas predominantemente laminadas junto con sal, mientras que en Villarrubia el sulfato cálcico encajante es fundamentalmente de tipo nodular y laminado-nodular. Ello implica, en el primer caso, que la glauberita tienen una relación con medios lacustres mejor desarrollados, mientras que en el segundo caso la glauberita estaría formado parte de un medio lacustre mucho más efímero dominado por las facies nodulares de anhidrita.

ORTI et.al. (1979) y ORTI y PUEYO (1980) interpretan este yacimiento como el resultado del desarrollo de un playa-lake con periódicas inundaciones y desecaciones, formándose un cinturón de facies de glauberita (y thenardita) entre el cuerpo salino central (salt-pan) y el mud-flat anhidrítico periférico. La figura 53 muestra el modelo sedimentológico propuesto por los citados autores para este yacimiento.

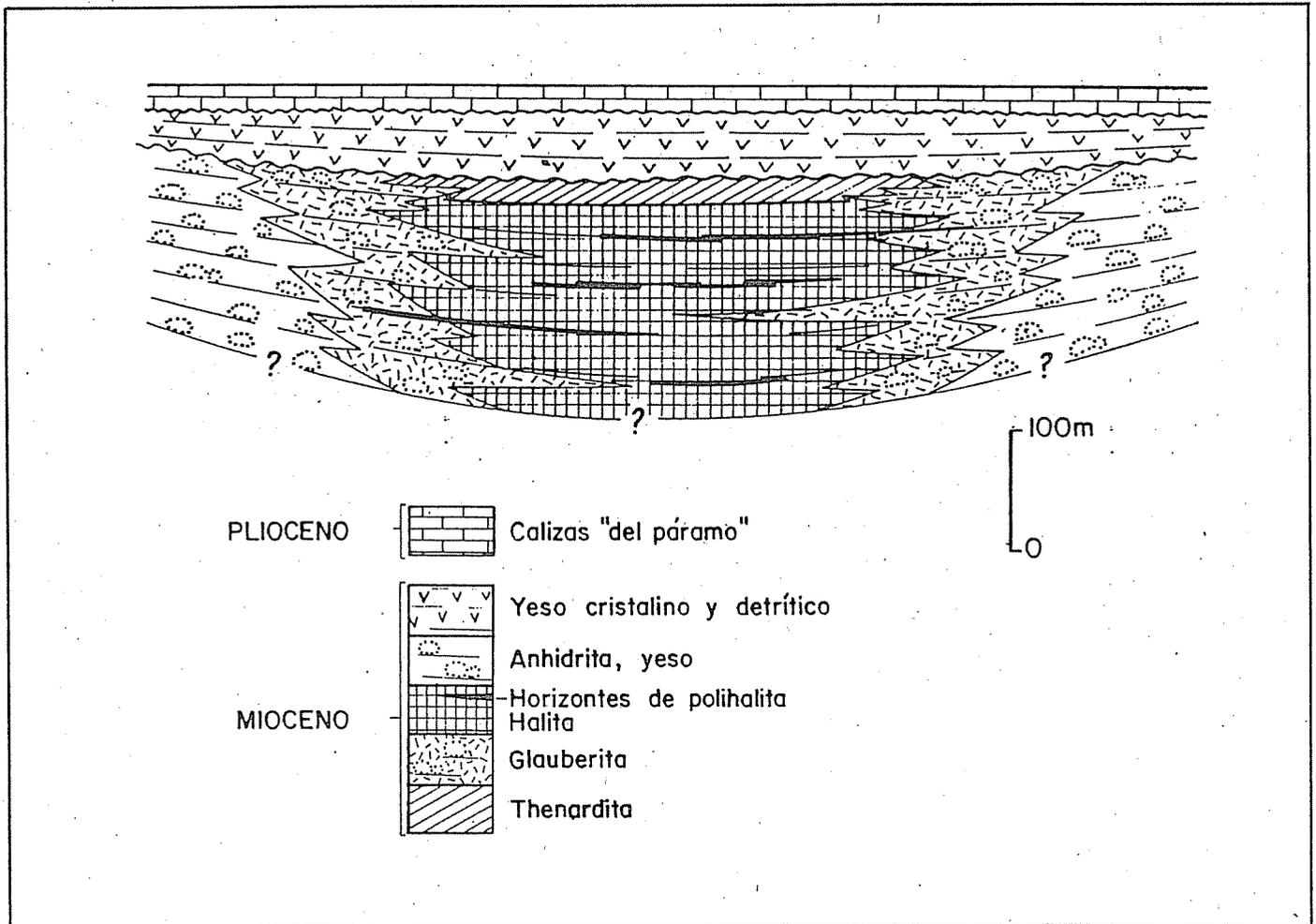
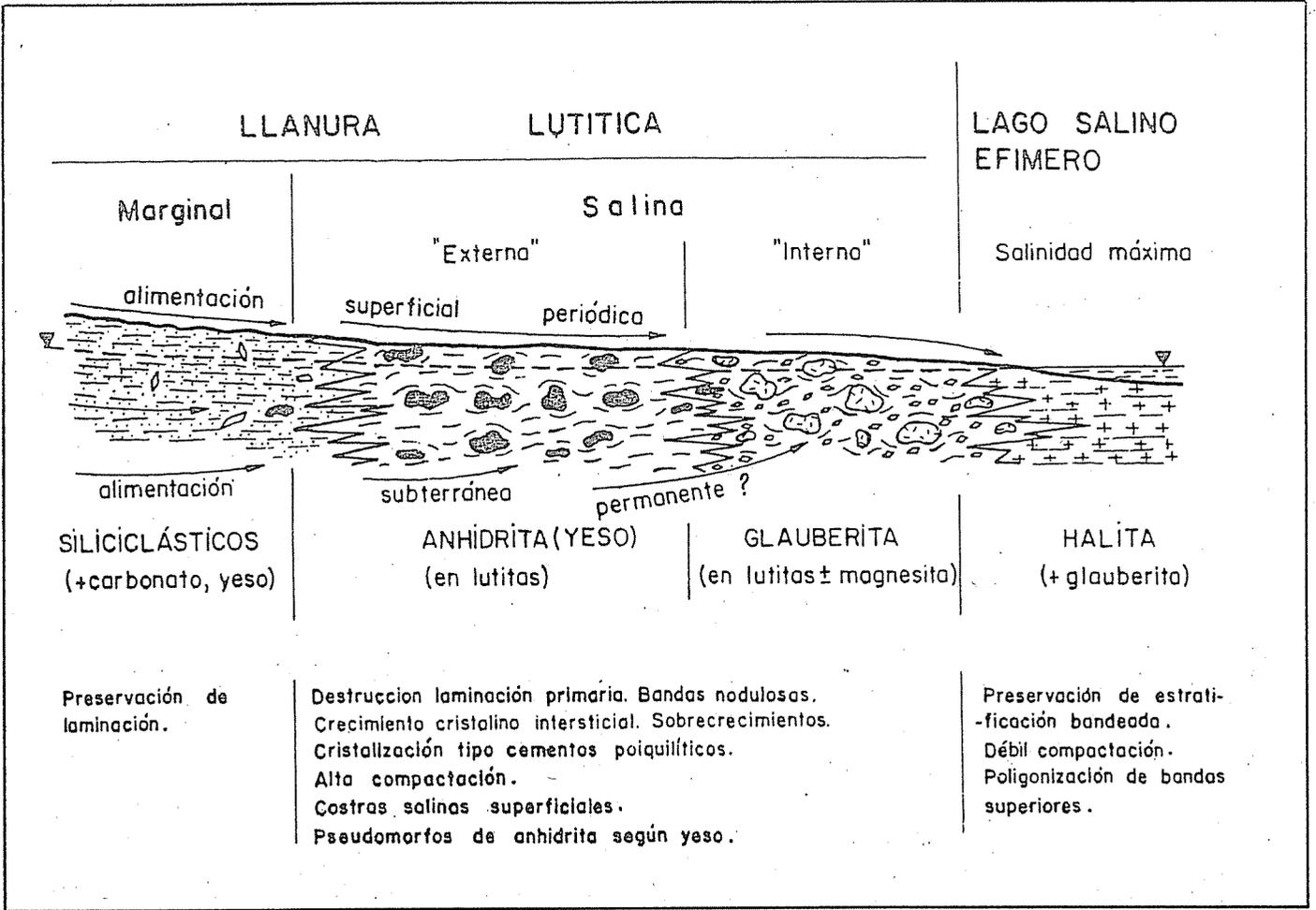
5.5.2.- CEREZO DE RIO TIRON (Burgos).

