

CARACTERIZACION GEOQUIMICA DE LA RUPTURA SEDIMENTARIA ENTRE LOS YESOS DE LA UNIDAD SALINA E INTERMEDIA DE LA CUENCA DE MADRID

S. Ordóñez*, R. Fort** y M. Bustillo*

RESUMEN

En el Terciario de la Cuenca de Madrid existen dos unidades sedimentarias de carácter yesífero. Ambas unidades están constituidas por yesos con diferentes características, aunque su separación es difícil en diversos afloramientos debido a intensos procesos de yesificación que transforman las texturas primarias en una textura común secundaria formada por un mosaico macrocristalino de yeso. El objetivo de este trabajo se centra en la aplicación de la geoquímica de elementos traza en la discriminación de las dos unidades. En este sentido, el Sr, Mg, y Fe pueden ser unos elementos muy útiles para separar ambas unidades.

También se llevó a cabo un análisis factorial con los resultados geoquímicos. Los valores de los factores obtenidos permiten situar la posición de la ruptura sedimentaria entre ambas unidades. Esta ruptura queda claramente diferenciada por un cambio simultáneo en ambos factores, de valores negativos a positivos.

Los resultados obtenidos indican que los yesos detríticos de la Unidad Superior se han formado por el desmantelamiento de anhidritas de la Unidad Inferior. Estas anhidritas, previamente han sido yesificadas en un ambiente de alta concentración de iones.

Palabras clave: *Evaporitas, elementos traza, rupturas sedimentarias, Cuenca de Madrid.*

ABSTRACT

Two sedimentary Unities of gypsum deposits are defined in the Tertiary of the Madrid Basin, Spain. Both Unities are formed by gypsum materials with different features although the separation between the lower and the upper Unities can be very difficult in some outcrops. It is due to strong processes of gypsification which transform the primary textures in a secondary texture formed by macrocrystalline mosaics of gypsum. The objective of this work is related to the application of trace element geochemistry to discriminate between lower and upper Unities. So, Sr, Mg, and Fe can be a useful elements to separate lower Unity from Upper one.

A factor analysis was also carried out with the geochemical results. The values of the factors obtained let us to define the position of the sedimentary rupture between the two Unities. This position is clearly differentiated by a simultaneous change in both factors from negative to positive values.

The results obtained show that terrigenous gypsum (Upper Unity) are formed by erosion of anhydrites from Lower Unity. These anhydrites, previously, have been transformed to gypsum in a environment of high salinity.

Key words: *Evaporites, trace elements, sedimentary ruptures, Madrid Basin.*

Introducción

Uno de los problemas más importantes que existen a la hora de estudiar las series yesíferas desde un punto de vista geoquímico, es la separación de las distintas fases que existen en ellas, para proceder a analizar los

contenidos geoquímicos específicos de cada una de dichas fases. Los estudios geoquímicos comúnmente se han realizado sobre la muestra total utilizando la técnica de fluorescencia de rayos X, con problemas analíticos derivados de la no existencia de patrones con matriz yesífera y siendo únicamente válido como

* Departamento de Petrología y Geoquímica. Fac. de Geología. Univ. Complutense. 28040 Madrid.

** Instituto de Geología Económica. C.S.I.C. 28040 Madrid.

datos relativos para el análisis de una sección evaporítica. Otras veces se hacen ataques convencionales que solubilizan tanto la fase sulfatada y carbonatada, como la silicatada, que pueden ser muy abundantes en los depósitos evaporíticos. Desde un punto de vista petrológico y sedimentológico es importante analizar exclusivamente la fase yesífera, puesto que nos permitirá tener un conocimiento más preciso de medio sedimentario y de los procesos diagenéticos que han sufrido los depósitos evaporíticos existentes en las cuencas de sedimentación (Butler, 1969 y Dean, 1978).

En este trabajo se plantea como objetivo desarrollar una metodología analítica que nos permita caracterizar geoquímicamente la fase yesífera de los materiales evaporíticos, evitando la contaminación de elementos traza de otras fases (carbonatada y silicatada). Esta metodología permitirá obtener unos resultados más sencillos de interpretar, al no sobreimponerse en los datos analíticos los elementos traza de las fases carbonatadas, o incluso terrígenas heredadas.

La metodología desarrollada es aplicada a la serie yesífera existente en la cuenca de Madrid, encaminada a determinar las características geoquímicas de los yesos de la Unidad Salina y de la Unidad Intermedia aflorante en el sector central-meridional de la cuenca. El contenido en elementos trazas en ambas unidades puede ser utilizado como herramienta para definir la ruptura sedimentaria que existe entre ambas series evaporíticas, cuando criterios petrológicos, sedimentológicos y mineralógicos no son válidos. La zona donde se desarrolló la investigación está situada en las proximidades de Chinchón (Madrid).

Otro objetivo de este trabajo es determinar el área de procedencia de los yesos detríticos existentes en la denominada Unidad Detrítico-Yesífero perteneciente a la Unidad Intermedia, basándonos para ello en el contenido en elementos traza existente en la fase yesífera de estos depósitos alóctonos.

