

ANÁLISIS DE LOS MINERALES DE LA ARCILLA Y SUS PROCESOS GENÉTICOS EN LAS FORMACIONES ARCILLOSAS DE LA CUENCA DEL TAJO

M. C. Domínguez Díaz *, J. M. Brell Parladé **, M. Doval Montoya *** y E. García Romero ***

RESUMEN

Se han estudiado seis sondeos, realizados en la cuenca neógena del Tajo, con el fin de conocer los procesos genéticos de los materiales arcillosos de la cuenca. Estos sondeos cortan facies correspondientes a distintos ambientes deposicionales.

La evolución observada puede relacionarse con dos etapas distintas de sedimentación. La primera corresponde a la sedimentación de la Unidad de Yesos; la asociación de minerales de arcilla en esta unidad está constituida principalmente por illita, menores contenidos de esmectita, interestratificados I/Sm, Cl/Sm, Glauconita/Sm, palygorskita y clorita. El origen de esta asociación es en parte detrítica y en parte neoformada; los aportes detríticos corresponden a illita y esmectita, mientras que los minerales neoformados son principalmente illita e interestratificados, clorita y palygorskita. Esta etapa se caracteriza por la existencia de procesos de illitización.

En la segunda etapa de sedimentación (Unidad de Arcillas Verdes), se observa un incremento de los aportes detríticos y una evolución hacia condiciones de menor salinidad. El ambiente de formación de esta unidad se encuentra enriquecido en magnesio y los minerales de la arcilla más característicos de las facies que componen dicha unidad son las esmectitas magnésicas (saponita y estevensita) y, en menor proporción, los interestratificados Cl/Sm. Esta asociación mineralógica se origina por la reacción entre las partículas detríticas arcillosas y los cationes del medio.

Palabras clave: *Cuenca del Tajo, saponita, interestratificados, sepiolita, illitización.*

ABSTRACT

The Tagus Basin is an intramontaneous basin that had an important sedimentary activity during the Neogene. Six drill boreholes have been studied; these boreholes pierce through facies corresponding to different depositional environments. Such sedimentary environments correspond to different sedimentation stages. During each stage the basin shows areas with different geochemical gradients which rule the neof ormation and transformation processes of the detrital particles that reach it.

A first stage corresponds to the sedimentation of the Gypsum Unit. Clay minerals during this stage are mainly illites, with minor contents of smectite, I/Sm, Cl/Sm, Glauconite/Sm, palygorskite and chlorite. The origin of such association is partly detrital and partly neof ormational. Detrital contribution is composed by illite and smectite. Neof ormed minerals are mainly illite and mixed-layer I/Sm, chlorite and palygorskite. This stage is characterised by illitization processes.

The second sedimentation stage corresponds to the Green Clays Unit which shows an increase in detrital supply, the environment is enriched in magnesium and silica. The most characteristic clay minerals of these facies are magnesium smectites (saponites and stevensites) and, to a lesser extent, mixed-layer Cl/Sm. The mineralogical assemblage of this unit must have been originated by reaction between detrital clay particles and cations in the sedimentary environment.

Key words: *The Basin Tagus, saponite, sepiolite, illitization.*

* Departamento de Química Agrícola, Geología y Geoquímica. EU Santa María. Universidad Autónoma de Madrid.

** Departamento de Estratigrafía. Facultad de CC. Geológicas. Universidad Complutense de Madrid.

*** Departamento de Cristalografía y Mineralogía. Facultad de CC. Geológicas. Universidad Complutense de Madrid.

Introducción

Las facies neógenas de la Cuenca del Tajo reflejan una participación de todos los sistemas montañosos periféricos en la sedimentación de la cuenca, aunque de forma variable en el tiempo. En una primera etapa, a finales del Mioceno inferior o principios del Mioceno medio y en un ambiente endorreico, los sedimentos provenían principalmente de las sucesiones carbonáticas y detríticas de la Sierra de Altomira, de las rocas ígneas y metamórficas de los Montes de Toledo y, en menor medida, del Sistema Central. Durante el Mioceno medio las facies indican una mayor actividad del Sistema Central como área fuente. Por último, durante el Mioceno superior y coincidiendo con el cambio a unas condiciones exorreicas, se atenúa la sedimentación detrítica y la actividad de las distintas áreas fuente.

La distribución horizontal de las distintas facies se presenta como un modelo relativamente simple. En todos los bordes de la cuenca se encuentran potentes prismas de materiales detríticos depositados mediante un complejo sistema de abanicos aluviales. Hacia el interior, las facies aluviales son reemplazadas por facies de llanura lutítica, en la que se intercalan progresivamente niveles evaporíticos hasta llegar a constituir un núcleo principalmente salino.

Verticalmente la evolución de las facies es más compleja. El comportamiento subsidente del sustrato, variable según las distintas zonas, la mayor o menor influencia de cada área fuente y la expansión o retracción de la lámina de agua, determina que las distintas facies se interstratifiquen, prograden o retraigan de forma distinta según los sectores.

La naturaleza petrológica de las áreas fuente, así como sus respectivos productos de alteración, permiten deducir que las arcillas detríticas que llegaron a la cuenca eran principalmente de naturaleza aluminica. No obstante, muchos trabajos publicados muestran que las sucesiones neógenas presentan minerales de la arcilla con contenidos elevados en magnesio, originados por procesos de transformación y/o neoformación. Estas modificaciones se interpretan como consecuencia de una alteración sindeposicional o durante la etapa diagnética temprana, que lleva a la incorporación de magnesio en la estructura de las arcillas detríticas.

Formaciones con presencia de sepiolita o yacimientos de este mineral han sido descritos principalmente por Martín Vivaldi y Cano (1956); Alonso *et al.* (1961, 1964); Huertas *et al.* (1970, 1971); Galán y Castillo (1984); Leguey *et al.* (1985, 1989), y Martín de Vidales *et al.* (1988). Formaciones con palygorskita han sido citadas por Ordóñez *et al.* (1977), García Palacios (1977) y Martín de Vidales

et al. (1988). Formaciones con sales sódicas, calcosódicas y magnésicas han sido estudiadas por García del Cura *et al.* (1979, 1986) y Ordóñez *et al.* (1991). Bentonitas y formaciones con esmectitas magnésicas o arcillas con altos contenidos en magnesio han sido descritas por García Santiago (1984); Calvo Sorando *et al.* (1984, 1986); Doval *et al.* (1985); Domínguez Díaz (1985); Brell *et al.* (1985); Galán *et al.* (1986); Jones *et al.* (1986); Martín de Vidales *et al.* (1991); Ordóñez *et al.* (1991); Pozo *et al.* (1991), y Pozo y Casas Sainz de Aja (1992).

El objetivo de este trabajo es establecer las relaciones genéticas entre las distintas facies, conocer su distribución en el subsuelo del sector centro-occidental de la cuenca y la evolución y el grado de transformación de los materiales arcillosos dentro de la cuenca evaporítica, en relación con las variaciones geoquímicas.

Materiales y metodología

Materiales estudiados

Se han estudiado seis sondeos con testigo continuo (facilitados por ENUSA). En la figura 1 se indica la situación de los mismos sobre un esquema cartográfico de la zona. Las unidades cartográficas empleadas han sido definidas y utilizadas en trabajos anteriores por Brell *et al.* (1985), Doval *et al.* (1985), García Romero (1988) y García Romero *et al.* (1988). Dichas unidades corresponden a tres asociaciones de facies características, identificables en el campo y que corresponden a tres ambientes deposicionales distintos.

La unidad superior, denominada Unidad de Arcosas ya ha sido descrita recientemente por Domínguez *et al.* (1996). En este trabajo se han estudiado 225 muestras de las Unidades de Arcillas Verdes y de Yesos.

