

SEDIMENTOLOGIA Y PETROLOGIA DE LOS ABANICOS ALUVIALES Y FACIES ADYACENTES EN EL NEOGENO DE PARACUELLOS DE JARAMA (MADRID)

A. M. Alonso*, J. P. Calvo** y M. A. García del Cura*

RESUMEN

Se estudia en este trabajo la variación lateral y vertical de las litofacies del Mioceno medio (Unidades Inferior e Intermedia) en el área de Paracuellos de Jarama, próxima a Madrid, quedando representada en este área una transición completa entre depósitos de facies medias de abanicos aluviales y depósitos de ámbitos palustres. Estas conclusiones se extraen a partir del análisis sedimentológico realizado en cada una de las unidades previamente definidas: a) Unidad de arcillas verdes y carbonatos y Unidad de arcillas pardas, arcosas y carbonatos en el Conjunto Inferior; b) Unidad de arcosas gruesas en el Conjunto Superior. Para el Conjunto Inferior se concluye unas relaciones de facies correspondientes a la progradación paulatina de depósitos propios de abanicos aluviales sobre depósitos palustres. Así mismo, el Conjunto Superior representa una progradación brusca de los sistemas de abanicos aluviales, consuperposición de facies intermedias de estos abanicos sobre las facies más distales, que caracterizan el Conjunto Inferior. Dentro del contexto estratigráfico general de la Cuenca de Madrid, estas Unidades se incluyen básicamente en la Unidad Intermedia del Mioceno.

La presencia de niveles de calcreta, sepiolita y sílex en la parte más meridional de la sección es un hecho destacable en las partes más distales de los sistemas de abanicos aluviales y su transición a las facies palustres. La gran abundancia de estos niveles en la zona, nos ha llevado a estudiar más específicamente los rasgos petrológicos de estos tipos de materiales, no siempre bien definidos en depósitos de ambiente continental.

Palabras clave: *Sedimentación continental, abanicos aluviales, medios palustres, calcretas, sepiolita, sílex, Mioceno, Cuenca de Madrid.*

ABSTRACT

Lateral and vertical variations of middle Miocene lithofacies (Lower and Intermediate Units of the Miocene of the Madrid Basin) have been analyzed in the Paracuellos de Jarama area, near Madrid. A complete transition from medial to distal alluvial fan facies and palustrine/shallow lacustrine deposits can be observed. This sedimentary evolution is inferred from the detailed sedimentological analysis carried out in each of the previously defined lithostratigraphic units: a₁) Green shale and dolomite Unit, a₂) Brown clays, arkosic and carbonate Unit; these two units are linked together into a Lower Group. b) Coarse Arkosic Unit (Upper Group). Facies relationships within the Lower Group show a lateral change pattern between alluvial fan deposits, and palustrine deposits. Also, the former ones gradually prograde over the palustrine deposits, as deduced from vertical evolution in the southernmost parts of the area. Upper Group represents a sudden progradation of the alluvial fan systems, that extensively overlie the distal facies observed in the Lower Group.

Wide development of calcretes, sepiolite deposits, and nodular chert is an outstanding feature in the most distal parts of the alluvial fan bodies. They are studied in some detail provided the scarcity of well described examples of facies relationships in the kinds of deposits.

Key words: *Continental sedimentation, alluvial fans, palustrine environments, calcretes, sepiolite, chert, Miocene, Madrid Basin.*

* Instituto de Geología Económica del C.S.I.C. Facultad de C. Geológicas, Univ. Complutense. 28040-Madrid.

** Dpto. de Petrología y Geoquímica. Facultad de C. Geológicas, Univ. Complutense. 28040-Madrid.

Introducción

La zona de Paracuellos de Jarama (fig. 1), está constituida por materiales que, litoestratigráficamente, corresponden a las unidades Inferior e Intermedia del Mioceno de la Cuenca de Madrid, terminología utilizada de acuerdo con la propuesta por Alberdi *et al.* (1983) y Junco y Calvo (1984), entre otros. La importancia de este área para el estudio del Mioceno de la Cuenca de Madrid queda resaltada de los depósitos detríticos marginales, de naturaleza predominantemente arcósica, hacia facies progresivamente más centrales correspondientes a dominios palustres y lacustres someros. Esta gradación de dominios sedimentarios es generalizable tanto a la Unidad Inferior como a la Unidad Intermedia del Mioceno. Estas variaciones de facies en el área de Paracuellos fueron ya puestas de manifiesto por Royo Gómez en 1929, quien destacó el aumento de los niveles arenosos hacia el norte (fig. 2) y la consiguiente disminución de los niveles químicos en este mismo sentido.

La edad de los depósitos miocenos de Paracuellos se atribuye en conjunto al Aragoniense medio y supe-

rior en base a las faunas correspondientes a diversos yacimientos de vertebrados presentes en este área. Dichos yacimientos fueron inicialmente señalados por Riba (1957) y estudiados posteriormente por Crusafont y Golpe (1971). Más recientemente estos yacimientos han sido de nuevo estudiados por Alberdi *et al.* (1983, 1985) quienes atribuyen las faunas encontradas en los yacimientos Paracuellos 3 y 5 al Aragoniense superior. La edad Aragoniense medio atribuida a los niveles inferiores de la sección de Paracuellos resulta de la correlación de estos niveles con niveles en posición estratigráfica similar en el área de Madrid (Calvo *et al.*, 1984).

Aparte de diversos estudios de índole geomorfológica e hidrogeológicos (López Vera, 1977; López Vera y Pedraza, 1976) realizados en esta área, merecen mención por su conexión con la temática abordada en este trabajo los de Bustillo (1976), sobre la petrología de los niveles silicificados y Domínguez (1985), sobre las asociaciones de minerales de la arcilla. No existen, sin embargo, referencias específicas sobre los niveles de calcretas, ampliamente representados en la parte más meridional de la sucesión miocena de Paracuellos. Así mismo, los indicios de mineralizaciones de uranio existentes en la sección fueron estudiados por Arribas (1963).

El presente trabajo aborda, en primer lugar, el establecimiento de la litoestratigrafía de los depósitos miocenos de la sección de Paracuellos de Jarama. Sobre esta base se ha efectuado el análisis sedimentológico y petrológico de cada una de las unidades definidas, exponiéndose en detalle las relaciones y evolución de los distintos conjuntos de litofacies. Las pautas de evolución sedimentológica observada son, dada la posición paleogeográfica del área de Paracuellos, generalizables al relleno sedimentario durante el Mioceno inferior y medio del sector NW de la Cuenca de Madrid.