Este yacimiento es menos conocidos desde el punto de vista de su petrología y sedimentología. Únicamente en MENDUIÑA et.al. (1984) se presentan datos sobre sus características.

El aspecto que con mayor relevancia distingue este yacimiento de los de Alcanadre y Villarrubia es la ausencia en el mismo de halita, polihalita, y magnesita (así como thenardita y mirabilita), confiriéndole por tanto una paragénesis más pobre en facies minerales que la de los otros dos yacimientos.

Figura 55.- Esquema de distribución de facies evaporíticas en un lago salino efímero y la llanura lutítica periférica, propuesto por ORTI et.al. (1979) para el yacimiento de Villarrubia de Santiago (Toledo).

Figura 56.- Esquema de distribución de facies en la formación evaporítica miocena de la cuenca del Tajo, en las proximidades de Villarrubia de Santiago (ORTI y PUEYO, 1980).



En Cerezo de Rio Tirón la glauberita se presenta en un tramo de 70 m. de potencia, situado en la parte superior de una formación evaporítica de yeso-anhidrita que constituye el techo del Terciario en la región. Esta formación fue llamada por RIBA (1955) como "facies yesíferas de Cerezo-Altale", y en ella los niveles glauberíticos afloran cartográficamente en su margen orientan, a lo largo de una línea Norte-Sur entre las poblaciones de Cerezo de Rio Tirón y Belorado.

La glauberita (MENDUIÑA et.al., 1984) se presenta en forma de seis capas de varios metros de espesor cada una de ellas, separadas por intercalaciones de arcilla, margas y anhidrita también de varios metros de espesor. La glauberita es masiva o laminada, pudiéndose distinguir en ella tres litofacies diferentes: 1) glauberita masiva, con cristales de 0.3-4 mm. de longitud y matriz carbonatada intercrystalina, en los que se reconocen inclusiones de anhidrita, 2) glauberita laminada, con alternancia glauberita-carbonato, y 3) glauberita como cristales dispersos en niveles predominantemente carbonatados. El carbonato es siempre del tipo dolomicrita, y en él se llegan a reconocer algunos componentes (oolitos, ostrácodos ...).

MENDUIÑA et.al. (1984) interpretan este yacimiento como el resultado de la sedimentación de una cuenca evaporítica del tipo "lago salino perene". La alternancia de capas de glauberita y capas de lutita-anhidrita lo interpretan como variaciones climáticas que han afectado las condiciones ambientales del medio lacustre, mientras que dentro de cada capa, la laminación alternante glauberita-carbonato o anhidrita-lutita, la interpretan como variaciones estacionales.

Estos mismos autores consideran también que el lago debió tener una cierta profundidad ya que las facies evaporíticas lateralmente pasan a cuerpos detríticos de tipo deltaico con estructuras turbidíticas que reflejan importantes cambios de pendiente en los bordes del lago en beneficio de su batimetría. También consideran que el lago podría tener una cierta conexión marina.

A nuestro juicio, y después de algunas observaciones realizadas sobre esta formación en Cerezo de Rio Tiron y localidades próximas, estas facies evaporíticas no difieren

mucho de las que hemos descrito para las formaciones Falces y Lerín, por lo que no dudamos en pensar que su origen es también similar.

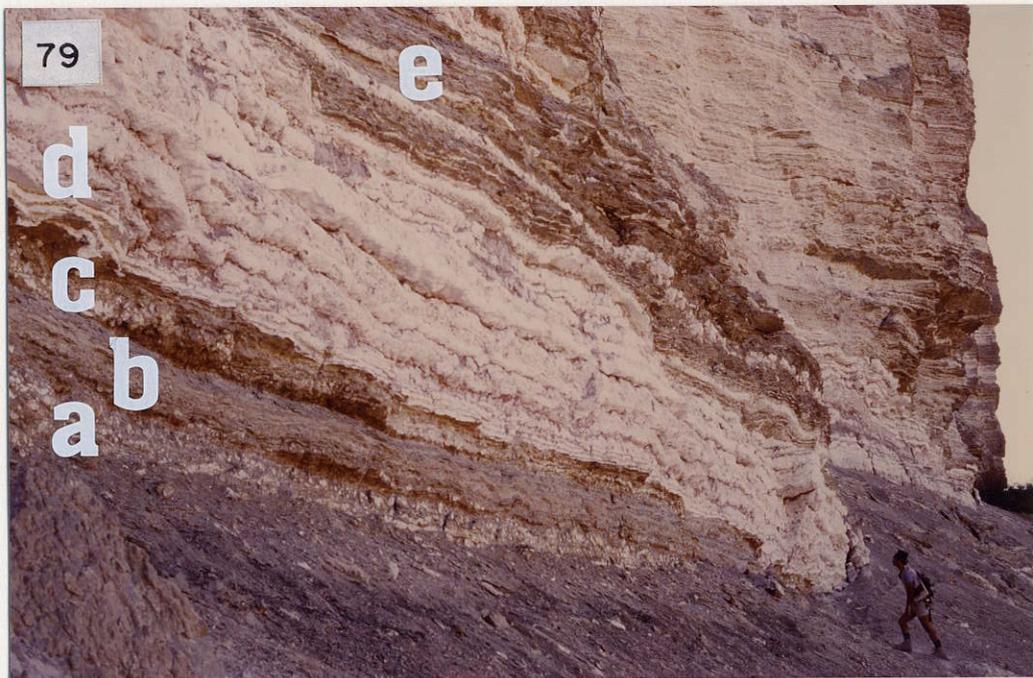
L A M I N A 18.

Foto 79.- Aspecto general de una de las capas principales de glauberita en las proximidades de la ermita de Aradón: a) y c) anhidrita nodular; b) yeso laminado; d) glauberita; e) yeso laminado con niveles de glauberita. El color blanco intenso de la glauberita es debido a la alteración del mineral en superficie, que genera un recubrimiento de eflorescencias de sulfato sódico.

Foto 80.- Nivel enterolítico de glauberita entre yeso laminado.

Foto 81.- Nivel nodular-enterolítico de glauberita entre yeso laminado. Se observa el reemplazamiento de la glauberita (g) por yeso secundario (y), que afecta los bordes del nivel nodular.

Foto 82.- Niveles nodular-enterolíticos de glauberita entre yeso laminado (detalle del tramo e de la foto 79).



L A M I N A 19.

Foto 83.- Glauberita nodular de grano fino con estructuras fluidales. Testigo de sondeo S1-67.6.