La Unidad de Arcillas Verdes está constituida por lutitas de color verde o gris-verdoso, masivas o con fina laminación paralela y frecuentemente bioturbadas. Dentro de esta sucesión se encuentran niveles de arcillas rosadas y carbonatos dolomíticos con textura micrítica, frecuentemente silicificados. Los niveles carbonáticos aumentan hacia el centro de la cuenca y presentan en unos casos una laminación fina, mientras que en otros son de aspecto masivo. También se encuentran en esta unidad intercalaciones de niveles de arenas micáceas, con base erosiva y claramente canalizados, aunque ocasionalmente constituyen depósitos de flujos no confinados. Todo este conjunto de facies representa los sedimentos de un amplio *mud flat* que rodeaba el núcleo evaporítico de la cuenca.

La Unidad de Yesos agrupa los sedimentos situados en la parte central de la cuenca. Está constituida principalmente por yesos con textura microcristalina, entre los que se interstratifican niveles de arcillas con pequeños cristales de yeso y lutitas grisáceas con nódulos de yeso. También se encuentran dentro de esta sucesión, aunque son menos frecuentes, niveles de arenas micáceas. En algunos sectores hay niveles de glauberita, thenardita y halita principalmente.

Técnicas utilizadas

La caracterización mineralógica de la muestra (muestra total y agregados orientados de las fracciones inferiores a 2 y 0,5

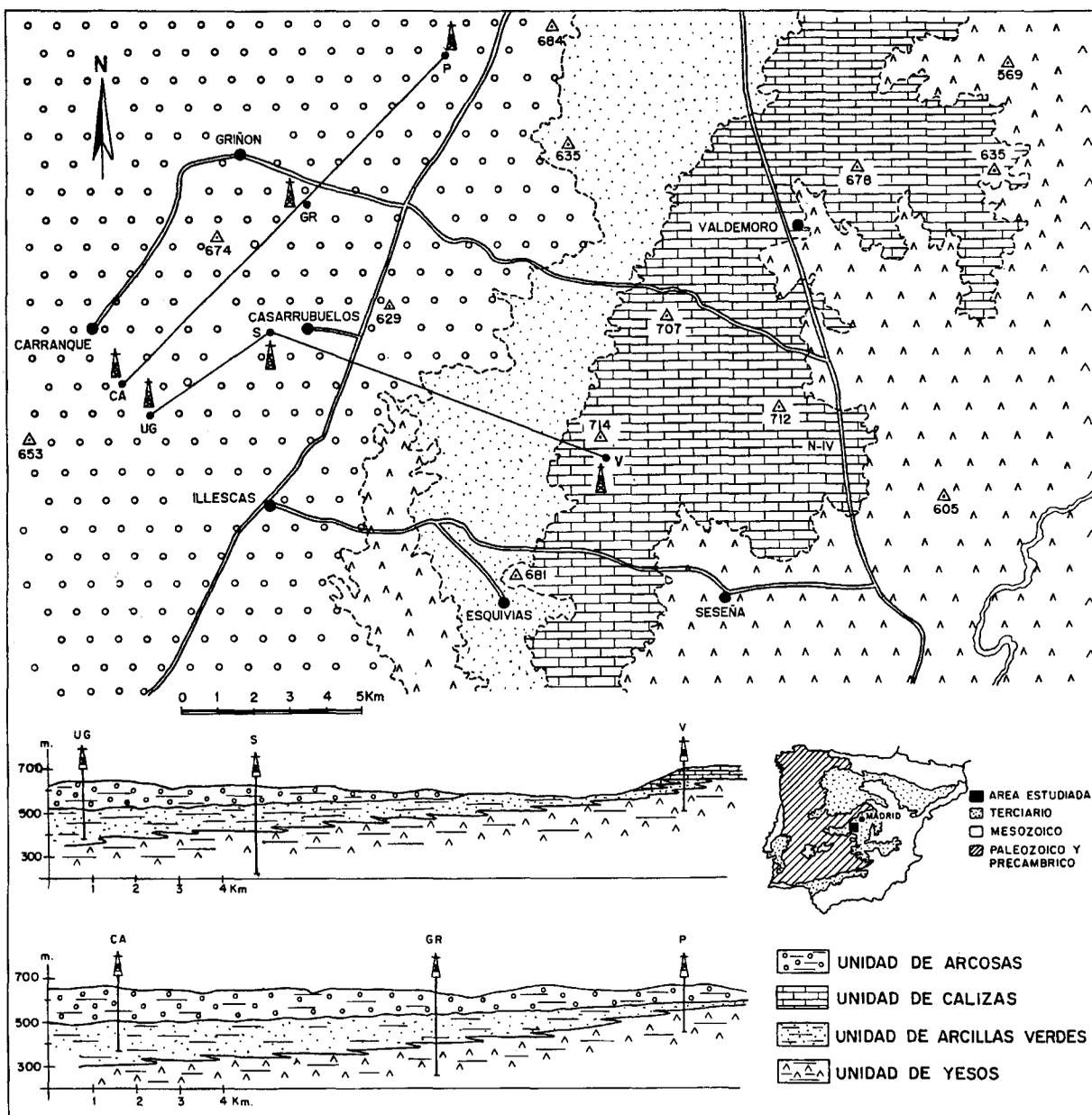


Fig. 1.—Mapa geológico del área estudiada y situación de los sondeos tomado de Domínguez Díaz (1994).

µm) se realizó mediante difracción de rayos X. Se utilizó un difractómetro Philips PW 1130/90 con monocromador de grafito y radiación K_α del Cu.

Las sustancias cementantes (yeso, carbonatos y materia orgánica) fueron eliminadas empleando los métodos recomendados por Moore y Reynolds (1989). La presencia de caolinita en muestras con clorita se confirmó mediante ataque con HCl 1N. También se ha realizado el test de Greene-Kelly (1953) en varias muestras.

Los análisis cuantitativos se efectuaron a partir de las áreas de los principales efectos de difracción, utilizando el método de los «poderes reflectantes». La reflexión (060) se determinó sobre difractogramas de polvo, introduciendo cuarzo como mineral de referencia.

Las determinaciones analíticas de los elementos químicos mayoritarios fueron realizadas mediante espectrometría de emisión atómica por plasma de acoplamiento inductivo (ICP-AES), utilizando un equipo mixto secuencial-multicanal Jobin Yvon modelo JY 70 Plus. Los análisis se realizaron sobre fracción gruesa (< 2 µm) y en algunos casos sobre fracción fina (< 0,5 µm). En todos los casos las muestras analizadas tenían más del 90 % del mineral de la arcilla dominante.

Se utilizó microscopía electrónica de barrido para conocer las relaciones texturales entre los distintos minerales arcillosos. El equipo utilizado fue un JEOL modelo JSM6400 de 40 kV equipado con espectrómetro de energías dispersivas de rayos X LINK (eXL). Por medio de un microscopio electrónico de transmisión JEOL modelo JEM 2000 de 200 kV, con espectró-

metro de energías dispersivas de rayos X LINK, AN 1000, se caracterizó la morfología de las partículas y se determinó su composición química mediante microanálisis.

También se han realizado análisis químicos puntuales de algunas micas con microsonda electrónica (JEOL JXA 50-A).

Resultados

Unidad de Arcillas Verdes

La Unidad de Arcillas Verdes, como ya se ha indicado, está formada principalmente por lutitas de color verde, ricas en materia orgánica y frecuentemente bioturbadas. Dentro de esta unidad se reconocen además intercalaciones que presentan facies algo distintas: niveles de arcillas arenosas grises con pasadas de arenas micáceas, niveles con sepiolita y, ocasionalmente, arcillas de color rosa o violáceo. En todos los sondeos estudiados se han encontrado sedimentos pertenecientes a esta unidad (fig. 1).

Los contenidos en filosilicatos oscilan entre el 80-95 % y van acompañados de pequeñas proporciones de cuarzo y feldspatos; únicamente en los niveles más arenosos sus contenidos pueden disminuir hasta el 45-50 %. Algunos niveles contienen además cemento calcáreo o dolomítico.