La metodología empleada en este trabajo ha consistido en la determinación de las texturas de las muestras compactas (carbonatos, sílex y/o arcillas) que se llevó a cabo mediante microscopía óptica sobre secciones delgadas teñidas. La definición textural de las rocas terrígenas (arenas y arcillas) se realizó en base a un amplio número de granulometrías obtenidas mediante tamizado en seco y decantación. La mineralogía de estos materiales se ha determinado mediante difracción de Rayos X, en una primera etapa sobre polvo total, complementándose posteriormente la identificación de los minerales de la arcilla mediante agregados orientados. El tratamiento con etilén-glicol durante 12 horas a 60°C, de estos agregados permite una neta distinción entre la sepiolita y otros minerales. La diferenciación entre caolinita y clorita se llevó a cabo calentando unos nuevos agregados orientados a 550°C durante 2 horas. Todos estos difractogramas se rodaron a una velocidad de 2 grados por minuto, a

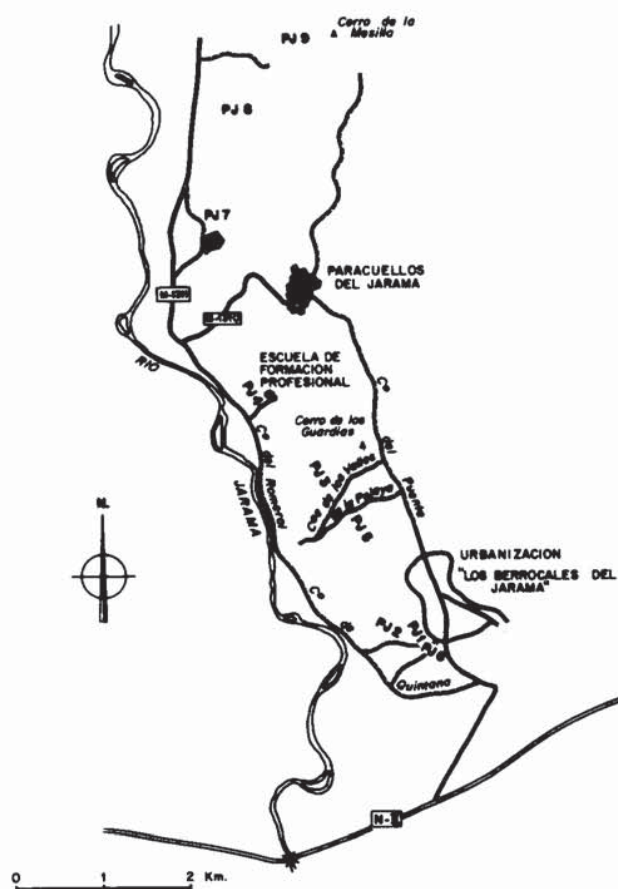


Fig. 1.—Situación geográfica de la zona estudiada.

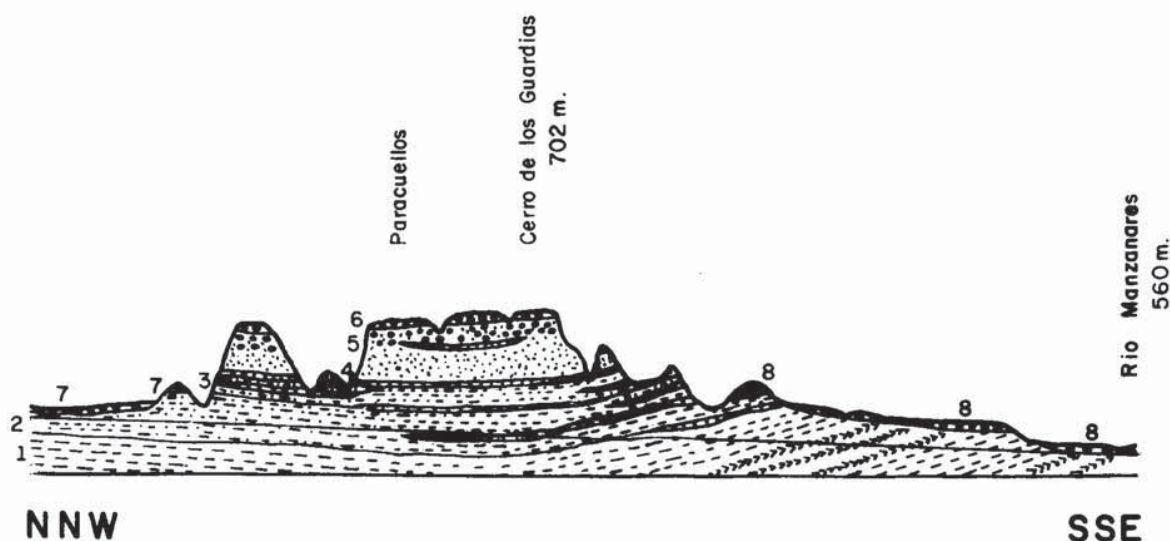


Fig. 2.—Corte de los Altos de Paracuellos según Royo Gómez (1929).

excepción de los realizados para el estudio de la reflexión (060) de las esmectitas (Despraires, 1983), que permite determinar el carácter dioctaédrico o trioctaédrico de las mismas. Para esta determinación los difractogramas se rodaron a una velocidad de 0,5/minuto. La presencia de analcima en algunos niveles, detectada por difracción de Rayos X, se aseguró mediante microscopía electrónica de barrido (S.E.M.).

Litoestratigrafía

El reconocimiento de los depósitos miocenos de Paracuellos se ha complementado con el levantamiento de un total de nueve columnas estratigráficas, cuya situación viene indicada en la figura 1.

A continuación se describen sucintamente los términos litológicos principales que constituyen estas columnas. De sur a norte son las siguientes (fig. 3):

— Columna de los Berrocales sur (PJ-6) ($x=3^{\circ} 30' 53'' 40$; $y=40^{\circ} 28' 13'' 55$). Presenta una zona inferior constituida esencialmente por una alternancia de arcillas verdes y niveles margodolomíticos nodulosos, y una parte superior constituida por niveles fuertemente silicificados entre los que se intercalan niveles de arcillas sepiolíticas.

— Columna de los Berrocales norte (PJ-1) ($x=3^{\circ} 30' 56'' 24$; $y=40^{\circ} 28' 13'' 55$). La sucesión es algo más potente y compleja, con un conjunto basal en el que en su parte inferior dominan los términos de arcillas verdes y carbonatos margodolomíticos; la aparición de un nivel de arenas verdes micáceas, en el que se encuentra el yacimiento Paracuellos-VI, antecede la presencia de arcillas algo sepiolíticas y niveles de cal-

cretas a techo de este conjunto basal. La parte superior de la columna está constituida por arcillas pardas algo carbonatadas y niveles de calcretas. Se reconocen en esta parte superior algunos niveles canalizados rellenos por arenas y cantos blandos.

— Columna de Quintana (PJ-2) ($x=3^{\circ} 31' 54'' 09$; $y=40^{\circ} 28' 19'' 20$). Presenta en la parte inferior una potente sucesión de arcillas verdes con niveles finos de carbonatos intercalados. La parte alta está constituida por niveles fuertemente silicificados y arcillas sepiolíticas. Dada su proximidad a la columna PJ-1 muchos de estos términos pueden ser seguidos nivel a nivel entre ambas columnas, comprobándose sus relaciones evolutivas laterales.

— Columna del Arroyo de la Pelaya (PJ-5) ($x=3^{\circ} 31' 10'' 06$; $y=40^{\circ} 28' 50'' 31$). Está constituida, a excepción de la base, en la que se observan algunos niveles carbonáticos y arcillas de tonos pardos, por una potente sucesión arcósica muy homogénea. En la base de esta columna se sitúa el yacimiento Paracuellos IV.