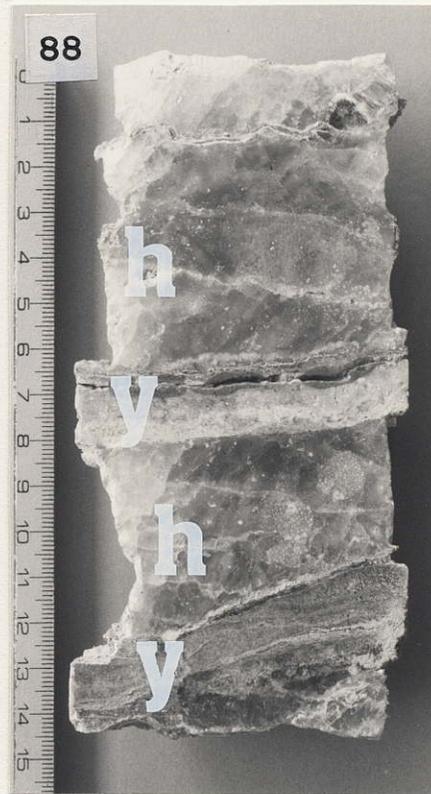
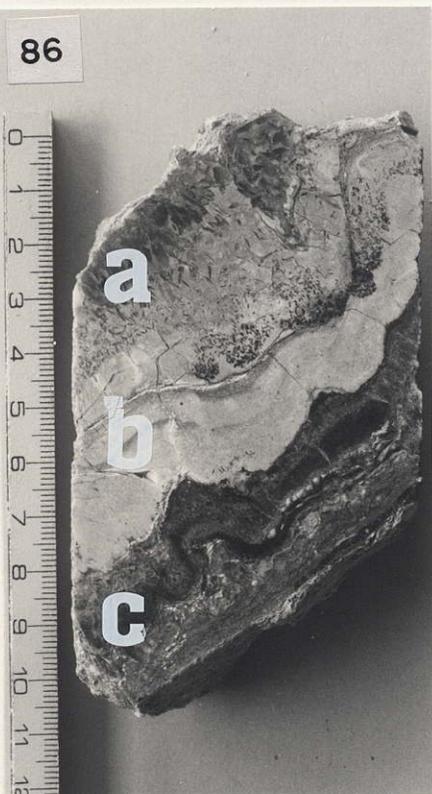
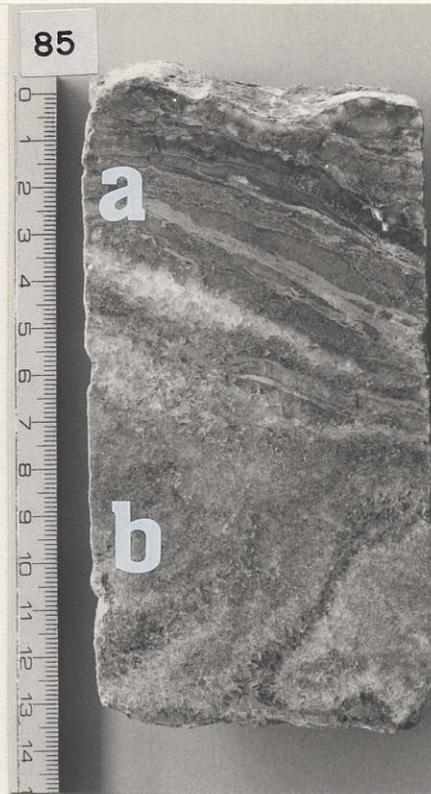
Foto 84.- Yeso laminado. Testigo de sondeo S1-41.

Foto 85.- a) yeso y carbonato en litofacies laminada; b) glauberita nodular. Testigo de sondeo S1-64.3.

Foto 86.- a) pseudomorfos de yeso lenticular primario en yeso alabastrino, entre magnesita; b) magnesita; c) yeso laminado con morfología contorsionada de posible origen algal. Testigo de sondeo S3-82.9.

Foto 87.- Glauberita masiva de grano fino. Testigo de sondeo S1-26.4.

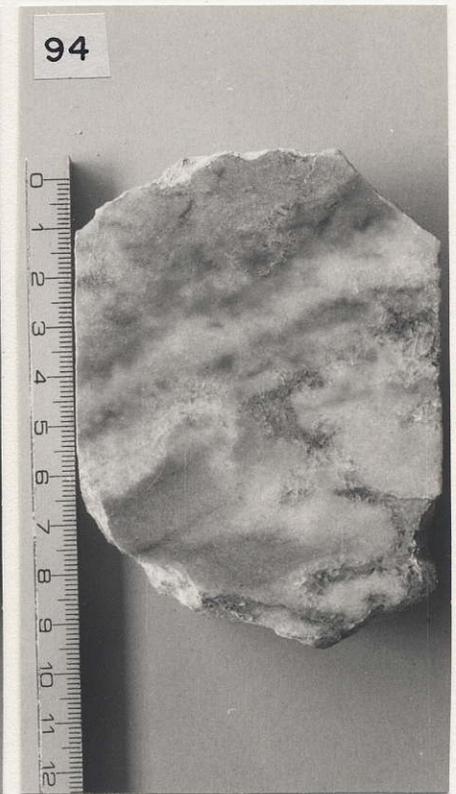
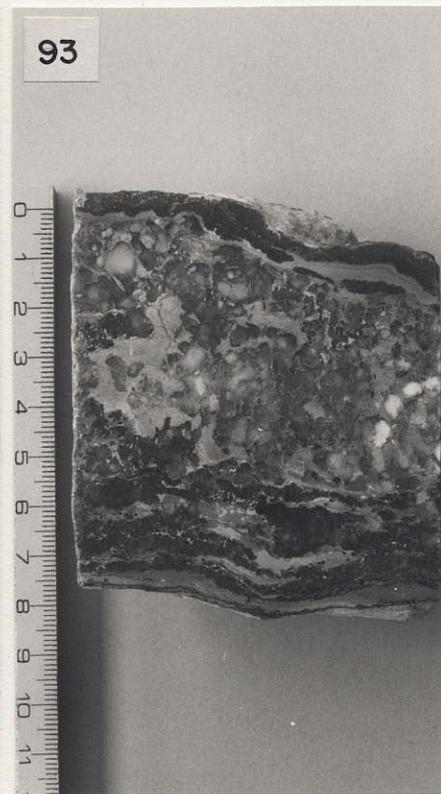
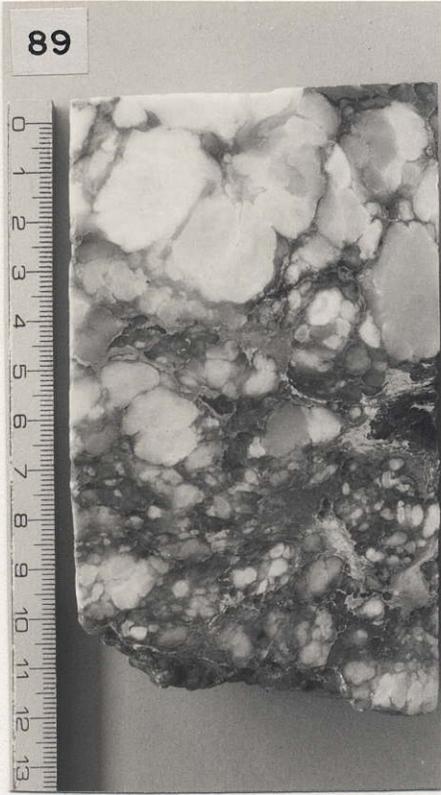
Foto 88.- Niveles de halita (h) separados por finas capas de yeso secundario laminado (y).