La asociación mineralógica de esta unidad está constituida principalmente por esmectita, con contenidos que varían entre el 60-85 %, y en menor proporción illita. La caolinita, aunque es frecuente, se presenta siempre en baja proporción, inferior al 10 %. En algunas muestras se ha detectado además sepiolita, en porcentajes muy variables, desde indicios hasta el 90 %. En las fracciones más finas es frecuente la presencia de interestratificados del tipo I-Sm y Sm-Cl.

Existen diferencias mineralógicas entre las distintas facies que forman la unidad. Los *niveles lutíticos de color verde*, que forman la mayor parte de la misma, tienen siempre contenidos elevados de esmectita. La reflexión (060) y su composición química indican carácter trioctáedrico. Su fórmula estructural permite identificarlas como saponitas, con porcentajes variables de MgO y contenidos medios de hierro (tabla 1). Son frecuentes las morfologías tipo *honey-comb* con bordes rizados, llegando en algunos casos a mostrar aspecto fibroso (fig. 2A y B). Las illitas asociadas a estas esmectitas tienen composición variable; son mayoritarias las illitas dioctaédricas y, en algunos casos, hay illitas trioctaédricas ricas en Na.

Las *intercalaciones de color rosa o violáceo*, que a veces aparecen asociadas a las lutitas verdes, se caracterizan, en difracción de rayos X, por presentar bandas mal definidas. Su composición química

corresponde a arcillas muy ricas en magnesio. Su fórmula estructural, cuando ha sido posible calcularla, corresponde a estevensita (tabla 1).

Los *niveles de arcillas arenosas grises* con intercalaciones de arenas micáceas son los que tienen los contenidos más elevados en illita de esta unidad. Los porcentajes de illita en las fracciones gruesas (< 2 µm) son superiores a los de esmectita y normalmente hay un aumento de esmectita en las fracciones más finas. La reflexión (060) en la fracción fina (< 0,5 µm) tiene aspecto de banda, con mejor definición a 1,50 Å y 1,53 Å; esto se debe a la existencia de distintas fases minerales con una variación desde minerales dioctaédricos, pasando por fases intermedias, hasta minerales trioctaédricos, indicando una relación genética entre ellos.

Las esmectitas de estos niveles suelen presentar una composición química intermedia, con valores de magnesio e hierro relativamente altos (tabla 1). También se han encontrado interestratificados Cl-Sm, I-Sm e indicios de clorita en las fracciones finas.

En general, las illitas son ricas en hierro y con valores medios de magnesio, aunque existen algunas más pobres en estos elementos. Las fórmulas químicas (tabla 1), calculadas con datos de microanálisis, efectuados sobre las fracciones más finas, se sitúan en el diagrama de Newman y Brown (1987) (fig. 4A) principalmente en el campo de las glauconitas. Las partículas de mayor tamaño, analizadas mediante microsonda electrónica, reflejan una composición intermedia entre biotita ferrífera y glauconita.

La *sepiolita* se encuentra en niveles con distintas características. En tramos margosos, en los que aparece en proporciones elevadas (contenidos superiores al 75 %), en unos casos asociada con illita y palygorskita y en otros con montmorillonita magnésica e interestratificados I-Sm. En estos casos se puede encontrar tapizando cristales de dolomita (fig. 2D) y a veces como agregados de fibras cortas (fig. 3D).

En niveles lutíticos con contenidos de sepiolita muy elevados (próximos al 90 %) la sepiolita se presenta en forma de haces densos de fibras largas (figs. 2C y 3A).

En los niveles de arcillas arenosas la proporción de sepiolita varía entre indicios y un máximo del 30 % y está asociada a illitas y esmectitas dioctaédricas o intermedias (tabla 1). También aparece en algunos niveles muy ricos en esmectitas trioctaédricas (saponitas), en estos casos en contenidos muy bajos.

Los análisis químicos de la fracción arcillosa, realizados mediante ICP-AES (tabla 2), indican que es en la Unidad de Arcillas Verdes donde se

Tabla 1.—Fórmulas estructurales representativas de la Unidad de Arcillas Verdes

Muestra	Cationes Tetraédricos		Cationes Octaédricos					Cationes Interlaminares					
	Si	Al	Al	Fe ³⁺	Mg	Ti	Mn	Cr	Ca	Na			K
S-73	3,50	0,50	0,09		2,96				0,12		0,03	Saponita	
GR-214	3,41	0,59	0,33	0,24	2,37						0,14	Saponita	
V-30	3,20	0,80	0,44	0,41	1,84	0,05			0,08		0,23	Saponita	Niveles lutíticos
CA-168	3,79	0,21	0,44	0,17	2,07				0,06		0,12	Saponita	de color verde
V-95	3,99	0,01	0,32	0,03	2,40				0,07		0,04	Estevensita	
S-73	3,33	0,67	0,05	0,11	2,69				0,06	0,57	0,14	Illita sódica	
V-30	3,22	0,78	1,84	0,06							1,07	Illita	
CA-168	3,18	0,82	1,58	0,11	0,40						0,92	Illita	
CA-285	3,28	0,71	0,90	0,78	0,71						0,28	Beidellita	
CA-285	3,17	0,82	0,31	1,17	0,77	0,07					0,56	Beidellita Fe	Niveles arcillosos
S-132	3,03	0,97	0,82	0,66	0,89	0,07					0,44	Beidellita	griseros
UG-152	3,72	0,28	0,74	0,55	0,96	0,02			0,06		0,29	Montmorillonita	pasadas
GR-140	3,50	0,50	1,51	0,16	0,19						1,10	Illita	de arenas micáceas
V-48	3,08	0,91	0,16	1,48	0,37	0,13					0,73	Glaucionita	
V-48	2,87	1,13	0,01	1,57	0,33	0,21					0,89	Glaucionita	
CA-285	2,92	1,08	0,04	1,40	0,69	0,16					0,73	Glaucionita	
GR-226	5,81	0,18	0,36	0,10	3,41							Sepiolita	
V-6	5,92	0,08	0,89	0,21	2,37						0,05	Sepiolita	
GR-96	5,81	0,19	0,99		2,61							Sepiolita	Niveles con sepiolita
S-187	5,67	0,33	0,35	0,21	3,15		0,03	0,08				Sepiolita	
GR-226	3,23	0,77	1,16	0,27	0,88	0,03					0,61	Int. I/Sm	
GR-96	3,97	0,03	0,83	0,16	1,35				0,09		0,20	Montmorillonita	
S-187	3,82	0,18	0,64	0,06	1,97				0,04		0,05	Saponita	

encuentran los contenidos más bajos de Al_2O_3 y más altos en MgO y SiO_2 . Como es lógico, los mayores contenidos en MgO coinciden con las muestras con porcentajes más elevados de saponita, estevensita o sepiolita. Las muestras con porcentajes de MgO algo menores tienen una composición similar a la media obtenida para la Unidad de Yesos.

Unidad de Yesos

La Unidad de Yesos está constituida por capas de yeso con textura variable, siendo muy frecuente el yeso fibroso. En otros casos aparece en forma de nódulos o como cristales de varios milímetros dispersos en una matriz arcillosa. Entre las capas de yeso se intercalan lutitas grises masivas o niveles finos de arenas micáceas. También aparecen, en algunos sectores, niveles de la magnesita, glauberita o anhidrita. Se han cortado sedimentos de esta unidad en el muro de 4 de los sondeos (fig. 1).

En la fracción arcillosa, el mineral más abundante es la illita, acompañada de esmectita en menor proporción. En los sondeos (V) y (P), los contenidos en illita suelen ser superiores al 80 % en todas las muestras, mientras que en los (S) y (GR) se han

encontrado, esporádicamente, algunos niveles con esmectita como mineral dominante. En casi todas las muestras estudiadas se ha detectado la presencia de caolinita en contenidos máximos del 10 % e interestratificados Cl-Sm e I-Sm. Además, en los tramos con porcentajes elevados en illita son frecuentes los indicios de palygorskita (fig. 3B y 3C) y clorita.