Las unidades evaporíticas del sector central de la Cuenca de Madrid

Desde hace muchos años, casi desde principio del siglo pasado, se conoce en la Cuenca de Madrid la existencia de sales sódicas y calcosódicas, thenardita, halita y glauberita, en el seno de una serie de yesos, también conocidos desde antiguo, en parte debido al uso que de ellos se hacía como material de construcción. En trabajos antiguos sobre la Cuenca de Madrid, que aparecen citados en una revisión realizada por Ordóñez (1986), se distingue perfectamente entre unos «yesos carbonatados crema» de Colmenar de Oreja y Chinchón, y los «yesos espejuelos», con nombres locales diversos que se explotaban en Vallecas (Madrid) y en la zona de Seseña (Toledo). En

diferentes trabajos realizados sobre la Cuenca de Madrid, que aparecen revisados por Megías *et al.* (1983), se diferencia con claridad una serie evaporítica inferior denominada Unidad Salina y una unidad de características petrológicas y sedimentológicas complejas denominada Unidad Intermedia. La unidad salina está formada por bancos de Anhidrita-Magnesita, que alternan con otros de espesor semejante de Glauberita-Magnesita, así como niveles decimétricos de Halita y Polihalita. La fracción terrígena es de naturaleza lílítica, con cantidades menores de cuarzo y feldespato. Hacia la parte superior de esta unidad salina, el carácter terrígeno (zona Nobleja-Villarrubia de Santiago) se acentúa, y aparecen facies detríticas masivas de color rojizo, que intercalan niveles de Halita. A techo de estos materiales suele aparecer una o varias capas de Thenardita y Glauberita, que localmente pueden alcanzar varios metros. En los trabajos de García del Cura *et al.* (1979) y Orti *et al.* (1979) se establece con claridad la intensidad de los procesos de alteración de la unidad salina que han sido formulados físico-químicamente por Ordóñez *et al.* (1981). Estos procesos de alteración, posiblemente poligénicos, cuyas edades son difíciles de situar pero que en algunos casos son paractuales, e incluso activos, conllevan la disolución de las fases sódicas (halita y thenardita), la disolución incongruente de la glauberita con la génesis de yeso, comúnmente pseudomórfico de glauberita, y la hidratación de la anhidrita, con la génesis de una gran variedad de yesos selenita secundarios, desarrollándose también procesos de carbonatación con la génesis de calcita cementante. Todo ello, y en función del material preexistente determina la aparición de unas facies superficiales en la Unidad Salina, que englobadas bajo el nombre de yesos, no reflejan en absoluto la naturaleza de los materiales geológicos no aflorantes. Esta unidad salina aflora a lo largo de los valles del río Tajuña, río Jarama y río Tajo, hacia la sierra de Altamira, hacia el NE de la cuenca, y hacia el oeste de la cuenca, respectivamente, tal y como han señalado Megías *et al.* (1980). Esta unidad aparece en facies muy terrígenas de tonos rojizos, progresivamente empobrecida en sales solubles.

Sobre la unidad salina y en una ruptura sedimentaria detectable por aspectos sedimentológicos y petrográficos aparece la unidad intermedia. Esta unidad presenta, en el área central de la cuenca, una subunidad inferior yesífera, en la que unos yesos detríticos en bancos métricos alternan comúnmente con bancos de yesos crema, con rasgos texturales que reflejan su carácter de sedimentos primarios. Hacia la parte superior de esta unidad y con un marcado carácter extensivo se desarrolla un conjunto de materiales carbonatados, no litificados y de naturaleza dolomítica, sobre los que se desarrollan importantes procesos de karstificación que materializan un importante cambio paleogeográfico a nivel cuencal. La unidad intermedia

presenta una extensión extraordinaria en sus afloramientos, siendo con mucho la unidad mejor representada del actual nivel de erosión de la cuenca. Los yesos detríticos de la unidad intermedia han sido considerados por alguno de nosotros en base a datos cuencales y a estudios isotópicos, como procedentes de la erosión de la unidad intermedia, con lo que ciertamente le unen no pocas características geoquímicas isotópicas (Ordóñez *et al.*, 1981 b). En el mismo sentido se puede señalar que la unidad salina, y en base a consideraciones isotópicas y de análisis de cuencas, podría proceder del desmantelamiento de las evaporitas del Cretácico superior-Terciario de la sierra de Altomira (Ordóñez *et al.*, 1987). De este modo, un intento de caracterización geoquímica de los yesos secundarios de la unidad salina, frente a los yesos detríticos y los yesos primarios de la unidad intermedia, resulta desde un punto de vista científico un importante reto para establecer la capacidad de este mineral para grabar su historia petrológica-geoquímica (Fort *et al.*, 1982) y a la vez desarrollar un buen método de discriminación entre unidades sedimentarias, extrapolables a otras zonas donde las características texturales o mineralógicas de las series evaporíticas no permitan una separación tan nítida entre unidades.

Metodología

Para llevar a cabo los objetivos propuestos era necesario, tal y como se ha señalado anteriormente, diseñar una metodología que nos permitiera analizar exclusivamente la fase yesífera, teniendo que descartar el ataque convencional de la muestra por medio de ácidos (ClH, NO₃H, CH₃COOH, etc.) que también solubilizan la fase carbonatada e incluso los minerales de la arcilla, según su concentración, temperatura y tiempo de ataque, lo que dificulta la interpretación de los datos geoquímicos (Ostrom, 1961; Pomerol, 1977; Robinsón, 1980).