L A M I N A 20.

Fotos 89, 90, 91, 92 y 93.- Anhidrita nodular-micronodular con matriz carbonatada (dolomicrita). Testigos de sondeo S1-99.5, S1-112.5, S1-94.8, S1-s/n y S1-65.5.

Foto 94.- Glauberita nodular de grano fino. Testigo de sondeo S1-65.5.



L A M I N A 21.

Foto 95.- Microestructura idiomórfica de glauberita. Se observa bien el hábito romboédrico de la glauberita cuando la matriz carbonatada intercrystalina (en negro) es abundante (microfotografía de la muestra S2-57.2).

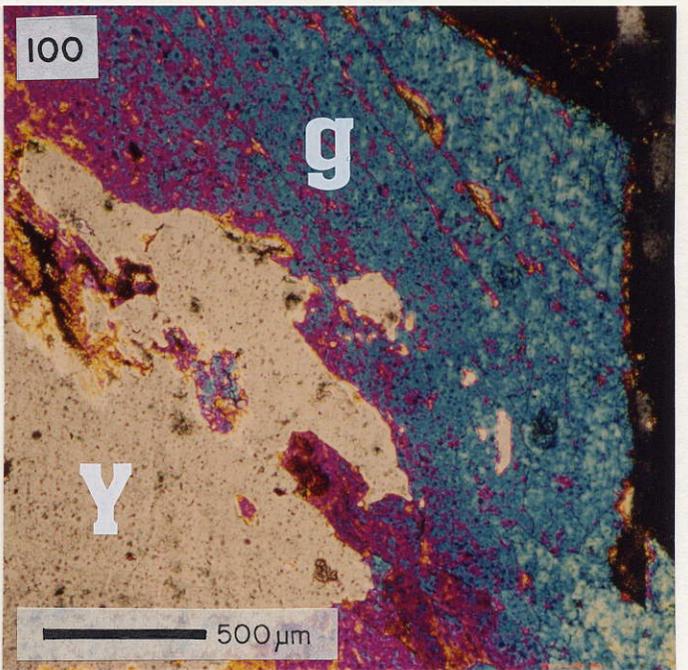
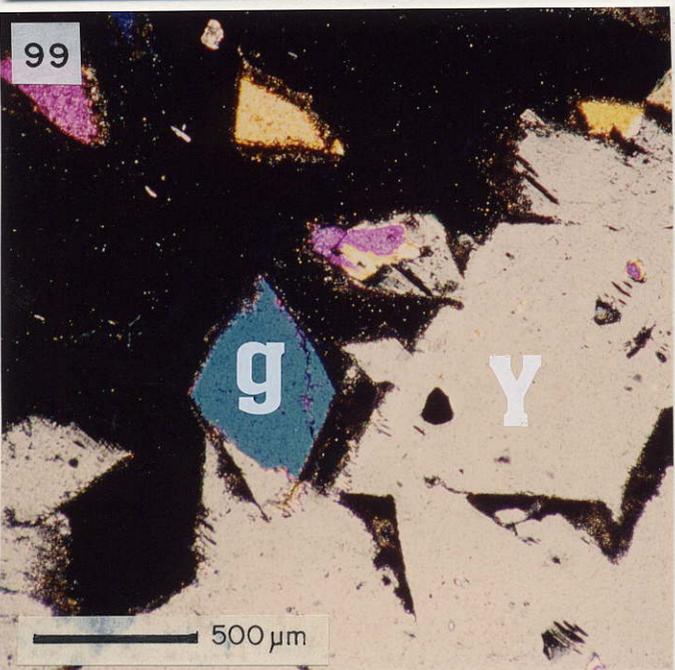
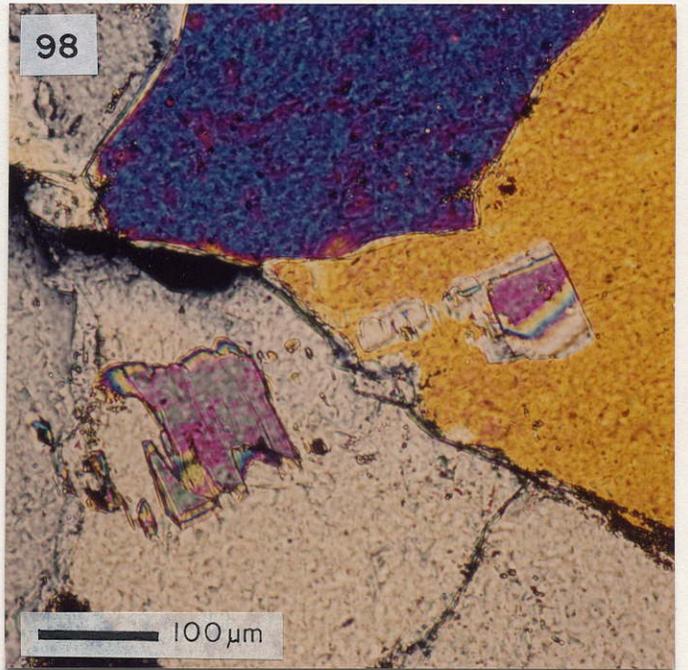
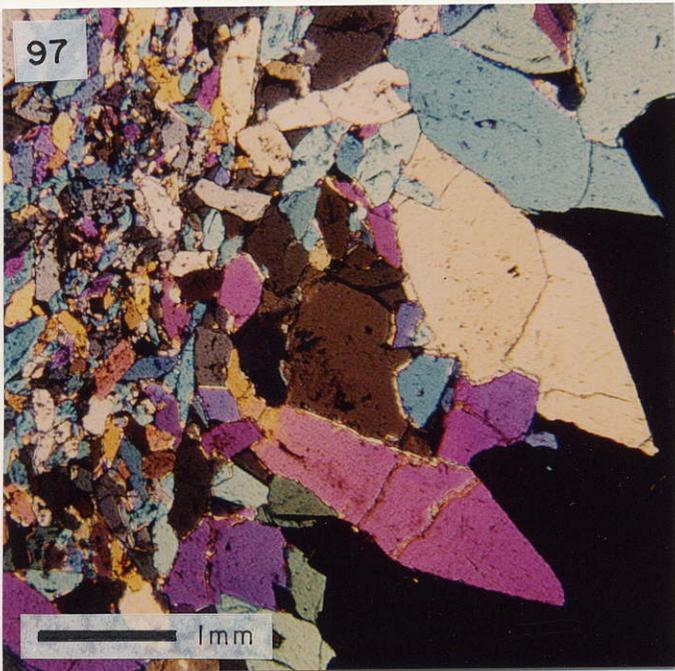
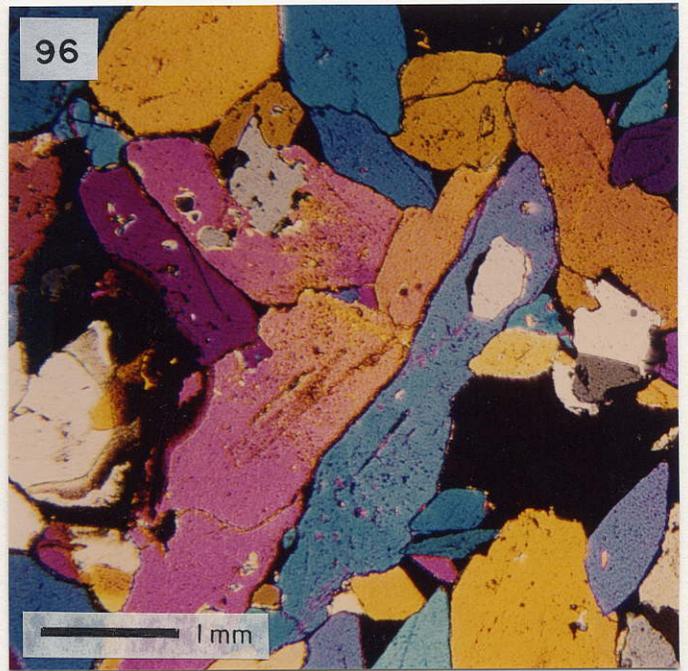
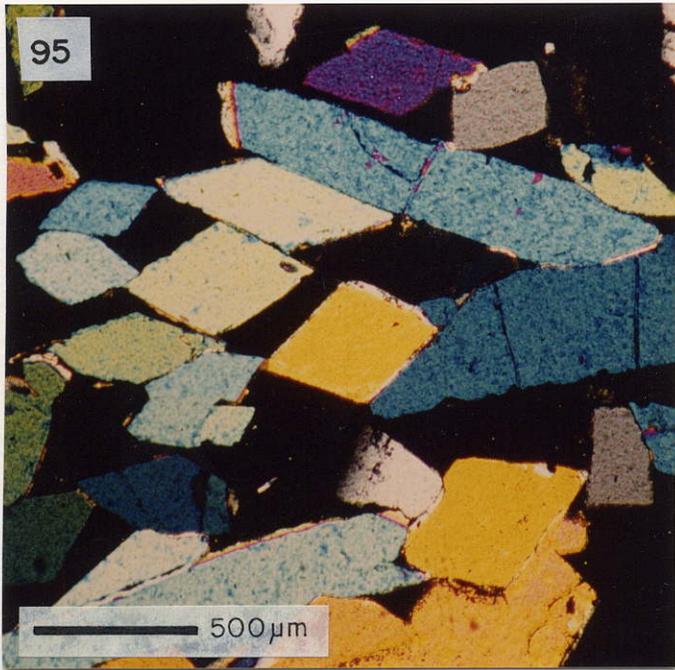
Foto 96.- Microestructura subhedral de glauberita. La glauberita forman un denso mosaico de cristales con bordes interpenetrados en el que la matriz intercrystalina está prácticamente ausente (microfotografía de la muestra S1-31.9).