Las muestras con altos contenidos en illita presentan una reflexión (060) en forma de banda con dos máximos a 1,50 Å y 1,53 Å, y con frecuencia con un efecto intermedio menos intenso a 1,51 Å, lo que indica la coexistencia de distintas fases minerales. Los microanálisis de estas illitas reflejan una composición generalmente dioctaédrica y las esmectitas presentan contenidos medios en magnesio (tabla 3). También se puede observar en dicha tabla fórmulas representativas de interestratificados al azar I-Sm y Glaucionita-Sm. En la figura 4B se indica la situación sobre el diagrama de Newman y Brown (1987) de los minerales de esta unidad.

En los casos en que la esmectita es el filosilicato dominante, la reflexión (060) también se presenta con aspecto de banda con dos máximos a 1,50 Å y 1,53 Å, siendo este último de mayor intensidad. Los microanálisis de estas esmectitas muestran una naturaleza dioctaédrica o intermedia (montmorillonitas magnésicas) (tabla 3). La proyección en el

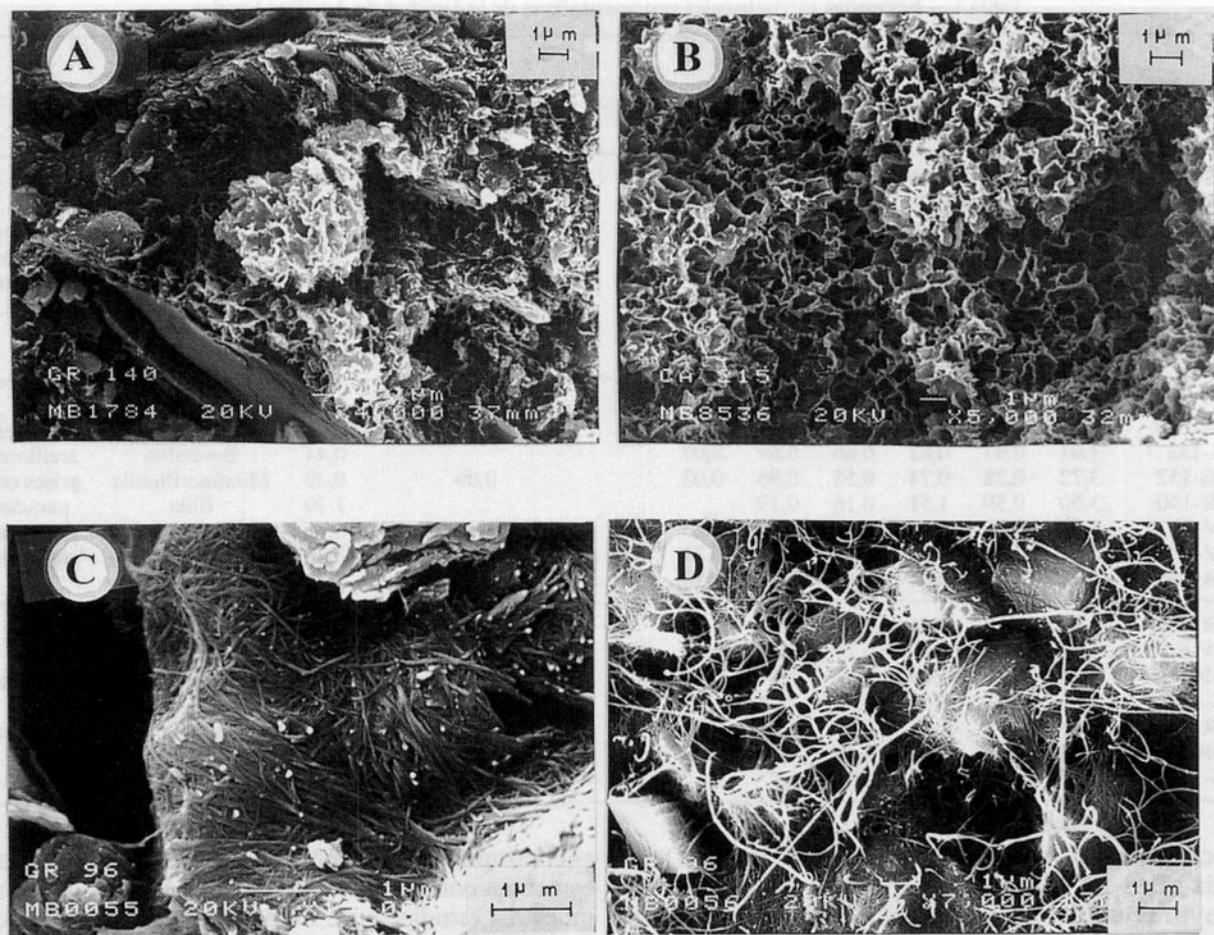


Fig. 2.—Imágenes obtenidas mediante SEM de muestras de materiales arcillosos procedentes de las unidades estudiadas. A. Aspecto general de la muestra. B. Textura de esmectitas, tipo *honey-comb* con bordes rizados. C. Fibras largas de sepiolita formando haces densos. D. Sepiolita recubriendo cristales de dolomita.

triángulo de Newman y Brown (1987) de la illitas muestra que son de dos tipos al situarse unas en el campo de las glauconitas y otras en el de las fengitas. Además se encuentran en estas muestras interstratificados Sm-Cl.

Los análisis químicos de los elementos mayores de la fracción arcillosa (tabla 2) muestran que los contenidos en Al_2O_3 son generalmente superiores a los de la Unidad de Arcillas Verdes y los de SiO_2 son similares o inferiores; como es lógico, los más bajos coinciden con las muestras más ricas en illita. Los contenidos en MgO suelen ser ligeramente inferiores a los de la Unidad de Arcillas Verdes.

Discusión

Entre las dos unidades estudiadas se observan diferencias litológicas, mineralógicas y químicas. A

pesar de las diferencias que presentan entre sí, en conjunto, muestran la evolución típica de la sedimentación en un lago salino. La composición química de los sedimentos estudiados varía desde sulfatos hasta carbonatos de calcio y magnesio.

Estos minerales van acompañados de arcillas con contenidos elevados de magnesio, aunque en los niveles más detríticos, las arcillas son más ricas en hierro y aluminio.

En la figura 5 puede verse cómo el conjunto de esmectitas e illitas de estas unidades presenta una gradación composicional desde fases dioctaédricas hasta trioctaédricas, pasando por tipos de composición intermedia, tanto en lo que se refiere a la suma de cationes octaédricos como a la carga interlamina. Los minerales con mayores contenidos en magnesio se encuentran en la Unidad de Arcillas Verdes, mientras que en la Unidad de Yesos son más frecuentes los minerales de composición interme-