Otra posibilidad de digestión selectiva de las muestras yesíferas es la utilización del ácido etilendiaminotetracético (EDTA) en concentraciones de 0.1 M (Glover, 1961 y Bodine y Fernald, 1973). Este método tiene el grave inconveniente de imposibilitar la valoración correcta del sodio en la fase mineral, así como el ataque parcial de la fase carbonatada. Ambos aspectos resultan negativos para los propósitos de nuestro trabajo, ya que el sodio, como elemento traza en yesos, puede ser de gran interés geoquímico, y la disolución de los carbonatos plantea los problemas antes reseñados en la interpretación geoquímica del yeso. Para paliar estos inconvenientes analíticos, en nuestro estudio se procedió a solubilizar la muestra por medio de agua bidestilada. Teniendo en cuenta la variación de la constante de equilibrio del yeso con la temperatura y la actividad del H₂O de la solución, se puede estimar que la máxima solubilidad del yeso se sitúa a una temperatura de 42°C, alcanzándose valores de 0,14 gr/100 cc, tal y como aparece reflejado por distintos autores, Ponsjack (1940); Hardie (1967); Cruft y Chao (1970). Estas condiciones teóricas de saturación en yesos fueron comprobadas también experimentalmente, controlando la concentración, la temperatura y el tiempo de disolución. Se realizó el experimento a presión ambiental, ya que no se ha establecido una influencia sobre la solubilidad de este parámetro (Zen, 1965). La máxima disolución del yeso fue de 0,14 gr/100 cc, que se alcanzó a la temperatura de 40°C, coincidiendo, por tanto, con los cálculos fisicoquímicos indicados anteriormente. El tiempo para alcanzar la saturación fue de 2 horas.

De esta forma, cada muestra seleccionada en la serie tipo, con un peso unitario de 1,5-2 kg, fue triturada a 5 mm, cuarteada hasta un volumen final de 100 gr, molida y finalmente tamizada por una malla de 0,063 mm. Una vez preparada la muestra se determinó la mineralogía existente por difracción de Rx. La disolución de la fase yesífera se llevó a cabo por sobresaturación de 1 gr de muestra en 100 cc de agua bidestilada, en baño maría y a las condiciones definidas experimentalmente de 40°C durante 2 horas. El filtrado de esta disolución nos permitió separar la fracción insoluble (calcita, dolomita, arcilla, exceso de yeso, etc.) de la fracción soluble en la que existía 0,14 gr de sulfato cálcico. Esta solución se puso en medio ácido agregando unas gotas de ClH al 1% para evitar la precipitación del SO₄Ca cuando se produce el enfriamiento de la disolución. Esta solución final fue analizada por fotometría de llama para determinar la concentración de Li, Na y K y por absorción atómica el Mg, Fe, y Sr.

Esta metodología presenta una serie de limitaciones producidas por la baja concentración de la disolución y porque algunos elementos de interés geoquímico en series evaporíticas como el Ba tiene unos límites de detección muy altos, lo que imposibilita el análisis de éstos al encontrarse en concentraciones por debajo de la sensibilidad del aparato.

Resultados obtenidos

Mineralogía

El análisis mineralógico de la muestra total por difracción de rayos x, realizado en la totalidad de las muestras de la serie tipo de Chinchón, nos muestra que la fase sulfatada predominante en ambas unidades evaporíticas es el yeso, aunque se pueden observar pequeñas variaciones en su contenido según la textura de la muestra analizada y su posición en la serie. Los yesos secundarios de la unidad salina se pueden considerar como puros presentando una pequeña proporción de calcita inferior al 5%, y para aquella textura de tamaño de cristal grande (>5 µm) presentan indicios de filosilicatos situados en el límite de los cristales. Los materiales de la unidad detrítico-yesífera presentan una pureza menor (entre 70 y 95% de yeso), con un mayor contenido en filosilicatos (5-20%). Los yesos lenticulares de esta unidad presentan, junto con calcita, un porcentaje pequeño de dolomita (<10%).

Se han detectado pequeños indicios de celestina (SO₄Sr) en los yesos lenticulares primarios de la unidad intermedia, así como en los carbonatos yesíferos con formas pseudoestromatolíticas y principalmente en el nivel que define la ruptura sedimentaria entre las dos unidades yesíferas definidas (fig. 1). En la tabla I se sintetizan los resultados medios de la mineralogía, obtenidos en función de la textura yesífera.

Geoquímica

Los resultados obtenidos muestran claras diferencias en el contenido de elementos traza en la fase yesífera de la unidad salina y la unidad detrítico-yesífera (figura 2). De todos los elementos analizados los que

mejor diferencian a estas dos unidades son el Sr, el Mg y, en menor grado, el Fe.