Foto 97.- Microestructura granocreciente (del núcleo al borde del nódulo) en una glauberita nodular. En la parte interna del nódulo la glauberita es de tamaño fino y anhedral y hacia los bordes los cristales tienden a ser idiomórficos y de tamaño mayor. En negro, matriz carbonatada internodular (microfotografía de la muestra S1-67.7).

Foto 98.- Inclusiones de anhidrita en cristales secundarios de glauberita. Se observan los bordes cristalinos de la anhidrita corroidos por la transformación mineral (microfotografía de la muestra S2-57.2).

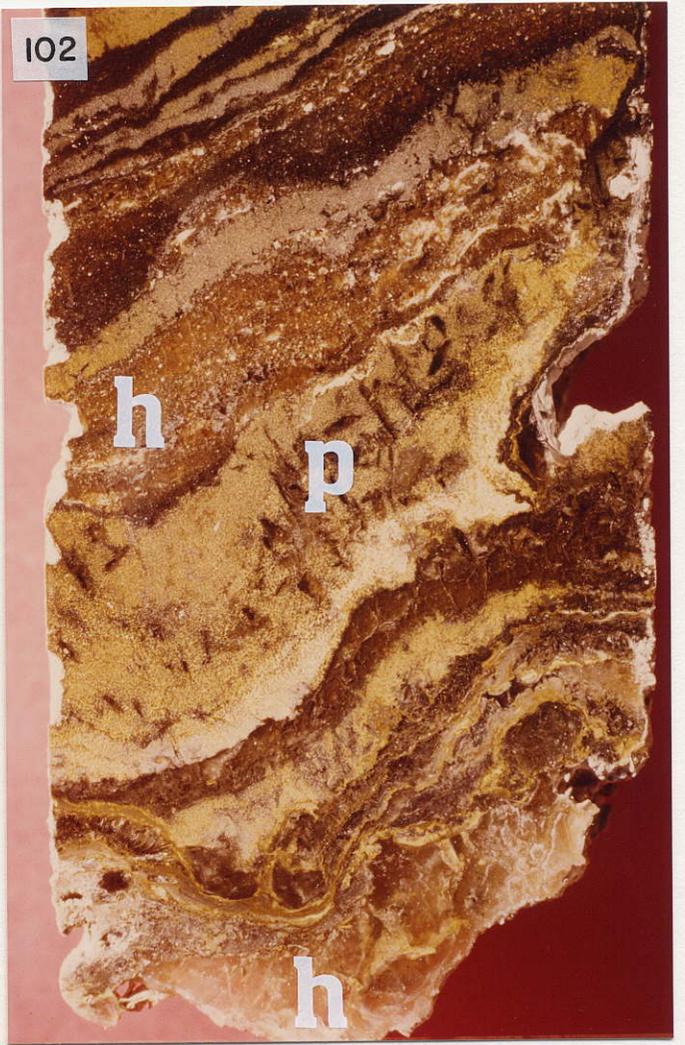
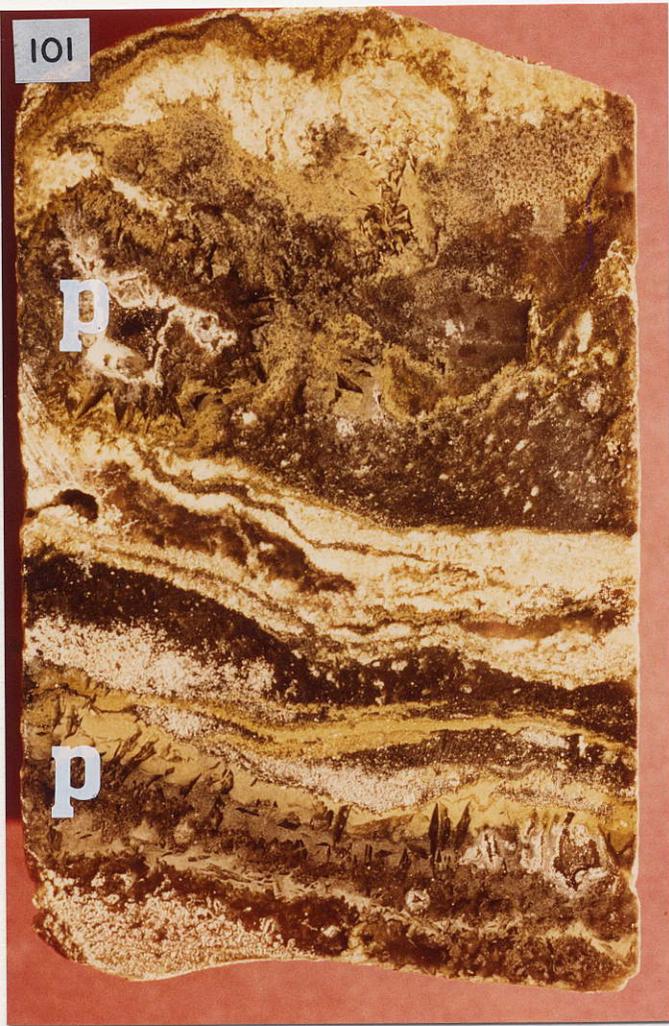
Foto 99.- Yeso secundario (y) reemplazando a cristales idiomórficos de glauberita (g). Se observa como la microestructura de la glauberita es preservada en el yeso como pseudomorfos (microfotografía de la muestra S1-64.3).