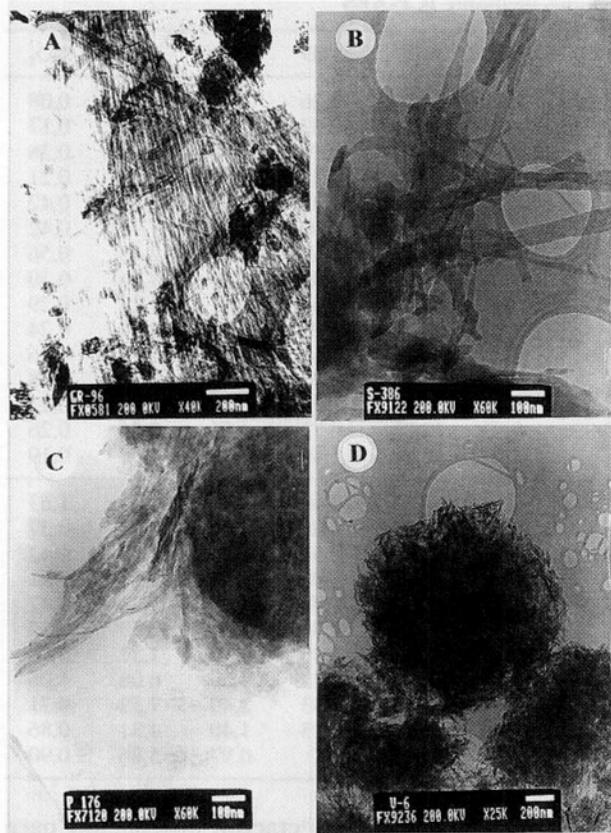


Fig. 3.—Imágenes obtenidas mediante TEM de muestras de materiales arcillosos procedentes de las unidades estudiadas. A. Fibras de sepiolita. B. Detalle de fibras de palygorskita. C. Partícula de esmectita con fibras de palygorskita. D. Agregado de fibras cortas de sepiolita.

dia. Esta variación composicional (tablas 1 y 3), con presencia de minerales interestratificados, junto con la existencia de morfologías con terminaciones fibrosas (figs. 2A y 2B y 3C) reflejan los procesos de neoformación y transformación que tuvieron lugar en la cuenca.

La característica principal de la Unidad de Arcillas Verdes es la existencia de niveles con contenidos elevados de esmectitas trioctaédricas, saponita o estevensita, acompañada en muchos casos de interestratificados saponita-clorita; en estos niveles es donde predominan los procesos de neoformación. En los niveles de mayor influencia detrítica, donde los contenidos de illita y esmectita son similares, es donde se ponen de manifiesto de forma más clara los procesos de transformación, apareciendo fases minerales de composición intermedia entre dioctaédrica y trioctaédrica.

Los procesos de transformación y neoformación de esmectitas triotaédricas en medios lacustres actuales o paractuales, han sido citados por numero-

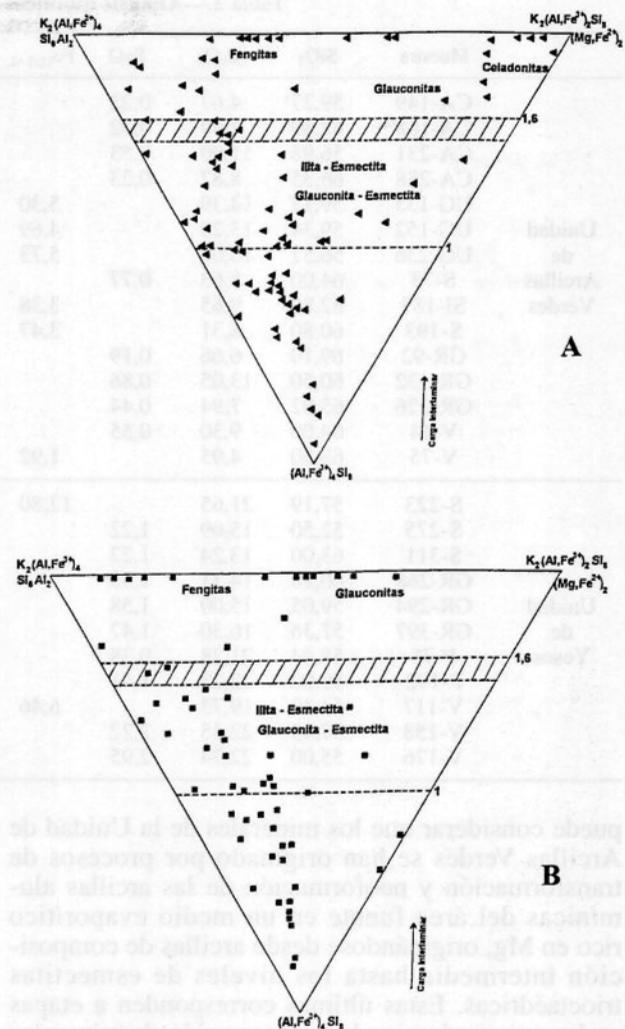


Fig. 4.—Proyección de las fórmulas cristalquímicas sobre el diagrama de Newman y Brown (1987). A. Minerales de la Unidad de Arcillas Verdes. B. Minerales de la Unidad de Yesos.

sos autores (Jones y Weir, 1983; Jones y Spencer, 1985; Chamley, 1989; Fisher, 1988). Todos ellos están de acuerdo en la coexistencia de minerales detríticos y autigénicos en estos medios, describiendo una transformación de esmectitas dioctaédricas que, mediante un enriquecimiento en magnesio y sílice, pasan a trioctaédricas. Generalmente consideran la presencia de interestratificados como una etapa de dicho proceso y establecen como condiciones geoquímicas más adecuadas para estos procesos la existencia de un medio hipersalino y enriquecido en magnesio.

De acuerdo con estos autores que estudian sedimentos formados en condiciones similares, y teniendo en cuenta los resultados obtenidos, se

Tabla 2.—Análisis químicos obtenidos mediante ICP-AES

Muestra	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Fe _{TOTAL}	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	
CA-149	59,27	4,67	0,23		1,02	0,08	24,76	8,26	1,48	0,32	0,08	
CA-168	67,89	7,49	0,32		2,75	0,04	14,49	0,87	2,08	0,62	0,17	
CA-231	56,98	11,90	0,53		4,94	0,06	18,65	0,75	3,61	1,32	0,38	
CA-288	66,35	8,87	0,23		3,27	0,03	14,00	0,31	4,04	0,72	0,21	
UG-135	59,17	14,39		5,30		0,05	18,26	1,23	2,99	1,65	0,42	
Unidad de Arcillas Verdes	UG-152	59,34	13,20	4,69		0,04	17,06	0,60	6,14	1,76	0,42	
	UG-236	56,57	13,08	5,73		0,05	15,17	0,59	6,33	2,45	0,56	
	S-73	64,00	8,63	0,77		2,04	0,04	15,00	0,09	5,45	1,26	0,30
	SI-187	62,80	9,65		3,38		0,06	12,34	3,64	4,81	1,23	0,29
	S-193	60,80	8,31		3,47		0,05	17,96	2,77	5,71	0,94	0,24
	GR-92	69,10	6,66	0,19		1,61	0,03	15,07	1,43	0,53	0,57	0,16
	GR-132	60,50	13,05	0,86		3,78	0,04	17,05	1,77	4,92	1,85	0,38
	GR-226	65,02	7,94	0,44		3,25	0,03	18,35		2,29	1,42	0,27
	V-14	64,00	9,30	0,55		3,82	0,03	17,80	0,77	4,26	0,55	0,26
	V-75	63,30	4,95		1,92		0,02	14,46	1,45	0,65	0,60	0,19
	S-223	57,19	21,65		12,80		0,13	6,24	2,40	2,50	5,44	1,63
	S-275	52,50	15,09	1,22		3,87	0,08	18,12	0,61	6,24	1,88	0,57
	S-311	63,00	13,24	1,22		2,82	0,06	14,65	0,61	3,05	1,37	0,42
	GR-268	60,18	14,71	1,35		3,38	0,05	16,28	0,48	1,47	1,79	0,51
Unidad de Yesos	GR-294	59,05	15,00	1,58		4,59	0,13	15,81	0,98	1,26	1,71	0,47
	GR-397	52,36	16,30	1,47		3,74	0,02	17,41	0,52	4,90	2,59	0,73
	P-75	58,44	21,28	0,38		2,92	0,02	5,89	1,45	4,40	1,32	0,28
	P-192	59,00	22,23	1,41		7,71	0,08	6,14	0,22	1,25	6,08	1,06
	V-117	54,30	19,73		6,46		0,08	7,41	1,53	2,49	7,52	0,71
	V-158	57,43	22,35	2,22		5,13	0,09	7,66	0,13	1,40	4,81	0,86
	V-176	55,00	22,74	2,95		6,70	0,07	6,99		0,97	5,86	0,90

puede considerar que los minerales de la Unidad de Arcillas Verdes se han originado por procesos de transformación y neoformación de las arcillas aluminicas del área fuente en un medio evaporítico rico en Mg, originándose desde arcillas de composición intermedia hasta los niveles de esmectitas trioctaédricas. Estas últimas corresponden a etapas en las que predomina la neoformación de minerales con contenidos más altos en Mg (saponita, estevensita y sepiolita).