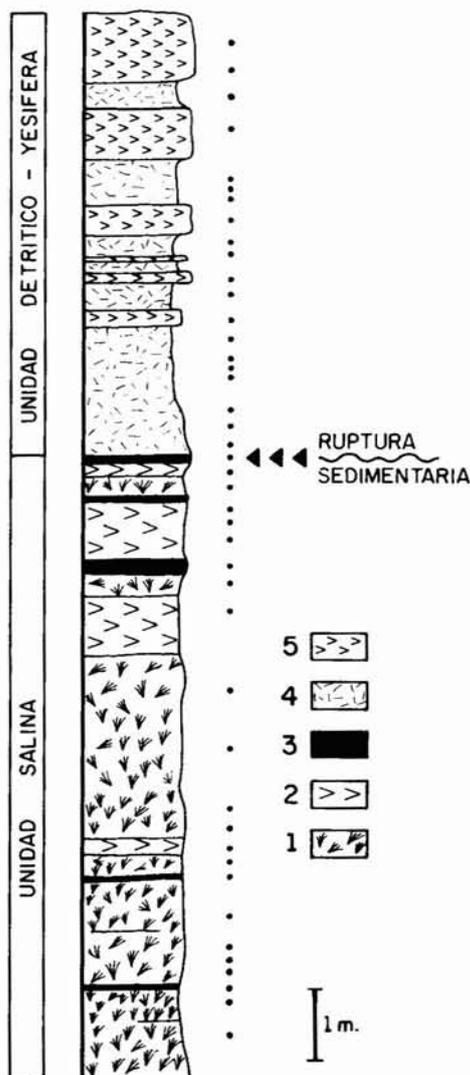


Fig. 1.—Serie de Chinchón: 1-Yesos espejuelos; 2-Yesos macrocristalinos de alabastro; 3-Carbonatos yesíferos con morfologías pseudoestromatolíticas; 4-Yesos detritivos; 5-Yesos lenticulares cremas. Puntos negros=situación del muestreo. (3° 26' 45'' - 40° 9' 30'').

La importancia del Sr en la geoquímica de series evaporíticas, ha sido puesta de manifiesto por distintos autores por su carácter de indicador paleoambiental (Dean, 1978; Ingles *et al.*, 1986), e indicador de la historia diagenética de los materiales yesíferos (Fort y Bustillo, 1986). El valor medio de Sr en los yesos de origen secundario de la unidad salina es de 1097 ppm, mientras que los existentes en la unidad detrítico-yesífera es de 3206 ppm. Queda patente la diferencia geoquímica en Sr para ambas unidades, que fue indicada por Fort *et al.* (1982), al presentar en la unidad inferior de la cuenca de Madrid contenidos inferiores a 1200 ppm de Sr, mientras que las unidades yesíferas suprayacentes superaban estos valores.

Los contenidos de Sr en la fracción yesífera de la unidad salina se encuentran incluidos en los rangos de variación para los yesos, que no suelen sobrepasar las 2500 ppm (Butler, 1973; Dean, 1978; Stewart, 1963...). Por el contrario, el contenido existente en los

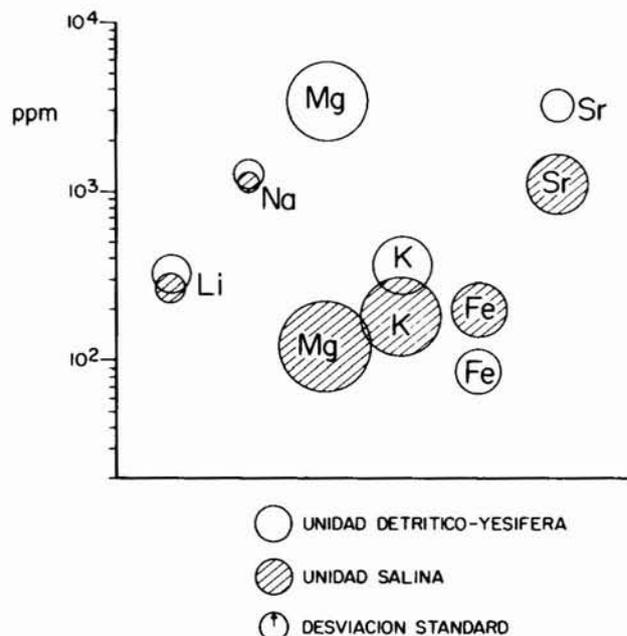


Fig. 2.—Contenidos geoquímicos de la unidad salina y la unidad detrítico-yesífera.

Tabla 1.—Mineralogía de los diferentes tipos de yesos

	Yeso	Calcita	Dolomita	Filosilicato	Celestina	Cuarzo
Espejuelo <5 cm	95	5	—	—	—	—
Espejuelo >5 cm	100	Ind	—	Ind	—	—
Alabastrino	95	5	—	—	—	—
Macrocristalino	100	Ind	—	Ind	—	—
Pseudoestromatolito	15	75	Ind	10	Ind	Ind
Detritivos	85	5	—	10	—	—
Lenticulares	85	10	5	—	Ind	—

Valores en %

Ind = Indicios

yesos de precipitación directa presenta valores muy por encima de los considerados como normales para estos materiales. La explicación de este hecho puede venir dada por la existencia de pequeñas cantidades de celestina, detectada por difracción de rayos X que, a pesar de ser poco soluble atendiendo a su constante de equilibrio, puede liberar algo de Sr al sistema.

El Mg es otro elemento traza que diferencia claramente las dos unidades evaporíticas, al presentar un alto contenido en la unidad detrítico-yesífera, con un valor medio de 3490 ppm, que contrasta con las 117 ppm de la unidad salina. Estos contenidos bajos de Mg en la unidad inferior son debidos a que los yesos en ellos existentes son producto de una transformación de anhidrita-yeso, estando, por lo tanto, empobrecidos en este elemento. Los contenidos en Mg de estos yesos pueden considerarse como normales (Dean, 1978). Los altos valores encontrados para los yesos de la unidad intermedia, que no se ajustan con el rango de variación de los yesos de precipitación directa, son debidos probablemente a la existencia en estos materiales evaporíticos de pequeños contenidos (<1% no detectable por difracción de rayos x) de sales solubles de procedencia secundaria como pueden ser la epsomita y la bloedita.