Foto 100.- Cristal de glauberita (g) parcialmente reemplazado por yeso secundario (y) (microfotografía de la muestra EA-10a).



L A M I N A 22.

Fotos 101, 102, 103 y 104.- Diferentes ejemplos de litofacies laminadas de polihalita. Testigos de sondeo S1 (S1-s/n, S1-84.8, S1-80.7 y S1-82.1) en las proximidades de la ermita de Aradón. Se observan pseudomorfos de glauberita y/o yeso (p); intercalaciones de halita (h); esferulitos de polihalita de tamaño milimétrico (e). Los niveles de tonalidad ocres corresponden a niveles ricos en carbonato como matriz entre la polihalita.



L A M I N A 23.

Foto 105.- Microfotografía de un esferulito de polihalita correspondiente a la muestra S1-80.7.

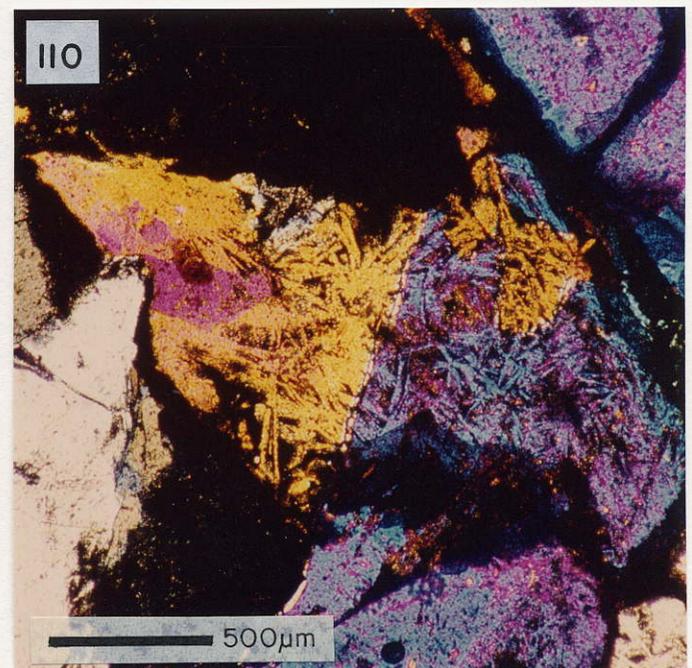
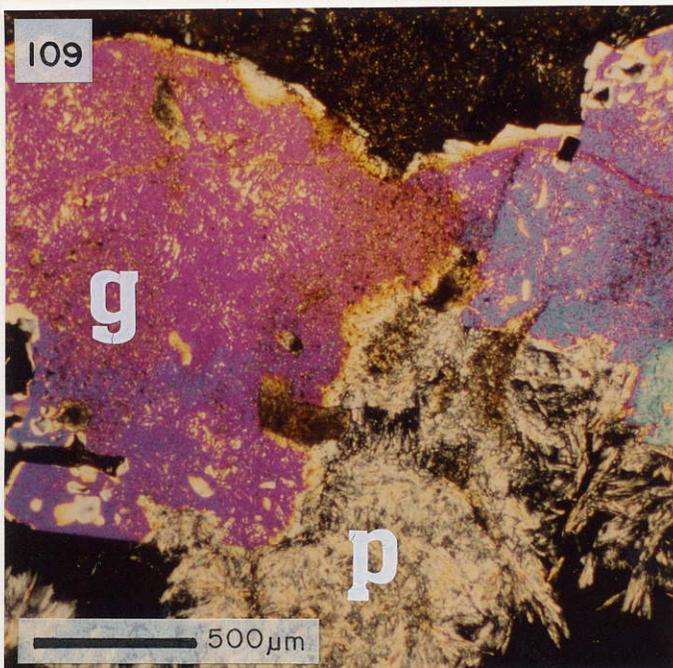
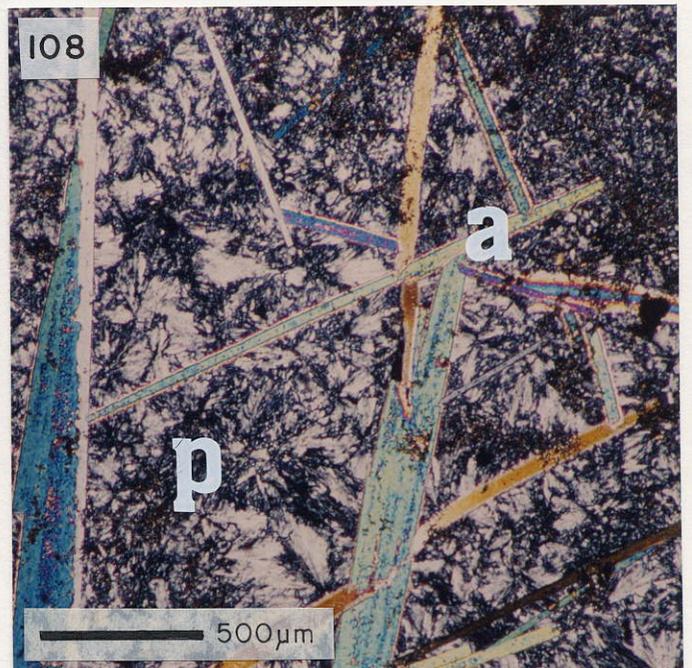
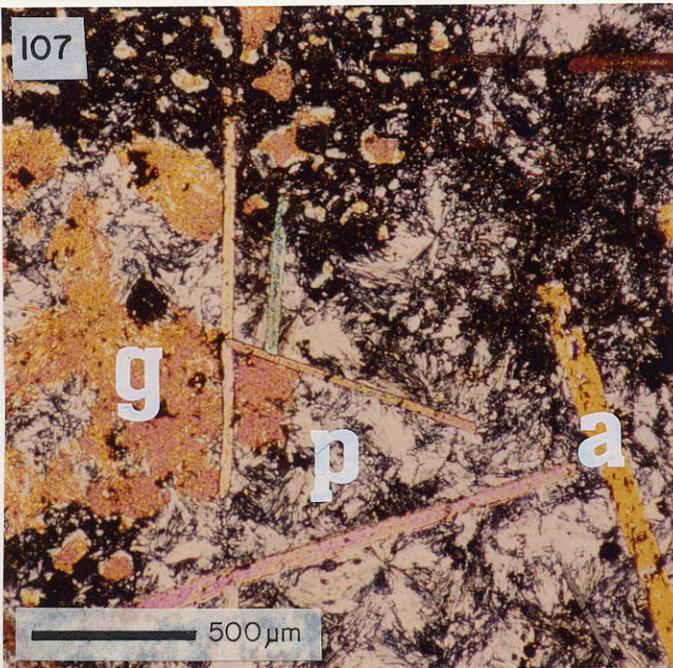
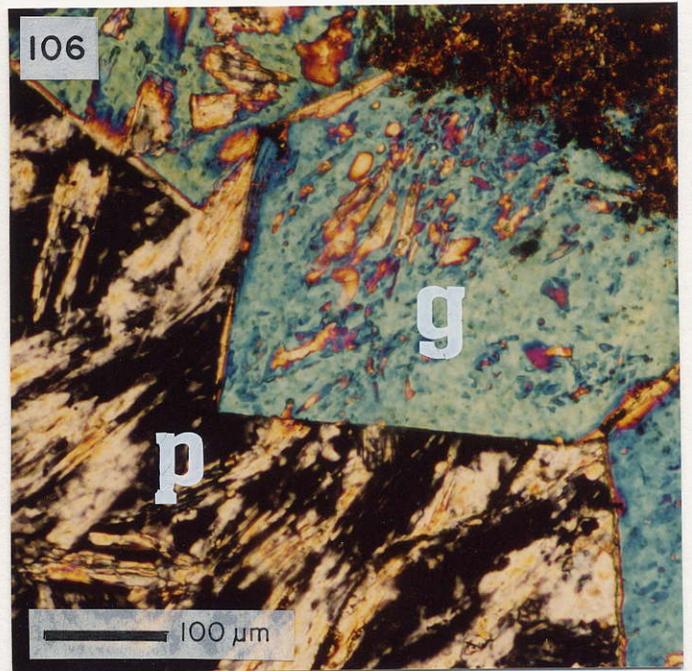
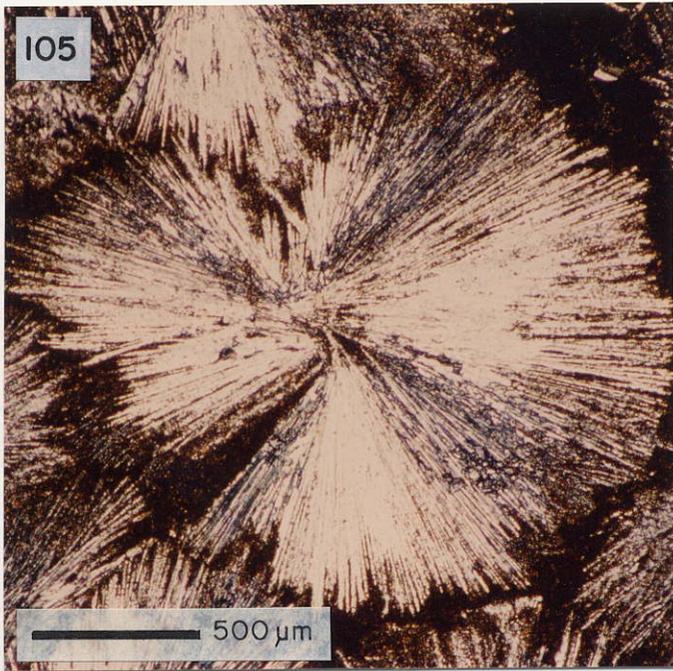
Foto 106.- Cristales poiquilíticos de glauberita (g) (idiomórficos) reemplazando a la polihalita (p). Se observa cómo algunos relictos de polihalita quedan atrapados como inclusiones en la glauberita (microfotografía de la muestra S1-90.4).