— Columna del Cerro de los Guardias (PJ-3) ($x=3^{\circ} 31' 46'' 20$; $y=40^{\circ} 28' 50'' 31$). En esta columna se puede estudiar la sucesión más completa de todo el área de Paracuellos, con un espesor total de 112 metros. Se distinguen a grandes rasgos tres zonas mayores. La zona basal se caracteriza por una alternancia de arcillas verdes y carbonatos nodulosos margo-dolomíticos. La zona intermedia es la más compleja ya que hacia la base los niveles de carbonatos son dolomías, mientras que a techo son exclusivamente calizas; este cambio coincide con la aparición de los primeros niveles arcósicos finos. Las arcillas son la litología dominante en esta zona y presentan tonos pardos característicos. La zona superior de la

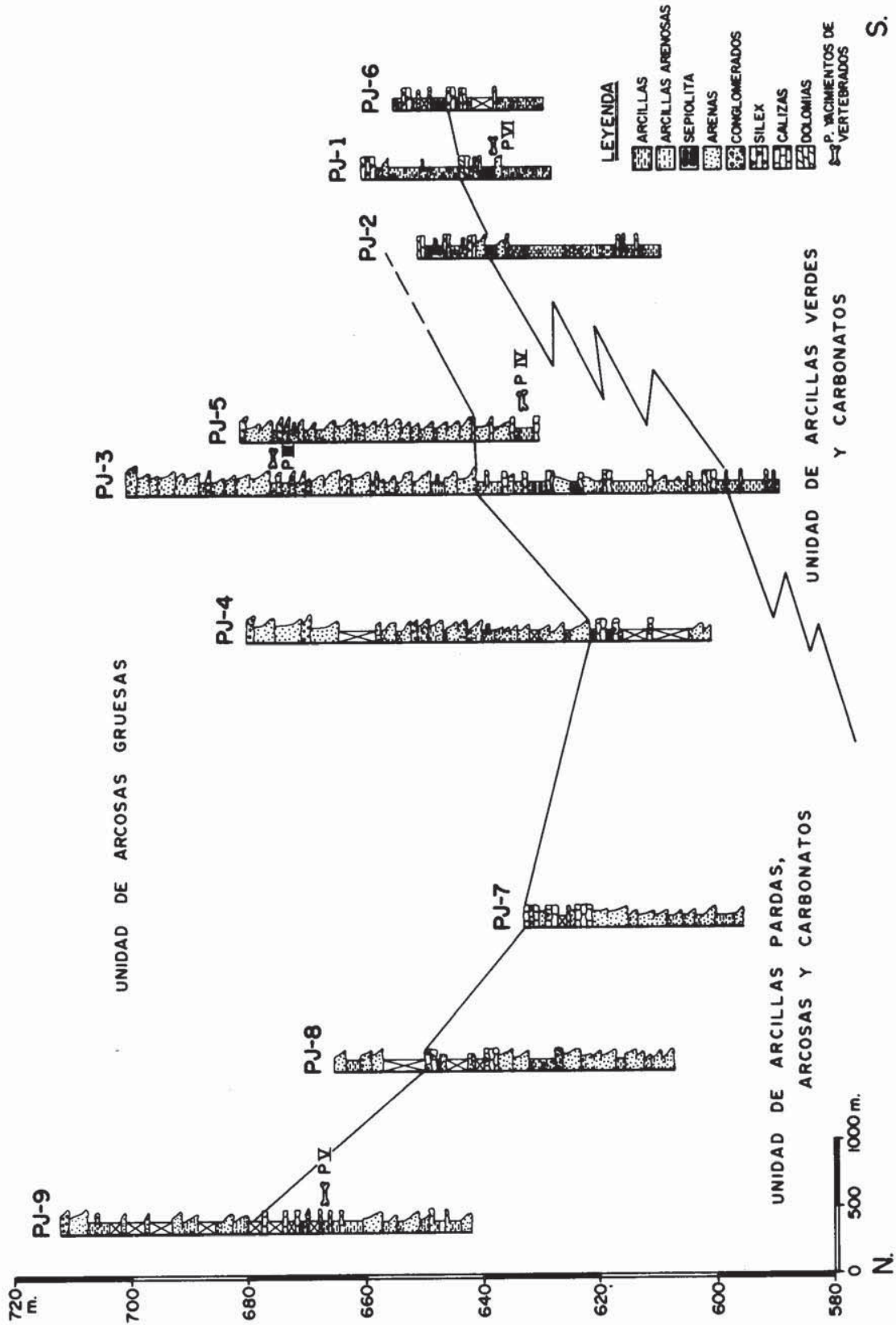


Fig. 3.—Gráfico de correlación de las columnas estudiadas.

columna se sitúa en contacto erosivo sobre carbonatos de la zona infrayacente y está constituida por una sucesión muy monótona de arcosas gruesas y arcillas intercaladas. En esta zona superior se encuentra el yacimiento de vertebrados Paracuellos III.

— Columna de la Escuela de Formación Profesional (PJ-4) ($x=3^{\circ} 32' 08'' 23$; $y=40^{\circ} 29' 35'' 05$). Se observan dos conjuntos: uno inferior constituido por pasadas de arcosas finas y niveles tabulares de carbonatos, estando su techo bien marcado por un nivel potente (1,85 m.) de carbonatos con estructuración horizontal irregular y que incluye láminas de sepiolita. Por encima se dispone en contacto erosivo y neto una monótona sucesión arcósica. Aparte de estos datos de superficie existe un registro de 250 m. de sondeo, realizado por E.N.U.S.A. en 1983, en el que se presenta como litología dominante arcillas verdes con niveles de costra, haciéndose hacia la base del sondeo más frecuentes las intercalaciones de yeso.

— Columna del Cerro de San Miguel (PJ-7) ($x=3^{\circ} 32' 13'' 10$; $y=40^{\circ} 30' 47'' 25$). Está constituida por una sucesión muy monótona de arcosas que culmina con un nivel tabular de carbonatos.

— Columna de Peña del Cuervo (PJ-8) ($x=3^{\circ} 32' 08'' 59$; $y=40^{\circ} 30' 47'' 25$). Presenta características muy similares a la columna anterior, con representación del nivel carbonático tabular antes descrito, quedando bien definidos algunos niveles arcósicos supra-yacentes.

— Columna del Cerro de la Mesilla (PJ-9) ($x=3^{\circ} 31' 51'' 56$; $y=40^{\circ} 31' 51'' 05$). Corresponde a las más septentrional de las columnas realizadas. Se distinguen esencialmente dos zonas: una zona basal constituida por arcosas medias y finas, y niveles carbonáticos nodulares. Por encima se observa, al igual que en otras columnas, una potente sucesión arcósica. En esta columna se sitúa el yacimiento de vertebrados denominado Paracuellos V.

Del estudio conjunto de todas las columnas realizadas resaltan dos rasgos litoestratigráficos cuya presencia es generalizable a lo largo de todo el área estudiada. Por una parte, la entrada, con carácter neto y erosivo de niveles arcósicos gruesos y en sucesiones homogéneas que forman la parte superior de las columnas estudiadas (PJ-5, PJ-3, PJ-4, PJ-8 y PJ-9). Por otra parte, la presencia de un nivel carbonático muy continuo, que culmina en todos los casos la mitad inferior de las sucesiones.

Ambos hechos son consecutivos y marcan la diferenciación de los depósitos miocenos de Paracuellos en dos grandes conjuntos: un Conjunto Inferior, cuyo límite a techo es muy neto y se sitúa por encima del citado nivel de carbonatos, y un Conjunto Superior esencialmente arcósico. Dicho límite define una ruptura sedimentaria de orden menor dentro de la Unidad Intermedia del Mioceno, que en facies más cen-

trales de la Cuenca ha sido señalada por Megías *et al.*, (1983).

Otro hecho destacable dentro del Conjunto Inferior es la desaparición de los niveles de arcillas verdes con carbonatos intercalados hacia el norte, observándose su paso a términos arcillosos de color pardo que presentan intercalados frecuentes niveles de calcretas, sepiolita y sílex. Esta diferenciación de litofacies nos ha permitido definir dos unidades litoestratigráficas de carácter informal que denominamos Unidad de arcillas verdes y carbonatos y Unidad de arcillas pardas, arcosas y carbonatos, en posición meridional y septentrional, respectivamente, que se relacionan entre sí mediante cambio lateral del facies. Un cuadro sintético de las relaciones litoestratigráficas entre las distintas unidades definidas queda esquematizado en la figura 4.