El Fe, al contrario que ocurre con el Sr y el Mg presenta contenidos ligeramente superiores en la unidad salina. De esta forma, en la fracción yesífera de la unidad salina el contenido medio de Fe es de 193 ppm, mientras que en la unidad yesífero-detrítica es de 84 ppm. Ambos valores se encuentran dentro del rango de variación de este elemento en yesos (Stewart, 1963 y Dean, 1978). El resto de elementos trazas analizados (Li, Na, K) se encuentran también dentro de estos rangos de variación, pero con unos

valores que no permiten diferenciar de una forma clara las dos unidades yesíferas. El Li tiene un valor medio de 271 ppm en la unidad salina, que es ligeramente inferior al existente en la unidad intermedia, caracterizado por 317 ppm. También el contenido medio de Na y K en la unidad salina es ligeramente inferior al existente en la unidad intermedia, con unos valores para la unidad inferior de 1142 ppm de Na y 176 ppm de K y de 1266 ppm y 365 ppm de Na y K, respectivamente, para la unidad intermedia.

Tal como podemos apreciar, la unidad salina está caracterizada por un empobrecimiento generalizado en elementos traza, a excepción del Fe que presenta valores ligeramente superiores a los existentes en la unidad suprayacente (fig. 2). Este empobrecimiento pone de manifiesto la existencia de procesos de fraccionamiento durante la evolución diagenética de estos yesos. Los yesos de la unidad salina presentan texturas que denotan su origen secundario como son: yesos alabastrinos, nódulos de alabastro, selenitas de tipo «espejuelo», etc., y que pertenecen a la cobertera hipergénica de esta unidad inferior, habiendo sufrido procesos de lixiviado. Por lo tanto, el contenido en elementos traza de las rocas evaporíticas no viene determinado únicamente por el ambiente de precipitación, sino que está afectado muy directamente por los procesos diagenéticos que han sufrido. En este mismo sentido se han manifestado Fort y Bustillo (1986), al establecer la relación existente entre las texturas yesíferas producto de procesos diagenéticos y/o singenéticos con el contenido en elementos traza. Los resultados obtenidos en nuestro trabajo (tabla 2) coinciden con los de éstos al presentar el Sr y el Mg coeficientes de distribución inferiores a 1. Se puede apreciar cómo las texturas secundarias presentan unos

Tabla 2.—Resultados geoquímicos de los diferentes tipos de yesos

		Li	Na	K	Mg	Fe	Sr
Espejuelo <5 cm	X	313	1.218	325	185	215	1.890
	δ	26	114	52	55	83	256
Espejuelo >5 cm	X	220	1.107	72	58	186	576
	δ	27	116	25	20	77	442
Alabastrino	X	261	1.290	176	86	208	1.080
	δ	17	66	108	43	47	358
Macrocrystalino	X	268	1.103	137	68	151	1.400
	δ	21	63	96	14	81	438
Pseudoestromatolítico	X	367	1.107	271	271	173	3.744
	δ	45	250	120	223	77	1.618
Detríticos	X	325	1.198	406	3.290	85	3.100
	δ	47	198	198	2.158	40	647
Lenticulares	X	341	1.422	290	2.437	81	3.449
	δ	45	297	15	658	21	916

Valores expresados en p.p.m.

contenidos menores en estos elementos, principalmente, y en menor medida en Li y K. También hay que destacar que las formas cristalinas influyen en este contenido geoquímico, puesto que las selenitas secundarias tipo espejuelo de cristales menores de 5 cm tienen un contenido en los elementos traza estudiados superior a los de un tamaño mayor, lo que en cierta manera confirma que los mayores tamaños de los cristales están relacionados con las etapas más tardías de la yesificación, e incluso con procesos de disolución-precipitación subcrecientes.

Los yesos detríticos tienen un alto contenido en elementos traza, por lo que en un principio se podrían asimilar con los yesos lenticulares primarios. Sin embargo, los datos paleogeográficos, estratigráficos e isotópicos, permiten asegurar que proceden de la destrucción rápida de la unidad salina, e incluso existen datos petrográficos que muestran la existencia de texturas de yesificación e incluso núcleos anhidríticos, lo cual permite plantear una relación con una unidad salina que se erosionaba muy rápidamente, e inmediatamente sus detritos se incorporaban mediante un mecanismo de sedimentación turbidítica a los depósitos tipo «fan delta» dentro de un lago moderadamente salino, y que alcanzaba la saturación en yeso y carbonatos estacionalmente y a lo largo de amplios períodos. Puede así, y con una visión regional del problema, unirse una sedimentación detrítica de anhidrita-yeso en un medio lacustre, con la génesis de yesos primarios. En este sentido, el contenido en elementos traza de los yesos detríticos no sería el resultado de un fraccionamiento en un ambiente de aguas meteóricas, como en el caso de la unidad salina, sino por el contrario el resultado de una transformación anhidrita-yeso en el seno de unas aguas moderadamente salinas y conteniendo los elementos traza liberados de la rápida erosión de la unidad salina. El enriquecimiento en Fe puede ser debida a la oxidación de fases reducidas de este metal (sulfuros), asociados con la materia orgánica, bastante abundantes en la unidad salina. Por último indicar cómo los yesos existentes en el nivel de ruptura sedimentaria definido por texturas de tipo pseudoestromatolítico carbonatado presentan un enriquecimiento notable en Sr y Li.