Foto 107.- Cristales tabulares de anhidrita (a) y poiquilíticos de glauberita (g) reemplazando a la polihalita (p) (microfotografía de la muestra S1-84.8).

Foto 108.- Cristales tabulares de anhidrita (a) reemplazando a la polihalita (p) (microfotografía de la muestra S1-80.4).

Foto 109.- Glauberita poiquilítica anhedral (g) reemplazando a la polihalita (p). La parte inferior de la fotografía está ocupada por halita (h) (microfotografía de la muestra S1-90.4).

Foto 110.- Glauberita poiquilítica en la que se observa una microestructura pseudomórfica de polihalita y también pseudomorfos de glauberita primaria. Estos pseudomorfos indican que la glauberita se ha formado al menos después de dos generaciones de minerales anteriores a la misma: una primera de glauberita primaria y una intermedia de polihalita (microfotografía de la muestra S1-67.6).



L A M I N A 24.

Foto 111.- Aspecto de la matriz carbonatada (magnesita) intercrystalina (en oscuro) en una glauberita primaria subidiomórfica (microfotografía de la muestra S2-57.2).

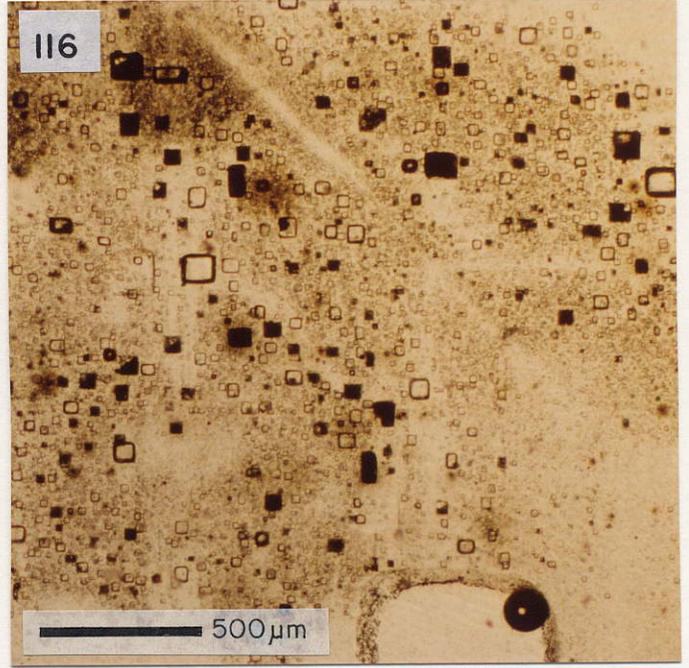
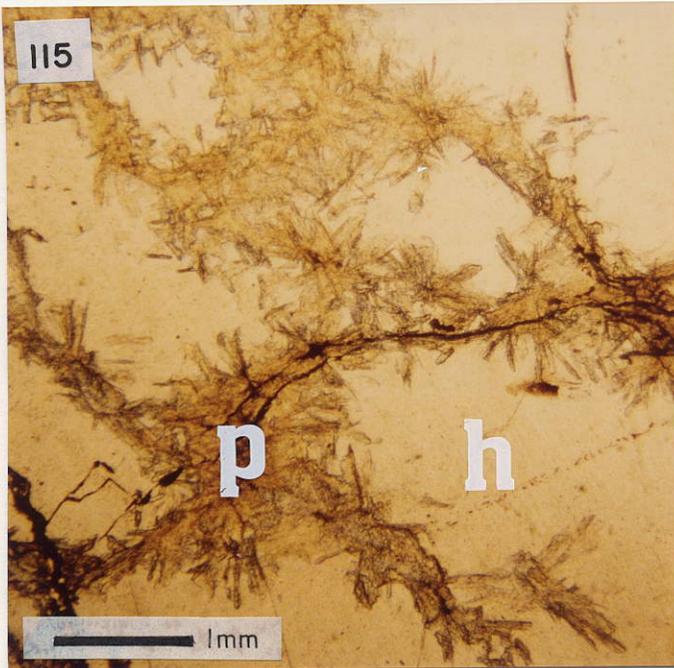
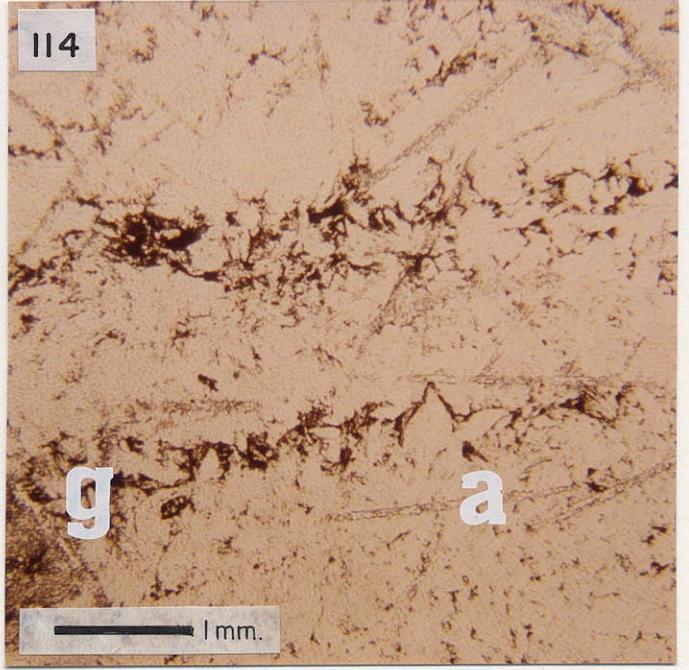
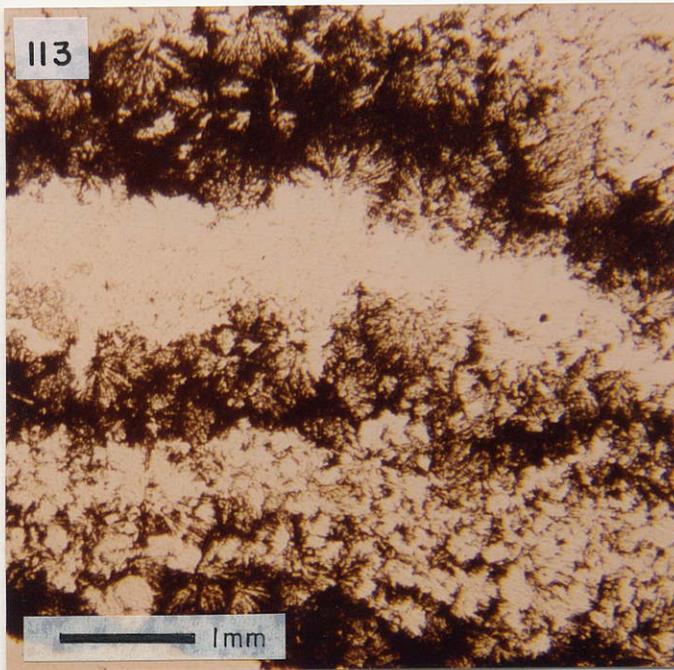
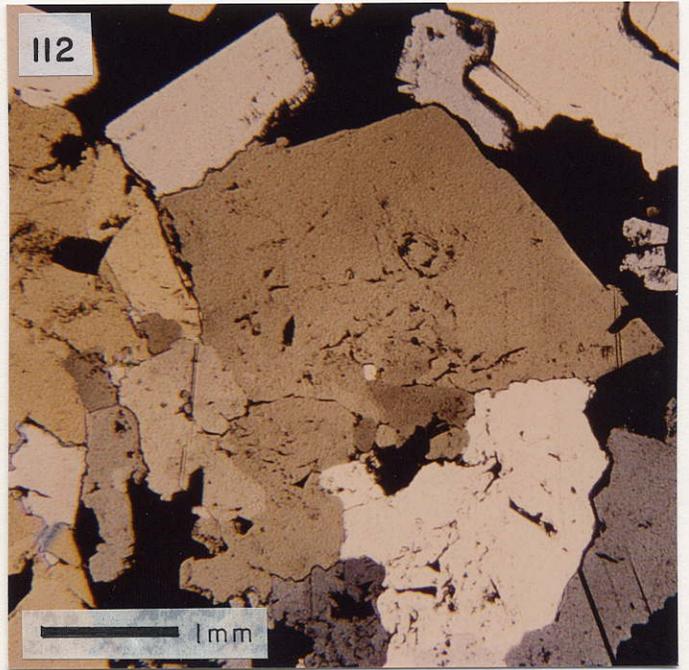
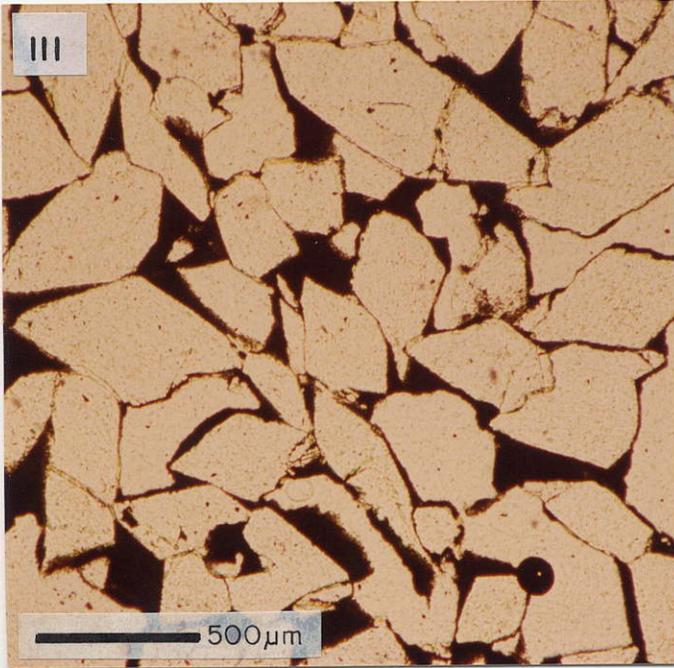
Foto 112.- Pseudomorfo en yeso secundario, de un cristal romboédrico de glauberita (microfotografía de la muestra S1-25.3).

Foto 113.- Aspecto, en luz paralela, de la polihalita (en blanco) alternando con carbonato en una muestra de litofacies laminada (microfotografía de la muestra EA-12a).