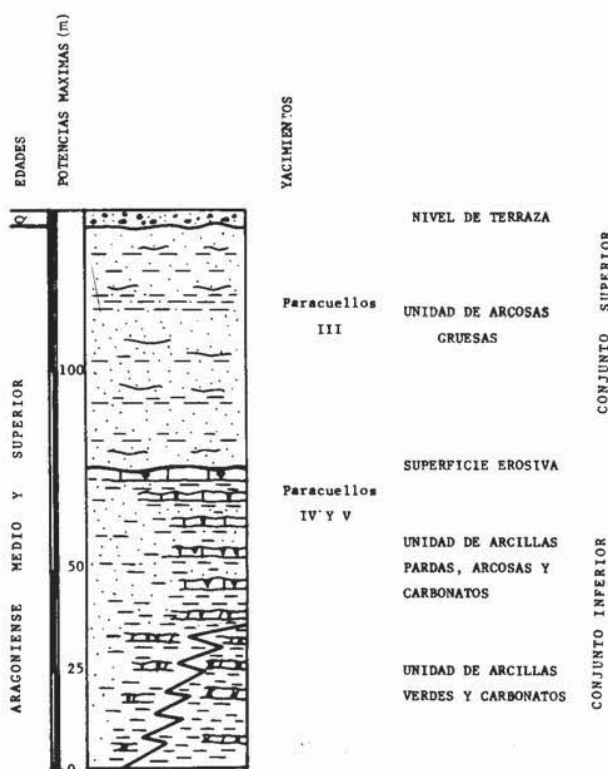


Fig. 4.—Columna litoestratigráfica sintética del área de Paracuellos.

La disposición plegada que muestran las líneas de correlación entre las diferentes columnas (fig. 3), es debida a la suave estructura sinclinal que se observa en toda la sección. Dicha estructura queda bastante exagerada en el gráfico debido a las escalas vertical y horizontal utilizadas para su diseño.

Unidad de arcillas verdes y carbonatos

Está constituida por una alternancia de arcillas de tonos verdes, localmente rosados, y niveles margodolomíticos, generalmente de aspecto noduloso. Se reconocen así mismo algunos niveles de arenas micáceas de espesor métrico. El espesor máximo visible de esta Unidad es de unos 35 m. en el área de los Berrocales (fig. 4) y disminuye netamente hacia el norte en virtud del cambio lateral de facies antes descrito.

El techo de esta Unidad queda marcado por un cambio de color desde los tonos verdosos característicos de esta Unidad a los tonos pardos y ocres propios de la Unidad de arcillas pardas, arcosas y carbonatos. El aspecto general de esta Unidad se observa en la figura 5.

Unidad de arcillas pardas, arcosas y carbonatos

Los materiales que constituyen esta Unidad son esencialmente niveles arcillosos a los que se superponen niveles de encostramiento carbonatado, en ocasiones silicificados. La parte basal de la Unidad presenta un marcado carácter transicional con la Unidad anterior ya que los bancos carbonáticos en esta zona dolomíticos, a diferencia de los del techo, de carácter netamente calcítico. Hay que destacar la presencia de algunas pasadas arcóscicas finas, así como de niveles muy ricos en sepiolita, asociados a los niveles de encostramiento.

Hacia el norte de la sección de Paracuellos los niveles calcáreos desaparecen progresivamente, aumen-

tando la proporción y espesor de los niveles arcóscicos. El aspecto de campo de esta Unidad queda reflejado en la figura 6.

El espesor medio observado de esta Unidad es de 40 m., estando marcado el techo de la misma por un nivel de carbonatos muy continuo lateralmente (fig. 7). Hacia la parte alta de esta Unidad se encuentran los yacimientos de vertebrados denominados Paracuellos IV y V (ver fig. 4).

Unidad de arcosas gruesas

Esta Unidad constituye la totalidad del Conjunto superior, siendo su litología más característica niveles de arcosas muy gruesas con algunas pasadas de arcillas (fig. 8).

Tal como se ha definido anteriormente, la base de este Conjunto es muy neta, estando marcada por la entrada erosiva de niveles arcóscicos de granulometría gruesa. El espesor máximo de la Unidad, medido a la columna del Cerro de los Guardias, es de unos 60 m. Hacia la parte alta de esta Unidad se encuentra el yacimiento de vertebrados Paracuellos III (fig. 4), que permite datar la Unidad, en conjunto, como Aragoniense superior, dada la similar datación obtenida en los yacimientos Paracuellos IV y V, situados por debajo de la base de la Unidad.

La cartografía a escala 1/25.000 (fig. 9) de todo el área estudiada ofrece una visión de la representatividad de cada Unidad en la sección, así como de las relaciones entre las unidades definidas.



Fig. 5.—Aspecto de campo de la Unidad de arcillas verdes y carbonatos. Proximidades de los Berrocales.



Fig. 6.—Aspectos de campo de la Unidad de arcillas pardas, arcosas y carbonatos en las proximidades del camino de la Pelaya.

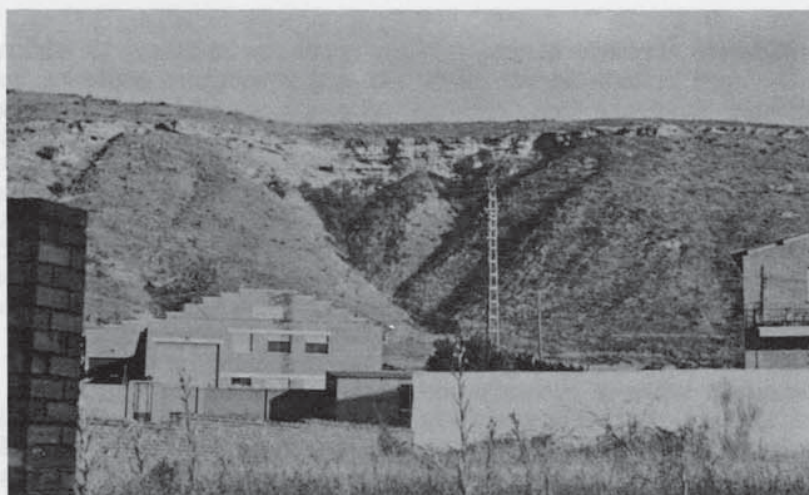


Fig. 7.—Nivel carbonático de techo del Conjunto Inferior. Proximidades del Cerro de San Miguel.

Análisis sedimentológico

El análisis sedimentológico realizado en los depósitos miocenos de Paracuellos se ha basado en la definición de facies y sus asociaciones características en cada Unidad. De igual forma, la ordenación vertical de las facies nos define secuencias elementales que varían lateral y verticalmente.

Se describen a continuación las asociaciones de facies observadas en cada Unidad y su ordenación secuencial, llevándose a cabo su interpretación en

términos del ambiente deposicional que dichas facies representan.

Unidad de arcillas verdes y carbonatos

En esta Unidad se distinguen dos asociaciones de facies, la primera constituida por: arcillas verdes y/o rosadas, y carbonatos margodolomíticos con estructura nodulosa. En la segunda asociación, además de estas facies, se presentan niveles de arenas verdes micáceas.



Fig. 8.—Aspecto de campo de la Unidad de arcosas gruesas. Columna de la Escuela de Formación Profesional.

Arcillas verdes.—Presentan estructura masiva, aunque localmente pueden estar bioturbadas por raíces, observándose en ocasiones rizotúbulos bien definidos. Es común en estas arcillas la presencia de moteados de tonos rosados particularmente a techo de los niveles y son frecuentes en ellas carbonataciones dispersas de carácter dolomítico. Composicionalmente, estas facies de arcillas verdes presentan un predominio de esmectitas (60-65%), presentándose la illita con carácter subordinado (35-40%). Se distinguen así mismo, en el difractograma de polvo total indicios de dolomita y de minerales detríticos (cuarzo, feldespato potásico y plagioclasas). En índice de evolución granulométrica (Riviere, 1977) calculado para estas facies presenta valores próximos a 0,1.