Análisis factorial y discusión de los resultados

Las diferencias geoquímicas que existen entre ambas unidades evaporíticas de la Cuenca de Madrid quedan patentes al realizar el análisis factorial sobre los resultados geoquímicos obtenidos para cada elemento traza analizado. Este análisis se ha realizado sobre los componentes principales con rotación Varimax, definiendo la existencia de 6 factores (tabla 3). Los dos primeros factores explican el 74,31% de la varianza. En la tabla 4 se muestra el peso de las

Tabla 3.—Análisis factorial

Factor	Varianza	
	Valor propio	%
I	2,7470	45,78
II	1,7117	28,53
III	0,7888	13,15
IV	0,4977	8,29
V	0,2219	3,70
VI	0,0330	0,55

Tabla 4.—Matriz factorial rotada

	Factor I	Factor II
Li	0.925	0.000
Na	-0.545	0.505
K	0.782	0.423
Mg	0.000	0.890
Fe	0.000	-0.698
Sr	0.968	0.000

variables en cada uno de estos factores, habiéndose hecho cero aquellas variables que presentaban un valor de la varianza menor de 0,25. El factor I está representado por Sr, Li, y K, así como por el Na de forma negativa. El factor II viene explicado por el Mg principalmente y en menor grado por el Na y K y de forma negativa por el Fe. Estos dos factores reflejan el grado de lixiviado de los materiales al ser el Mg, Na y K elementos móviles durante estos procesos.

La evolución del valor de estos dos factores en la sección tipo estudiada nos permite definir la posición de la ruptura sedimentaria existente entre ambas unidades yesíferas, que viene caracterizada por una variación muy fuerte y simultánea de ambos factores al pasar éstos de valores negativos en la unidad inferior a valores positivos en la intermedia, que suelen ser superiores a +1 para el factor II (fig. 3). En la posición de la ruptura sedimentaria, los valores absolutos de los dos factores son superiores a 1, siendo positivo para el factor I y negativo para el factor II.

El carácter discriminante de estos dos factores permite deducir una conexión genética entre la unidad salina y los yesos detríticos de la unidad intermedia (fig. 4). Así los yesos de la unidad salina presentan, como hemos indicado, valores negativos para ambos factores, que es interpretado por la acción de lixiviado de los elementos traza en aguas meteóricas y, por lo tanto, diluidos durante el proceso de yesificación. Por el contrario, los yesos cremas están enriquecidos en estos elementos, y vienen caracterizados por tener un valor positivo de los factores, lo que nos indican el carácter primario de los mismos y el fraccionamiento de los elementos traza en el seno de unas aguas

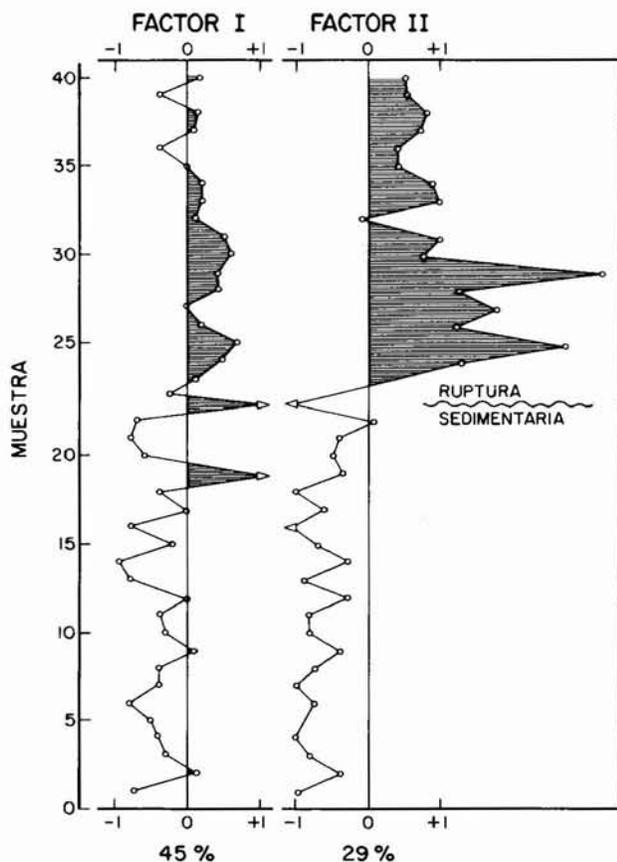


Fig. 3.—Variación vertical del Factor I y del Factor II en la serie de Chinchón.

moderadamente saladas. Por último, los yesos detríticos existentes en la unidad intermedia presentan un valor de sus factores próximos a cero, encontrándose entre la posición de los yesos primarios y los yesos de la unidad salina. Estos valores intermedios pueden corroborar que estos yesos detríticos proceden de la yesificación de la anhidrita detrítica de la unidad salina, siendo transportados a zonas interiores de subcuencas de tipo lacustre con concentraciones altas de iones, todo ello realizado con una velocidad de denudación y sedimentación rápida para evitar la hidratación de estos materiales fuera del medio de sedimentación. Los resultados isotópicos de estas facies yesíferas aportados por Ordóñez *et al.* (1987) concuerdan con esta hipótesis. Igualmente concuerdan con lo indicado por Megías *et al.* (1983) quienes sugieren, en base a datos paleogeográficos de la cuenca, que los yesos detríticos existentes en la parte central y SE de la Cuenca de Madrid proceden del aporte de depósitos evaporíticos existentes en zonas más septentrionales y pertenecientes a la unidad inferior.