Foto 114.- Muestra, en luz paralela, de polihalita laminada en la que se observan pseudomorfos de glauberita (g) y cristales tabulares de anhidrita (a) (microfotografía de la muestra EA-12a).

Foto 115.- Cristales de halita (h) con sobrecrecimientos de polihalita (p) en las juntas intercrystalinas (microfotografía de la muestra S1-73.5).

Foto 116.- Inclusiones fluidas en un cristal de halita (microfotografía de la muestra S2-57.2).



L A M I N A 25.

fotos 117 y 119.- Micronódulos de anhidrita entre arcillas y limolitas en un testigo del sondeo de Marcilla, correspondientes a niveles de la formación detrítica basal oligocena.

Foto 118.- Aspecto general de los testigos del sondeo de Marcilla en el almacén de la empresa REPSOL-exploración, en Daganzo (Madrid).

Foto 120.- Anhidrita nodular entre arcillas y margas en un testigo del sondeo de Marcilla, correspondiente a niveles de los Yesos de Falces.



L A M I N A 26.

Foto 121.- Aspecto de los niveles de glauberita nodular entre yesos laminados correspondientes al yacimiento de San Adrián (Fm. lerín).

Foto 122.- Torrente salino entre las arcillas y yesos de la Unidad Mendavia (Fm. Lerín), en el núcleo del anticlinal de Alcanadre.

Foto 123.- Pseudomorfos en glauberita poiquilítica, de yeso primario microlenticular (microfotografía de la muestra MA-T3-s/n, Yesos de Falces).

Fotos 124 y 125.- Porfiroblastos de anhidrita (a) creciendo sobre glauberita (g) (microfotografía de la muestra MA-T3-2b, Yesos de Falces).

Foto 126.- Porfiroblastos de glauberita (G) creciendo sobre anhidrita (A) granular de tamaño fino (microfotografía de la muestra MA-T3-1, yesos de Falces).