Arcillas rosadas.—Aparecen estrechamente asociadas a las facies de arcillas verdes. Presentan bioturbación, con frecuentes rizotúbulos bien definidos. Su composición es fundamentalmente filosilicatada (90%), poniéndose de manifiesto un aumento claro de la carbonatación (dolomita) a techo de los niveles. Se reconocen en ellas cuarzo y plagioclasa en proporciones muy bajas. Dentro de los filosilicatos son dominantes las esmectitas (60-70%), presentando la illita un carácter subordinado. En la zona en que se produce el cambio de coloración de tonos verdes a rosados el análisis mediante difracción de Rayos X pone en evidencia la presencia de indicios de sepiolita. El índice de evolución granulométrica de estas facies es de 0,6.

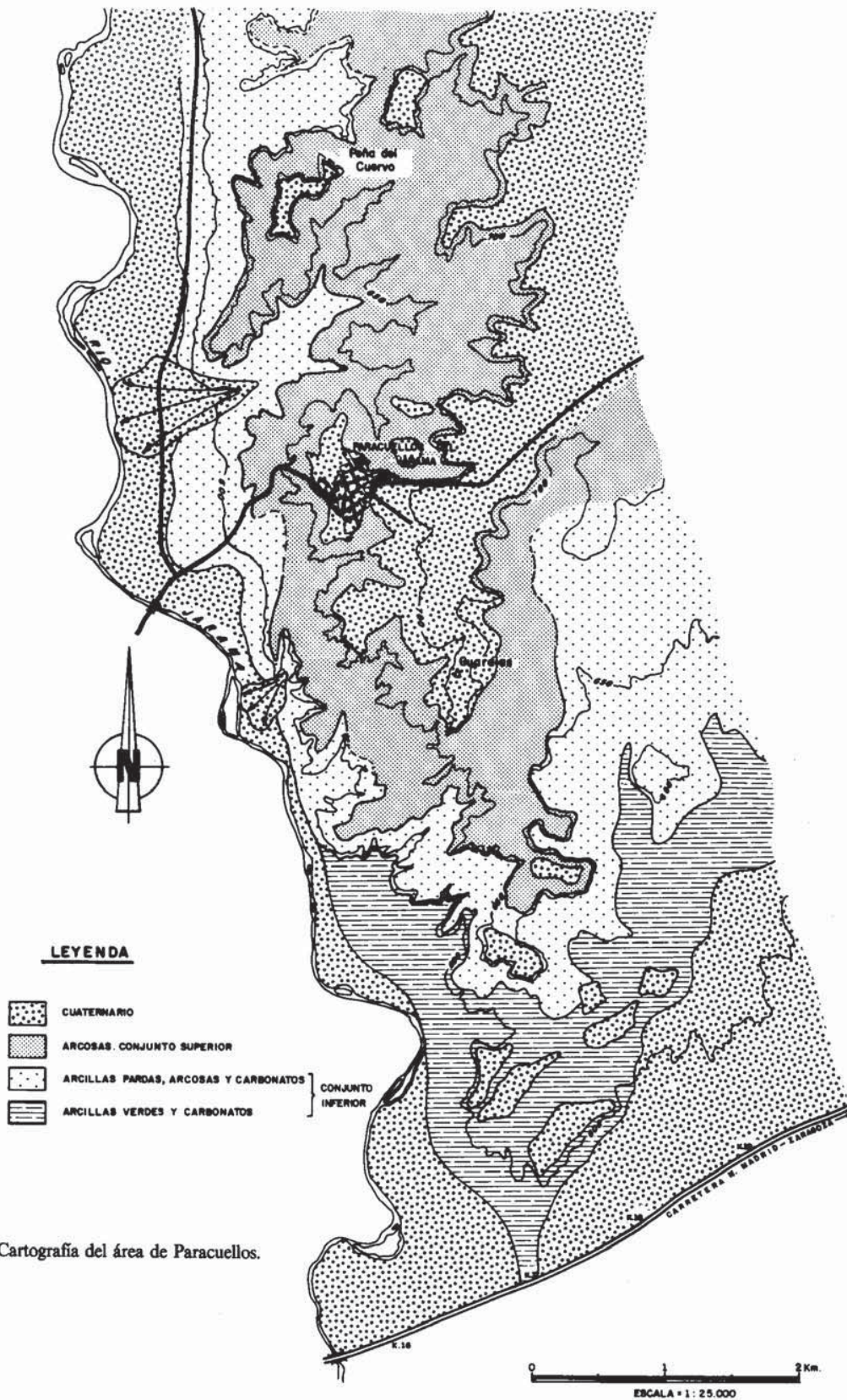
Carbonatos.—Se presentan en bancos con morfología groseramente tabular, aunque en detalle sus bases

y techos son irregulares. La estructura interna de estos bancos es nodular o poliédrica, aunque localmente es apreciable una estructuración prismática neta. En detalle presentan indicios de bioturbación y rizotúbulos.

Los carbonatos son esencialmente dolomíticos, con residuos insolubles muy elevados (30-45%), que corresponden a arcillas de tipo illita y esmectita. Su composición en óxidos es de un 15-20% para CaO y 10-15% para MgO. Petrográficamente, estos carbonatos se pueden definir como margas dolomíticas nodulizadas con textura de dolomicrita. Dentro de esta textura aparecen diferenciadas masas de filosilicatos con grietas de desecación (lámina I. fig. 1), ocasionalmente se observan estriotúbulos (Brewer, 1964).

Arenas verdes micáceas.—Esta facies se presenta en bancos métricos tabulares, con base localmente erosiva y granoselección más bien difusa. Caracteriza exclusivamente la segunda asociación de facies presente en los términos superiores de la Unidad de arcillas verdes y carbonatos. Las arenas son de tamaño fino a medio, su distribución granulométrica característica está constituida por tres poblaciones lognormales (fig. 11). El contenido en arcilla oscila entre el 15 y 50%, siendo fundamentalmente esmectitas.

La composición mineralógica de estos niveles arenosos muestra un alto contenido en cuarzo (50%), feldespato potásico (15-20%) y plagioclasa (5-10%), aunque su carácter más definitorio es la relativamente alta proporción de micas, con predominio de biotita sobre moscovita y clorita. Los minerales pesados más frecuentes, además de las micas son: granates, turmalina, circón y epidota, aunque es de señalar el muy



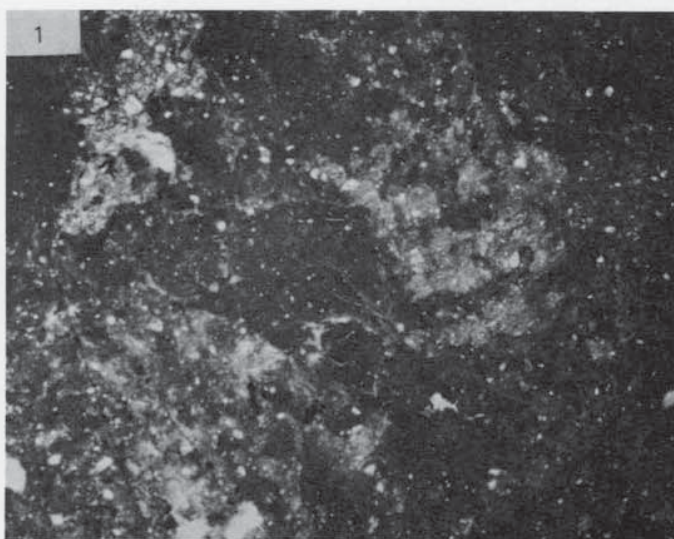


Fig. 1.—Microfacies de dolomicritas edafizadas con nodulizaciones. N II X27.