Conclusiones

Se ha puesto de manifiesto en este trabajo la validez de la metodología llevada a cabo para el análisis de facies yesíferas basándose en la solubilidad de estos materiales en agua bidestilada a 40°C y durante 2 horas. Se remarca el interés analítico de esta metodología al analizar exclusivamente el contenido geoquí-

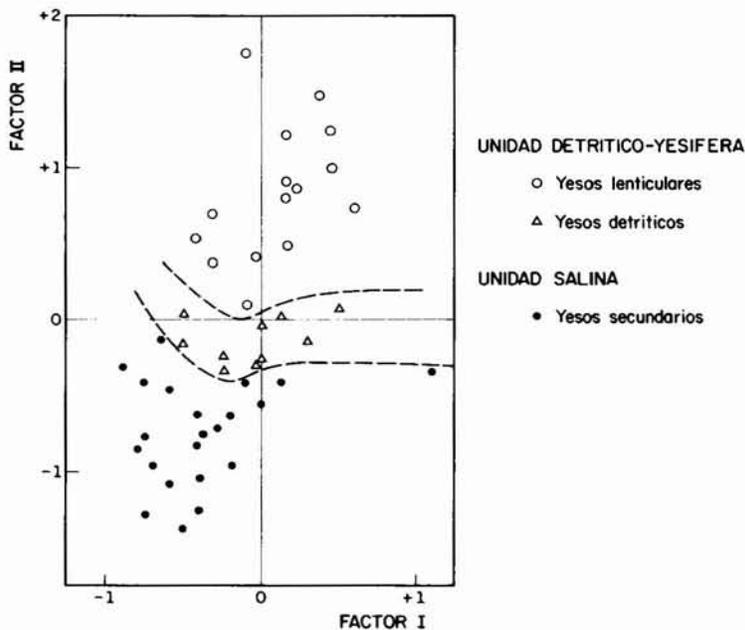


Fig. 4.—Representación de clases en función de los ejes factoriales I y II. Unidad salina: Puntos negros=Yesos secundarios. Unidad detrítico-yesífera: círculos blancos=Yesos lenticulares; Triángulo=Yesos detríticos.

mico de los yesos, y desaconseja el análisis convencional por medio de ataque con ácidos más o menos fuertes que incorporan al medio elementos traza de otras fases, principalmente carbonatadas y de los minerales de la arcilla. Ello conlleva errores que desvirtúan la realidad geoquímica de estos materiales yesíferos y, con ello, dificultan el llegar a una interpretación sobre el medio de precipitación e incluso de la historia diagenética que han sufrido estos materiales.

Los resultados analíticos obtenidos permiten diferenciar dos unidades con facies yesíferas existentes en la Cuenca de Madrid (sector central-meridional): la unidad salina y la unidad detrítico-yesífera, siendo esto posible en base al contenido en elementos traza. Los yesos de la cobertera de la unidad salina se encuentran empobrecidos en elementos traza, principalmente Sr y Mg, y, en menor grado, en K, Li, y Na, en comparación con los existentes en la unidad detrítico-yesífera. El Fe es el único elemento analizado que presenta un mayor enriquecimiento en la unidad salina que en la unidad intermedia, denotando el ambiente oxidante en el que se ha producido la yesificación y lixiviado de la unidad salina.

La ruptura sedimentaria existente entre ambas unidades yesíferas, que está representada en la serie tipo de Chinchón por un nivel de carbonatos yesíferos con estructura pseudoestromatolítica, presenta una anomalía importante en el contenido en elementos traza y, principalmente, para el Sr. Esta ruptura sedimentaria queda perfectamente situada por medio del análisis factorial realizado, al presentar unos valores absolutos de los factores definidos muy elevados y un cambio de signo de índole negativo de la unidad salina a muy positivo para los yesos de la unidad intermedia, diferenciando igualmente estas dos unidades evaporíticas. Esta metodología permite, por lo tanto, definir la posición de la ruptura sedimentaria a nivel regional y puede, por lo tanto, ser aplicada en otras áreas, allí donde la evidencia de la ruptura no pueda ser definida en base a criterios texturales, mineralógicos, sedimentológicos, etc. En este caso los elementos traza pueden constituir potencialmente un buen método de separación entre ambas unidades.