En la Unidad de Yesos, la illita es generalmente el mineral más abundante. Este hecho ya ha sido observado anteriormente en esta cuenca por García Santiago (1984) y García Romero (1988). Dichos autores explican su origen mediante procesos de illitización de esmectitas. Creemos que la illita de esta unidad se debe haber formado a partir de esmectitas detríticas en condiciones de alta salinidad (medio rico en potasio y magnesio), en un clima árido o semiárido con alternancias estacionales.

Procesos de illitización de esmectitas detríticas similares han sido citados por numerosos autores, tales como Singer y Stoffers (1980), Jones y Weir (1983), Srodon y Eberl (1984), Eberl *et al.* (1986, 1993), Srodon (1987), Andreoli *et al.* (1987), Inoue *et al.* (1990). Todos ellos consideran necesaria la presencia de minerales ricos en potasio y la alter-

nancia de ciclos de humectación-deseccación para que se produzca este proceso.

Otra cuestión que hay que mencionar es el origen de la glauconita detectada en distintas muestras de estas dos unidades. Este mineral es muy común en sedimentos arenosos y/o limosos de origen marino, aunque también ha sido citado en medios continentales. Respecto a su origen, Odin y Matter (1981) e Ireland *et al.* (1983), entre otros autores, indican que las condiciones de formación típicas de este mineral corresponden a un medio marino.

No obstante, existen trabajos de otros autores que citan la presencia de mica o illita glauconítica en medios no marinos. Parry y Reeves (1968) sugieren la formación de mica glauconítica en lagos salinos a partir de montmorillonita preexistente. Por otro lado, Chamley (1989) observa que en los sedimentos lacustres oligocenos del Macizo Central Francés aparecen casi exclusivamente minerales illíticos, generalmente ricos en Fe; denomina a estos minerales illita ferrífera o glauconítica y atribuye su origen a la evolución de esmectita preexistente.

Los trabajos anteriores y la interpretación de los resultados obtenidos nos permiten considerar que la glauconita existente en los niveles de arenas micáceas de la Unidad de Arcillas Verdes y, ocasionalmente en la Unidad de Yesos, tiene su origen en la transformación de biotitas; su morfología, el tama-

Tabla 3.—Fórmulas estructurales representativas de la Unidad de Yesos

Muestra	Cationes Tetraédricos			Cationes Octaédricos				Cationes Interlaminares					
	Si	Al	Fe ³⁺	Al	Fe ³⁺	Mg	Ti	Ca	Na	K			
P-192	2,95	1,05		1,95	0,07	0,12					0,74	Illita	
V-189	3,11	0,89		0,38	1,24	0,55	0,05				0,73	Illita	
P-192	3,18	0,82		1,20	0,34	0,65	0,01		0,33		0,51	Illita	
P-176	3,25	0,75		1,00	0,39	1,16					0,26	Beidellita Mg	Muestras
P-176	3,16	0,84		0,96	0,52	0,97					0,45	Beidellita	ricas
S-230	3,13	0,87		1,35	0,37	0,76	0,02				0,11	Beidellita	en
P-176	3,26	0,73		1,67	0,17	0,27					0,67	Illita/Esmectita	illita
V-165	2,76	1,24		0,54	0,82	0,99	0,14				0,62	Glauconita/Esmectita	
S-386	3,90	0,10		0,95	0,08	4,51						Clorita	
P-176	3,65	0,35		0,83	0,17	1,18						Palygorskita	
GR-334	4,00			0,70	0,28	1,20	0,08	0,08			0,18	Montmorillonita Mg	
GR-334	3,83	0,17		0,80	0,46	0,92		0,06			0,42	Montmorillonita	Muestras
S-334	3,38	0,62		1,57	0,20	0,55		0,08			0,04	Beidellita	ricas
S-334	3,21	0,79		1,17	0,22	0,79					1,02	Illita	en
S-334	2,69	1,11	0,20		1,44	0,58	0,20				1,04	Glauconita	esmectita
GR-334	3,47	0,53		1,21	0,30	0,52					0,96	Illita	

ño de cristal así como las inclusiones que se observan en ellos apoyan esta interpretación. Por otro lado, la glauconita de los sedimentos más finos debe tener probablemente un origen diferente, se ha formado a partir de esmectita, de forma similar al origen propuesto por Chamley (1989). Esta interpretación se apoya en los datos de los microanálisis realizados en partículas finas, que corresponden a beidellitas ferríferas, a interstratificados esmectita-glauconita o glauconita s.s., lo que indica una gradación composicional desde el término original.

Hemos visto que los minerales fibrosos de la

arcilla se encuentran en niveles con distintas características. En la Unidad de Arcillas Verdes se ha encontrado sepiolita en forma de haces de fibras largas con porcentajes variables entre un 30 % y un 90 %. Esta sepiolita debe tener un origen por neoformación, a partir de soluciones ricas en Mg, en medios con una relación alta Si/Al y pH básico. Esta génesis coincide con la que han propuesto varios autores (Galán y Castillo, 1984; Brell *et al.*, 1985; Doval *et al.*, 1985) para las potentes formaciones de sepiolita que se encuentran en el sector norte de esta cuenca. Un origen similar tendría la sepiolita que forma parte de los niveles carbonáticos situados a techo de esta unidad y que aparece asociada con palygorskita. En ellos la sepiolita se suele presentar como agregados de fibras cortas que tapizan los cristales de calcita o dolomita.

También se han detectado pequeños contenidos de sepiolita (5 %) asociada a los niveles muy magnésicos (saponitas). En estos casos puede suponerse un origen diagenético, mediante un proceso de disolución-precipitación de esmectitas magnésicas similares a los descritos por Khoury *et al.* (1982), Eberl *et al.* (1982) y Post y Janke (1984).

Consideramos que los indicios de palygorskita encontrados en los niveles illíticos de la Unidad de Yesos se deben haber formado por un proceso de neoformación. Procesos de este tipo han sido descritos por Galán y Castillo (1984); Chamley (1989); Ingles y Anadon (1991), y Chahi *et al.* (1993). En conjunto estos autores sugieren que el proceso de precipitación se ve favorecido por la inestabilidad de la illita detrítica en medios alcalinos, aportando los iones necesarios para la formación de palygorskita.

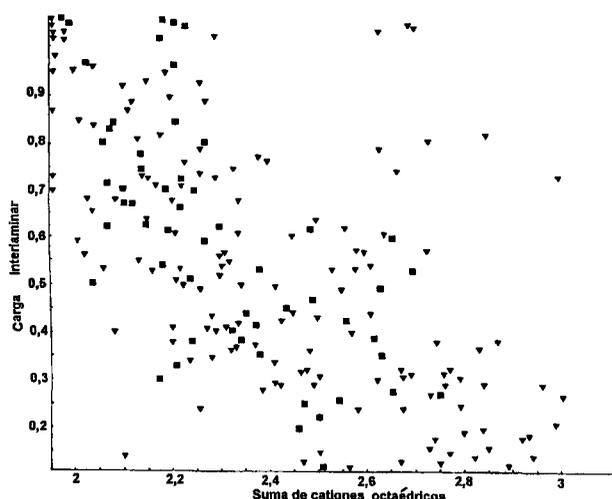


Fig. 5.—Diagrama donde se representan la carga interlaminaar y la suma de cationes octaédricos de minerales de las dos unidades, calculados a partir de datos obtenidos mediante TEM-EDX. (▲) Unidad de Arcillas Verdes. (■) Unidad de Yesos.