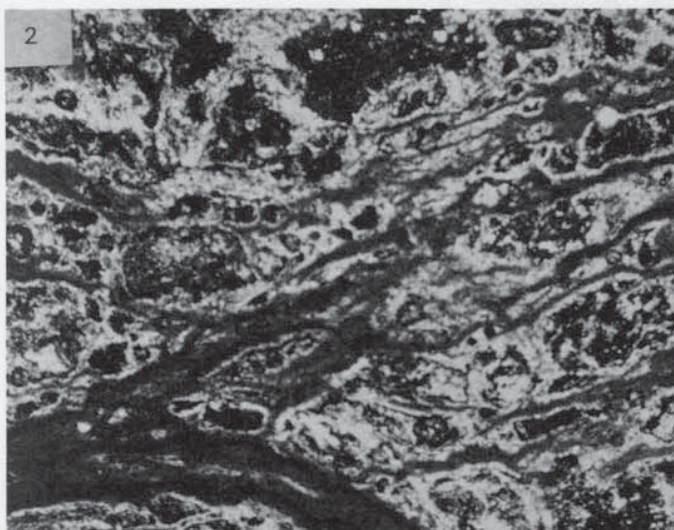


Fig. 2.—Carbonatos con estructura reticulada y frecuentes grumos de arcilla. N II X30.

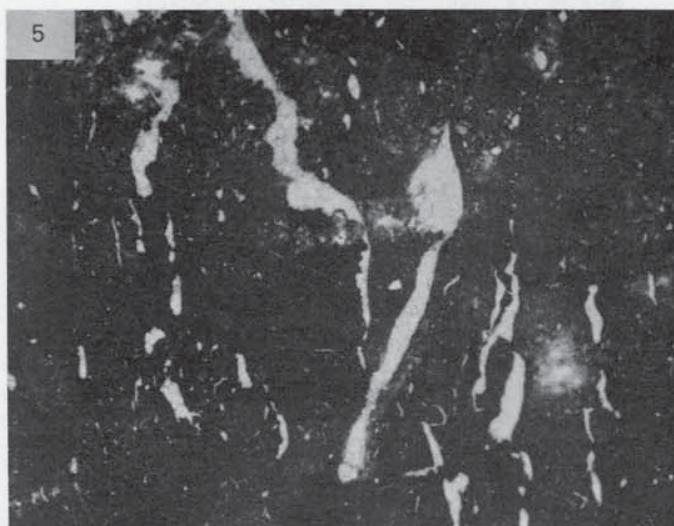


Fig. 3.—Microfacies de calizas arenosas (micríticas). N II X27.

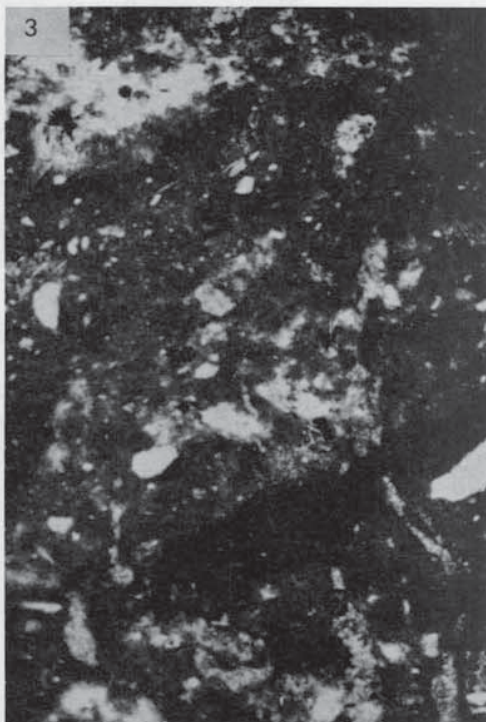


Fig. 4.—Microfacies caracterizadas por presentar envueltas acrecionales de carbonatos («oolíticas»). N II X27.

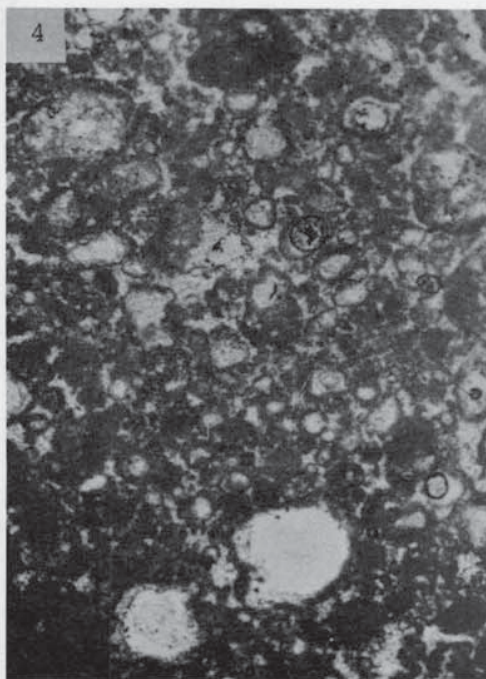


Fig. 5.—Microfacies de calizas micríticas con «bird'-seeds» y «ojos» planares. N II X7.

escaso porcentaje que estos minerales pesados representa en el conjunto arenoso.

Localmente, dentro de estas arenas se han encontrado pequeños restos de micromamíferos correspondientes a *Megacricetodon minor* (E. Herraiz, com. pers., 1985).

A) *Secuencias elementales*

Las asociaciones de facies descritas se ordenan en dos secuencias elementales (fig. 10):

A₁: Secuencia de arcillas verdes, arcillas verdes algo carbonatadas y rosadas a techo y carbonatos margodolomíticos con estructura poliédrica a prismática. El espesor de estas secuencias llega a alcanzar 4 metros.

A₂: Secuencia de arenas micáceas con base erosiva, arcillas verdes y rosadas sepiolíticas con sílex y carbonatos y dolomías con estructura prismática. El espesor de estas secuencias no supera los 3 metros.

Estas secuencias aparecen dentro de la Unidad de arcillas verdes y carbonatos de acuerdo con una pauta bien definida. Así, las secuencias A₁ caracterizan la parte inferior de la Unidad, reconociéndose la superposición al menos de 3 ó 4 de estas secuencias. Por su parte, las secuencias A₂ son características del techo de la Unidad y definen el tránsito hacia la Unidad suprayacente.

B) *Interpretación*

Las citadas secuencias (A₁ y A₂) representan litofacies que corresponden a ámbitos sedimentarios muy próximos, aunque algo diferenciados. Así, las secuencias A₁ se interpretan como el resultado de la sedimentación de depósitos lutíticos en ambiente palustre controlado por oscilaciones del nivel de agua. Las etapas de emersión relativa quedarían representadas por los niveles de arcillas rosadas con rasgos de pseudogley (Duchaufour, 1975), y carbonatos a techo de las secuencias, estos últimos corresponden a paleosuelos de escaso desarrollo en ambiente palustre (Freytet, 1973), quedando definido su carácter pedológico por la estructura poliédrica y rizotúbulos. Son así mismo frecuentes a techo de los perfiles estructuras de desecación. Un tipo de secuencias similar ha sido reconocido en otras zonas de la Cuenca de Madrid, interpretándose como secuencias de progresiva exposición subaérea en áreas de mud-flat (Calvo *et al.*, 1984).