Por último, los yesos detríticos existentes en la unidad intermedia proceden del desmantelamiento de anhidritas de la unidad salina, que son transportadas desde afloramientos septentrionales a subcuencas interiores en donde el proceso de yesificación tiene lugar, principalmente, en el medio de sedimentación. Este debía presentar una alta concentración en iones como lo atestiguan los yesos lenticulares de precipitación directa, que alternan con estos depósitos alóctonos, los cuales tienen un alto contenido relativo en elementos traza.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado dentro del Proyecto «Evolución geológica de la cuenca Media del Tajo: aspectos sedimentológicos, geoquímicos y recursos», nº PR 84-00-78-C02-02 financiado por la CAYCIT-CSIC.

Referencias

- Bodine, M. W. y Fernald, T. H. (1973). EDTA dissolution of gypsum, anhydrite and Ca-Mg carbonates. *J. Sed. Petrol.*, 43: 1152-1156.
- Butler, G. P. (1969). Modern evaporite deposition and geochemistry of coexisting brines the sebkhah, Trucial Coast, Arabian Gulf. *J. Sed. Petrol.*, 39: 70-89.
- Butler, G. P. (1973). Strontium geochemistry of modern and ancient calcium sulphate minerals. In: *The Persian Gulf Holocene carbonates sedimentation and diagenesis in shallow Epicontinental Sea* (B.H. Purser, edit.). Springer-Verlag, 423-452.
- Dean, W. E. (1978). Trace and minor elements in evaporites. In: *Marine Evaporites* (W. E. Dean y B. C. Schreiber, edit.). S.E.P.M. Short Course n 4, Oklahoma City.
- Fort, R.; Calvo, J. P. y Ordóñez, S. (1982). Contribución al conocimiento de la geología del borde oriental de la Cuenca de Madrid (Sector Pastrana-Illana). *Tecniterrae*, 49: 23-40.
- Fort, R. y Bustillo, M. (1986). Estudio geoquímico de los yesos Miocenos de la zona Este de la Cuenca de Madrid. *Estudios Geol.*, 42: 387-395.
- García del Cura, M. A.; Ordóñez, S. y López Aguayo, F. (1979). Estudio petrológico de la «Unidad Salina» de la Cuenca del Tajo. *Estudios Geol.*, 35: 325-339.
- Glover, E. D. (1961). Method of solution of calcareous materials using the complexing agent, EDTA. *J. Sed. Petrol.*, 31: 622-626.
- Hardie, L. A. (1967). The gypsum-anhydrite equilibrium at one atmosphere pressure. *Amer. Mineral.*, 52: 171-200.
- Inglés, M.; Orti, F.; Pueyo, J. J.; Quadras, M.; Rosell, L.; Salvany, J. M. y Utrillas, R. (1986). Sr. contents in sulphate minerals (mainly gypsum and anhydrite) of marine and non marine formations. *Geoch. of Earth sup. and Procc. of Min. Form.*, Granada, Abstr. 132-133.
- Megías, A.; Ordóñez, S. y Calvo, J. P. (1983). Nuevas aportaciones al conocimiento geológico de la Cuenca de Madrid. *Rev. Materiales y Procesos Geol.*, 1: 163-191.
- Ordóñez, S. (1986). *Sobre el origen y evolución de la Cuenca de Madrid*. Ed. Ayuntamiento de Madrid. Aula de cultura, 3, 37 pág.
- Ordóñez, S.; Garrido, A.; García del Cura, M. A. y Calvo, J. P. (1981). Simposium del uso industrial del subsuelo, 1: 1-8.
- Ordóñez, S.; Fontes, J. Ch. y García del Cura, M. A. (1983). Contribución al conocimiento de la sedimentogénesis evaporítica en las Cuencas Neógenas de Madrid y del Duero en base a datos de isótopos estables (^{13}C , ^{18}O y ^{34}S). *X. Congreso Nacional de Sedimentología*. Menorca. 1.49-1.52.
- Ordóñez, S.; Fontes, J. Ch. y García del Cura, M. A. (1987). Estudio isotópico de la paragénesis sulfatada sódica, calcosódica y cálcica de la unidad salina de la Cuenca de Madrid. *II Congreso de geoquímica de España*. 95-98.
- Orti, F.; Pueyo, J. J. y San Miguel Arribas, A. (1979). Petrogénesis del yacimiento de sales sódicas de Villarrubia de Santiago, Toledo (Terciario continental de la Cuenca del Tajo). *Bol. Geol. y Min.*, 90: 347-373.
- Ostrom, M. E. (1961). Separation of clay minerals from carbonate rocks by using acid. *J. Sed. Petrol.*, 31: 123-129.

- Pomerol, B. (1977). Le probleme du lessivage des phyllites dans le dosage par absorption atomique des elements trace dans les carbonates. *Chem. Geol.*, 19: 61-72.
- Ponsjack, E. (1940). Deposition of calcium sulfate from sea water. *Amer. J. Sci.*, 238: 559-568.
- Robinson, P. (1980). Determination of calcium, magnesium, manganese, strontium, sodium and iron in the carbonate fraction of limestones and dolomites. *Chem. Geol.*, 28: 135-146.
- Stewart, F. H. (1963). Marine Evaporites. *U.S. Geol. Survey Prof. Paper*, 440-Y, 52 p.
- Zen, E-AN. (1965). Solubility measurements in the system $\text{CaSO}_4\text{-NaCl-H}_2\text{O}$ at 35° and 70°C and one atmosphere pressure. *J. Petrology*, 6: 124-164.

Recibido el 7 de febrero de 1989
Aceptado el 28 de marzo de 1989