Conclusiones

Los datos de campo y los obtenidos a partir del estudio de los sondeos muestran la existencia durante el Neógeno de varias etapas de sedimentación con distintas condiciones. Estos ambientes sedimentarios coexisten y se suceden en el tiempo, observándose un desplazamiento de los mismos hacia el centro de la cuenca. Las facies evolucionan en la vertical y en la horizontal de forma análoga, a la vez que se restringen progresivamente las facies más evaporíticas hacia el centro de la cuenca, como se refleja en la figura 1. En detalle, durante cada etapa, la cuenca presenta distintos sectores con diferentes condiciones geoquímicas, que condicionan los distintos procesos de neoformación y transformación de las partículas detríticas que llegan a ella.

Esta evolución temporal está condicionada por cambios del área fuente y variaciones climáticas y geoquímicas del medio de sedimentación, pudiendo esquematizarse en las siguientes etapas:

La primera etapa corresponde a la sedimentación de la Unidad de Yesos. Los sedimentos originados durante este intervalo indican una sedimentación en un lago salino de composición $\text{SO}_4\text{-Cl-Ca}^{2+}\text{-Na}^+\text{-Mg}^{2+}$. En estas condiciones se forman los minerales evaporíticos, cuya génesis va acompañada de aportes detríticos débiles, debido a las condiciones de aridez y de estabilidad tectónica de la cuenca. Los minerales de la arcilla de esta etapa son principalmente illita, junto con pequeños contenidos de I/Sm, esmectita, Cl/Sm, glauconita/Sm, palygorskita y clorita. El origen de esta asociación es, en parte, detrítica y en parte neoformada. Los aportes detríticos consisten en illita y esmectita, derivadas del área fuente metamórfica y tal vez, aunque en menor medida, de las rocas graníticas del Sistema Central. Los minerales neoformados son principalmente parte de la illita e interestratificados I/Sm, clorita y palygorskita. Esta etapa se caracteriza por la existencia de procesos de illitización, favorecidos por la presencia de K y repetidos ciclos de humectación-desección en un ambiente de *playa-lake*, mediante procesos similares a los propuestos principalmente por Singer y Stoffers (1980), Eberl *et al.* (1986, 1993) e Inoue *et al.* (1990).

En una etapa posterior, la desaparición de los niveles evaporíticos y el incremento de los de naturaleza lutítica, reflejan un aumento de los aportes detríticos y un tránsito hacia condiciones de menor salinidad. Se observan además mayores contenidos de carbonatos y de materia orgánica en los sedimentos y el medio ha debido evolucionar, transformándose en un extenso *mud flat* relativamente enriquecido en magnesio y sílice. Los minerales de la arcilla más característicos, que se originan en estas condi-

ciones, son las esmectitas magnésicas (saponita y estevensita) y, en menor medida, los interestratificados Cl/Sm. La asociación mineralógica de esta unidad debe haberse originado por reacción entre las partículas detríticas arcillosas y los cationes del medio, mediante procesos similares a los propuestos por Tardy *et al.* (1974); Khoury *et al.* (1982); Jones y Spencer (1985); Chamley (1989), y Fisher (1988).

En las zonas de borde del *mud flat* y en las llanuras adyacentes a los canales se produce una sedimentación más lenta y con interrupciones temporales, formándose microambientes confinados que presentan las condiciones favorables para la neoformación de glauconita y para la transformación de las micas de los niveles más arenosos; estas neoformaciones y transformaciones se realizan en la interfase débilmente reductora del sedimento y oxidante del agua. En estos ambientes tienen su origen la glauconita y los interestratificados glauconita/esmectita que se encuentran en la Unidad de Arcillas Verdes y, en menor medida, en la Unidad de Yesos.

A diferencia de la Unidad de Arcosas, cuyas características han sido descritas por Domínguez *et al.* (1996), las facies pertenecientes a las Unidades de Yesos y de Arcillas Verdes presentan un enriquecimiento en Mg con respecto a las arcillas detríticas derivadas de las posibles áreas fuente. Por otra parte las dos unidades estudiadas pueden considerarse relacionadas entre sí por un cambio gradual de facies tanto en la horizontal como en la vertical, debidos a la evolución de las condiciones geoquímicas de la cuenca.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Dr. D. Carlos Barba, a D. Juan Luis Baldonado y a D. Jesús González, del Centro de Microscopía Electrónica de la Universidad Complutense, su colaboración y asesoramiento.

Referencias

- Alonso, J. J., García Vicente, J. y Riba, O. (1961). Sedimentos finos del Centro de la Meseta terciaria del Tajo. *II Reunión Sedimentología. CSIC. Madrid*, 21-55.
- Alonso, J. J., García Vicente, J. y Riba, O. (1964). Arcillas miocenas de la Cuenca del Tajo. *Cursillos y Conferencias. Instituto Lucas Mallada*, 277-286.
- Andreoli, C. Y., Robert, M. y Pons, C. H. (1987). First steps of smectite-illite transformation with humectation and dessiccation cycles. En: *6th Meet. Eur. Clay Groups, Sevilla, Proc.*, 76-78.
- Brell, J. M., Doval, M. y Caramés, M. (1985). Clay Minerals Distribution in the evaporitic Miocene Sedi-