Las secuencias A₂ representan un área más proximal o somero en relación con el ámbito anteriormente definido. Así, las arenas micáceas de base de secuencia corresponden a depósitos de «sheet-floods» como derivado distal de aportes terrígenos más gruesos en áreas de abanico, que alcanzarían los márgenes lacus-

tres. El carácter de «residuo distal» de estas arenas queda confirmado por las distribuciones granulométricas que se obtienen a partir de un mismo nivel (fig. 11). Este hecho ya ha sido puesto de manifiesto en litofacies similares por Lomoschitz *et al.*, (1985). Los términos superiores de la secuencia corresponden a depósitos afectados por exposición subaérea (pseudogley y/o marmorizaciones en las arcillas, estructuración pedológica de los carbonatos, etc.).

La posición relativa de ambos tipos de secuencia dentro de la Unidad de arcillas verdes y carbonatos es indicativa de la paulatina progradación de depósitos distales de abanicos aluviales (representados aquí únicamente por llegadas episódicas de terrígenos algo más gruesos) sobre ámbitos palustres caracterizados por secuencias pedogenéticas controlados por oscilación del nivel de agua. Dicha tendencia progradante queda confirmada por las asociaciones de facies de la Unidad de arcillas pardas, arcosas y carbonatos.

Unidad de arcillas pardas, arcosas y carbonatos

Esta Unidad presenta la siguiente asociación de facies:

Arcillas con sepiolita y sílex.—Presentan estructura nodulosa o grumular, debida en parte a carbonataciones dispersas de carácter dolomítico. La composición mineralógica de esta litofacies presenta una gran complejidad. Dentro de los filosilicatos son dominantes las esmectitas (85-90%), con illita subordinada. La sepiolita en ocasiones alcanza proporciones muy elevadas (55-90%), lo que hace variar netamente los porcentajes antes señalados. Algunos de estos niveles están silicificados. Esta facies es especialmente frecuente en el sur de la sección.

Lutitas arcósicas.—Aparecen representadas, sobre todo, en la zona más meridional del área estudiada. Se caracterizan por presentar tonos pardos y enrojecimientos a techo de los niveles. Son arcillas masivas que presentan granos dispersos, principalmente de cuarzo y feldespatos. La composición mineralógica de la fracción arcillosa corresponde mayoritariamente a esmectitas de carácter dioctaédrico (75%) e illita (25%), detectándose en ocasiones indicios de caolinita. El índice de evolución granulométrica calculado para estas facies es de N=1,3, lo que nos permite caracterizarlas como ultraparabólicas (Riviere, 1977).

Arcosas.—La frecuencia de aparición de esta facies aumenta progresivamente desde las proximidades del Cerro de los Guardias hacia las zonas más septentrionales (Columnas del Cerro de San Miguel y de Peña del Cuervo). Se presentan en bancos métricos, generalmente masivos, con base y techo de geometría planar algo irregular en detalle.

Facies canalizadas de cantos blandos.—Este tipo de depósito se ha reconocido exclusivamente a techo de la

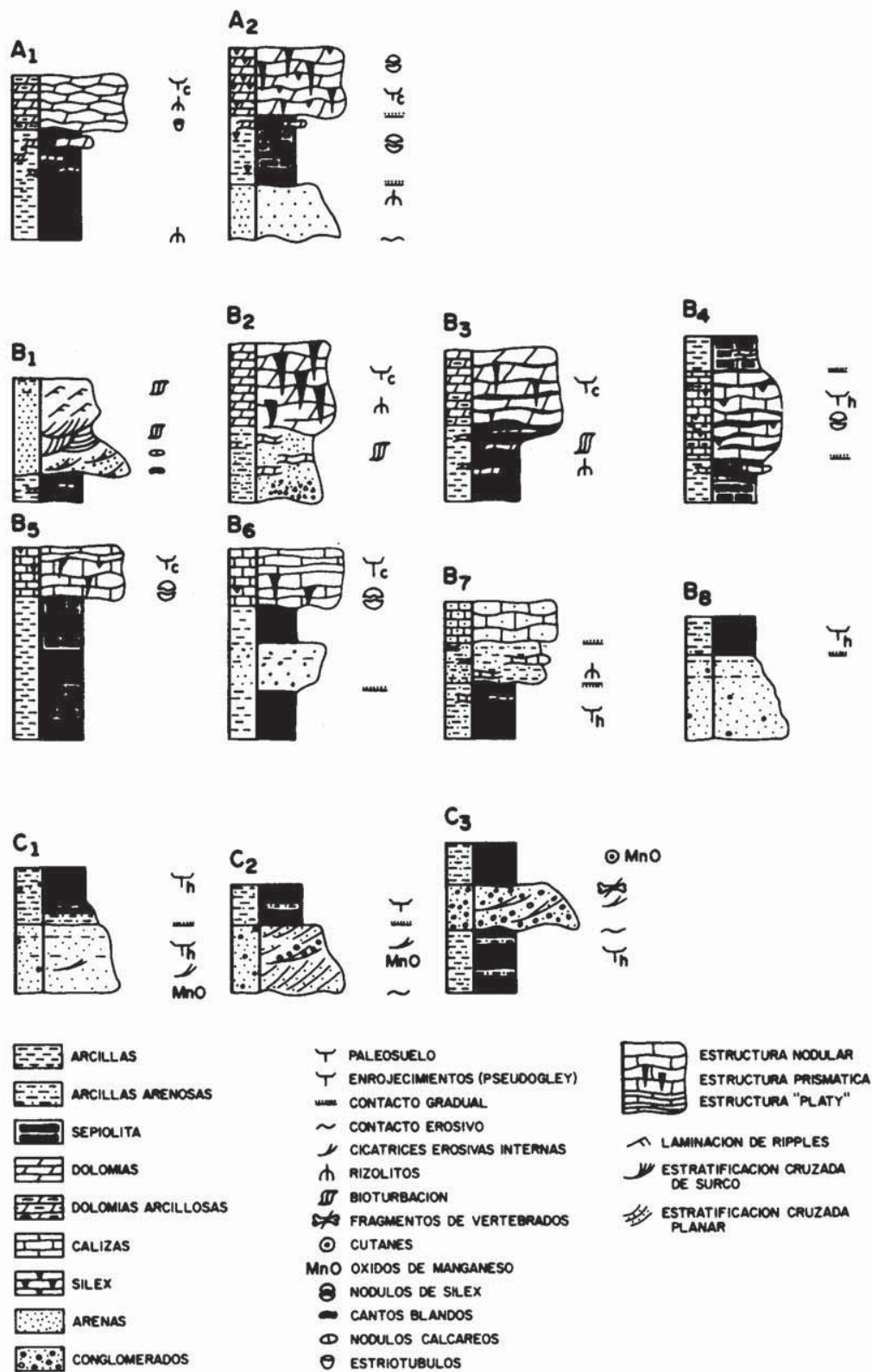


Fig. 10.—Secuencias elementales presentes en las distintas unidades.