- ments of the Tajo Basin, Spain. *Miner. Petrogr. Acta*, 29A, 267-276.
- Calvo, J. P., Alonso, A. M. y García del Cura, M. A. (1986). Depositional sedimentary controls on sepiolite occurrences in Paracuellos de Jarama, Madrid Basin. *Geogaceta*, 1, 25-28.
- Calvo Sorando, J. P., Ordóñez, S., Hoyos, M. y García del Cura, M. A. (1984). Caracterización sedimentológica de la Unidad Intermedia del Mioceno de la zona sur de Madrid. *Rev. Mater. y Procesos Geol.*, 2, 145-176.
- Chahi, A., Duplay, J. y Lucas, J. (1993). Analyses of palygorskites and Associated Clays from the Jbel Rhassoul (Morocco): Chemical Characteristics and Origin of Formation. *Clays & Clay Miner.*, 41, 401-411.
- Chamley, H. (1989). *Clay Sedimentology*, Springer-Verlag, Berlín, 623 págs.
- Domínguez Díaz, M. C. (1985). *Sedimentología y mineralogía en las facies detríticas neógenas en la Cuenca de Madrid (Paracuellos-Torrejón)*, tesis doctoral, Facultad de Ciencias Geológicas, Univ. Complutense de Madrid.
- Domínguez Díaz, M. C. (1994). *Mineralogía y sedimentología del Neógeno del sector centro-occidental de la Cuenca del Tajo*, tesis doctoral, Univ. Complutense de Madrid, 309 págs.
- Domínguez Díaz, M. C., Doval, M., García Romero, E. y Brell, J. M. (1996). Análisis de los procesos de formación de minerales de la Unidad de Arcosas de la Cuenca del Tajo. *Geogaceta*, 20, 1488-1491.
- Doval, M., Domínguez Díaz, M. C., Brell, J. M. y García Romero, E. (1985). Mineralogía y sedimentología de las facies distales del borde norte de la Cuenca del Tajo. *Bol. Soc. Esp. Miner.*, 8, 257-269.
- Eberl, D. D., Jones, B. F. y Khoury, H. N. (1982). Mixed layer Kerolite-stevensite from the Amargosa Desert, Nevada. *Clays & Clay Miner.*, 30, 321-326.
- Eberl, D. D., Šrodon, J. y Northrop, H. R. (1986). Potassium fixation in smectite by wetting and drying. En: J. A. Davis y K. F. Hayes (eds.), *Geochemical processes at mineral surfaces*, Amer. Chem. Soc. Symp. ser., 323, 296-326.
- Eberl, D. D., Velde, B. y McCormick, T. (1993). Synthesis of illite-smectite from smectite at earth surface temperatures and high pH. *Clay Miner.*, 28, 49-60.
- Fisher, R. S. (1988). Clay Minerals in Evaporite Host Rocks, Palo Duro Basin, Texas Panhandle. *J. Sedim. Petrol.*, 58, 836-844.
- Galán, E. y Castillo, A. (1984). Sepiolite-Palygorskite in Spanish Tertiary Basins: Genetical Patterns in Continental Environments. En: A. Singer y E. Galán (eds.), *Palygorskite-sepiolite. Occurrences, Genesis and Uses. Developments in Sedimentology*, Elsevier, Amsterdam, 37, 87-124.
- Galán, E., Alvarez, A. y Esteban, M. A. (1986). Characterization and technical properties of a Mg-rich bentonite. *Applied Clay Science*, 1, 295-309.
- 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.
- García del Cura, M. A., Ordóñez, S. y Calvo, J. P. (1986). La Unidad Salina (Mioceno) en el área de Madrid. Características petrológicas y mineralógicas. *Bol. Soc. Esp. Miner.*, 9, 329-338.
- García Palacios, M. C. (1977). Mineralogía de arcillas del Terciario de la Cuenca Alta del Tajo: un ejemplo de secuencia magnésiana. *Estudios Geol.*, 33, 373-484.
- García Romero, E. (1988). *Estudio mineralógico y estratigráfico de las arcillas de las facies centrales del Neógeno del borde sur de la Cuenca del Tajo*, tesis doctoral, Univ. Complutense de Madrid, 436 págs.
- García Romero, E., Doval, M., Brell, J. M. y Perruchot, A. (1988). Procesos diagenéticos en las arcillas de la región de La Sagra (Cuenca del Tajo). *Bol. Geol. Min.*, 99, 958-974.
- García Santiago, P. (1984). *Estudio mineralógico de las arcillas de las facies evaporíticas de la Cuenca del Tajo*, tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias Geológicas, Univ. Complutense de Madrid.
- Greene-Kelly, R. (1953). The identification of montmorillonoids in clays. *J. Soil Sci.*, 4, 233-237.
- Huertas, F., Linares, J. y Martín Vivaldi, J. L. (1970). Clay Minerals Geochemistry in Basic Sedimentary Environments. *Reunión Hispano-Belga de Minerales de la Arcilla*, Madrid.
- Huertas, F., Linares, J. y Martín Vivaldi, J. L. (1971). Minerales fibrosos de la arcilla en cuencas sedimentarias españolas. I. Cuenca del Tajo. *Bol. Geol. Min. Esp.*, 82, 534-542.
- Inglés, M. y Anadon, P. (1991). Relationship of Clay Minerals to Depositional Environment in the Non-marine Eocene Pontils Group, SE Ebro Basin (Spain). *J. Sedim. Petrol.*, 61, 926-939.
- Inoue, A., Watanabe, T., Kohyama, N. y Brusewitz, A. M. (1990). Characterization of illitization of smectite in bentonite beds at Kinnekulle, Sweden. *Clays & Clay Miner.*, 38, 241-249.
- Ireland, B. J., Curtis, C. D. y Whiteman, J. A. (1983). Compositional variation within some glauconites and illites and implications for their stability and origins. *Sedimentology*, 30, 769-786.
- Jones, B. F. y Weir, A. H. (1983). Clay Minerals of lake Abert, an alkaline, saline lake. *Clays & Clay Miner.*, 31, 161-172.
- Jones, B. F. y Spencer, R. J. (1985). Clay Minerals of the Great Salt Lake basin. *Proc. Int. Clay Conf., Denver*, absts 6.
- Khoury, H. N., Eberl, D. D. y Jones, B. F. (1982). Origin of magnesium clays from the Amargosa Desert, Nevada. *Clays & Clay Miner.*, 30, 327-336.
- Leguey, S., Pozo, M. y Medina, J. A. (1985). Polygenesis of sepiolite and palygorskite in a fluvial-lacustrine environment in the Neogene Basin of Madrid. *Miner. Petrogr. Acta*, 29A, 287-301.
- Leguey, S., Pozo, M. y Medina, J. A. (1989). Paleosuelos de sepiolita en el Neógeno de la Cuenca de Madrid. *Estudios Geol.*, 45, 279-291.
- Martín de Vidales, J. L., Pozo, M., Medina, J. A. y Leguey, S. (1988). Formación de sepiolita-palygorskita en litofacies lutítico-carbonáticas en el sector de Borox-Esquivias (Cuenca de Madrid). *Estudios Geol.*, 44, 7-18.
- Martín de Vidales, J. L., Pozo, M., Alía, J. M., García Navarro, F. y Rull, F. (1991). Kerolite-stevensite mixed-layers from the Madrid Basin, Central Spain. *Clay Miner.*, 26, 329-342.
- Martín Vivaldi, J. L. y Cano, J. (1956). Contribución al estudio de la sepiolita, caracterización y propiedades

- de sepiolitas españolas. *An. Edafol. Agrob.*, 12, 827-855.
- Moore, D. M. y Reynolds, R. C. Jr. (1989). *X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals*, Oxford University Press, Nueva York, 332 págs.
- Newman, A. C. D., y Brown, G. (ed.) (1987). *Chemistry of Clays and Clay Minerals*, Mineralogical Society Monograph n.º 6, Longman Scientific and Technical Mineralogical Society, Londres, 1-128.
- Odin, G. S. y Matter, A. (1981). De glauconiarum origine. *Sedimentology*, 28, 611-641.
- Ordóñez, S., Brell, J. M., Calvo Sorando, J. P. y López Aguayo, F. (1977). Contribución al conocimiento mineralógico del borde SW de la Cuenca del Tajo (Toledo-San Martín de Pusa). *Estudios Geol.*, 33, 467-472.
- Ordóñez, S., Calvo, J. P., García del Cura, M. A., Alonso-Zarza, A. M. y Hoyos, M. (1991). Sedimentology of sodium sulphate deposits and special clays from the Tertiary Madrid Basin (Spain). *Spec. Publ. Int. Ass. Sediment.*, 13, 39-55.
- Post, J. L. y Janke, N. C. (1984). Barallat sepiolite, Inyo County California. En: A. Singer y E. Galán (eds.), *Palygorskite-sepiolite. Occurrences, Genesis and Uses. Developments in Sedimentology*, Elsevier, Amsterdam, 159-167.
- Pozo, M., Cuevas, J., Moreno, A., Redondo, R. y Leguey, S. (1991). Caracterización de arcillas magnéticas bentónicas en la zona de Yuncos (Toledo). *Bol. Geol. Min.*, 102, 893-904.
- Pozo, M. y Casas Sainz de Aja, J. (1992). Mineralogía y sedimentología del yacimiento de saponita de Yuncos (Toledo). *Estudios Geol.*, 48, 47-65.
- Singer, A. y Stoffers, P. (1980). Clay mineral diagenesis in two East African lake sediments. *Clay Miner.*, 15, 291-307.
- Srodon, J. (1987). Illite-Smectite in the rock cycle. En: *6th Meet. Eur. Clay Groups, Sevilla, Proc.*, 48-50.
- Srodon, J. y Eberl, D. D. (1984). Illite. En: *Bailey SW, Ed., Micas, Revl Miner. Miner. Soc. Am.*, 13, 495-544.
- Tardy, Y., Cheverry, C. y Fritz, B. (1974). Néof ormation d'une argile magnésienne dans les dépressions interdu naires du lac Tchad. Application aux domaines de stabilité des phyllosilicates alumineux, magnésiens et ferrifères. *C.R. Acad. Sci., Paris*, 278, 1999-2002.

Recibido el 22 de abril de 1997.

Aceptado el 24 de noviembre de 1997.