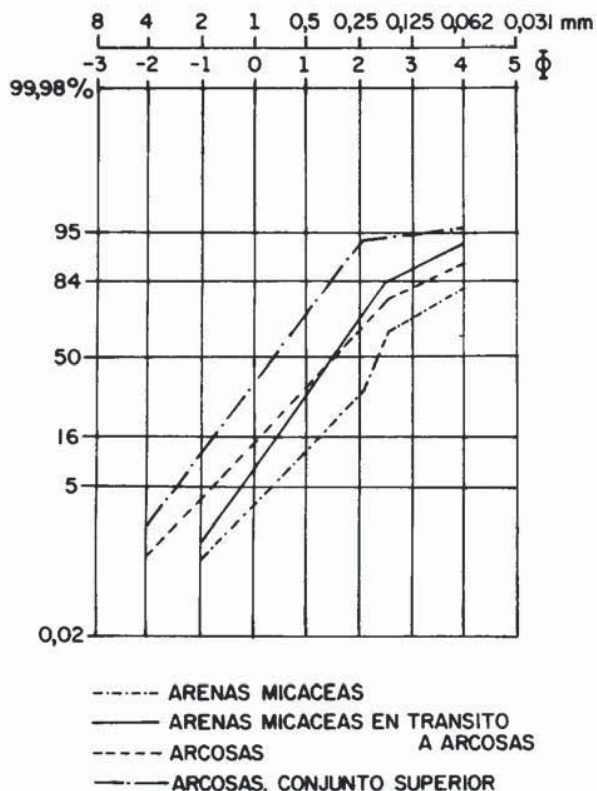


Fig. 11.—Distribuciones granulométricas de muestras de arenas verdes, arcosas y arenas verdes en tránsito lateral a arcosas.

columna PJ-1, aunque otros depósitos de acumulaciones de cantos blandos con geometría canalizada menos neta han sido observados en otros puntos de la sección de Paracuellos de Jarama. Consisten en cuerpos canalizados de espesor métrico con base erosiva, lateralmente discontinuos. Dentro de estos cuerpos se distingue una clara secuencialidad de las estructuras tractivas, con estratificación cruzada de surco en la base que evoluciona en la vertical a laminación de ripples; el techo aparece profusamente bioturbado por gusanos. La fracción más gruesa de estas arenas corresponde a cantos blandos y nódulos calcáreos retrabajados a partir de las facies adyacentes. Los niveles más finos son predominantemente cuarcíferos.

Dolomías.—Se presentan en bancos de espesor métrico, poco compactos, con estructura nodular, en ocasiones más netamente prismática. Localmente se observan rizotúbulos. La composición en óxidos de calcio (15%) y magnesio (10%) confirma el carácter dolomítico de esta facies. Texturalmente corresponden a dolomicritas con estructura en enrejado.

Calizas.—Aparecen en bancos bastantes continuos de espesor superior al metro. Su morfología es de niveles de calcreta, pudiendo presentar estructura prismática, nodular o «platy» (Esteban y Klappa, 1983). El con-

tenido en óxidos de Magnesio (1-3%) y de Calcio (40-45%) de estos carbonatos permite concluir una marcada diferencia respecto a las facies de dolomías antes descritas. Texturalmente los niveles de calizas presentan una gran variedad de microfacies. La descripción de estas microfacies se realiza en un apartado posterior.

A) Secuencias elementales

En esta Unidad se han descrito un total de 8 secuencias elementales (fig. 10):

Las secuencias B₁, *Canales con cantos blandos*, se han observado exclusivamente en la zona más meridional, donde aparecen de forma muy localizada en alguna de las sucesiones estudiadas. El espesor de estas secuencias es de aproximadamente 1 metro.

Las secuencias B₂, *Arcillas verdes, arcillas rosadas y carbonatos*, B₃, *Arcillas y dolomías con estructura prismática*, B₅, *Calcretas con arcillas sepiolíticas*, B₆, *Fangos arcócosos, arcosas finas y calcretas* y B₇, *Arcillas, arenas carbonatadas y calizas arenosas*, corresponden a perfiles de carbonatación progresiva como resultado de procesos edáficos. Las secuencias en que el encostramiento es de carácter dolomítico aparecen representadas en la zona central y meridional de la sección, esencialmente en la base de esta Unidad. Por el contrario, las secuencias en las que los encostramientos son calizos se observan en su parte alta. El espesor medio de las secuencias oscila entre 2 y 4 metros.

La secuencia B₄, *Arcillas sepiolíticas y carbonatos con estructura horizontal*, caracteriza el nivel carbonatado del techo del Conjunto Inferior. Su espesor medio es de unos 3 metros.

Por último, la secuencia B₈, *Arcosas y fangos arcócosos*, aparece más ampliamente representada en la zona septentrional de la sección de Paracuellos. Su espesor varía entre 3 y 5 metros.

B) Interpretación

La interpretación sedimentológica de la Unidad de arcillas pardas, arcosas y carbonatos, la cual presenta en cuenta no sólo la posición geográfica y situación relativa de las distintas secuencias, sino también la relación de esta Unidad con la Unidad de arcillas verdes y carbonatos interpretada como depósitos palustres con tendencia a una emersión más definida a techo de la misma. Esta tendencia queda confirmada por las asociaciones de facies de la Unidad de arcillas pardas, arcosas y carbonatos, la cual presenta en la base un carácter transicional marcado por las secuencias B₂ y B₃. Así mismo, el carácter húmedo más permanente de estos depósitos transicionales

queda definido por las abundantes evidencias de bioturbación en las secuencias B₂.

Las secuencias B₅ y B₆ son los perfiles de calcreta más ampliamente representados, siendo, como ya se ha indicado encostramientos de carácter calizo. Estas secuencias caracterizan las facies distales u orla de abanico edafizada (Robles y Ardevol, 1984; Nickel, 1985). La diferencia entre ambas secuencias reside en la presencia o no de arcosas en sus términos inferiores, lo que puede indicar un carácter más o menos distal de su posición en el conjunto del sistema aluvial. Así mismo, la presencia de sepiolita en la secuencia B₅ indica una mayor distalidad e influencia del ámbito lacustre adyacente (Watts, 1980). Las arcosas presentes en la base de algunas de las secuencias descritas constituyen prácticamente los únicos depósitos terrígenos gruesos presentes en las partes distales de los abanicos, marcando su frecuencia una menor distalidad. No obstante, en estas partes distales se reconocen localmente acumulaciones de cantos blandos y arenas (*secuencias de canales*, B₁) con un alto grado de estructuración. Dichas secuencias se interpretan como resultado del relleno de canales por corrientes efímeras (Reeves, 1970), abastecidos por el retrabajado de depósitos finos adyacentes.

Las secuencias B₄ son específicas del nivel carbonático situado a techo del Conjunto Inferior, presentando características muy diferenciadoras respecto a las restantes secuencias de carbonatación progresiva. Esta distinción reside, por una parte, en el carácter muy fino de las arcillas, acumulación de sepiolita; por otra parte, en la estructuración en bandeado generalmente horizontal y con frecuentes relictos de arcillas en los carbonatos; y, por último, en las microfacies de carbonatos (micritas más o menos «oolíticas»). Todos estos rasgos nos permiten interpretar las secuencias B₄ como depósitos correspondientes a largos efímeros («pluvial lake»).

Por último, las secuencias B₇ y B₈ caracterizan la zona más septentrional de la sección. Las secuencias B₇, cuyo desarrollo coincide a grandes rasgos con el período de estabilización antes aludido, se interpretan como zonas de sombra entre abanicos coalescentes. Las secuencias B₈ corresponden a descargas sucesivas de material terrígeno transportado en masa. Estas descargas muestran una escasa capacidad erosiva a lo que puede contribuir la fuerte cohesión de las arcillas arenosas a techo de la secuencia previa y/o incipiente desarrollo de suelos sobre ellas. Esto último reafirma el carácter episódico de la sedimentación de las secuencias arcósicas, presentando los perfiles edáficos un neto carácter hidromorfo (Buurman, 1980).

En conjunto, todas estas secuencias son interpretadas como características de sistemas de abanicos aluviales áridos o semiáridos. La posición relativa de las distintas secuencias y su frecuencia de aparición (fig. 13), sirven para caracterizar las distintas zonas dentro

de estos sistemas según un modelo evolutivo de facies proximales a distales de neta polaridad norte-sur en el área de Paracuellos.

Unidad de arcosas gruesas

Esta Unidad aparece constituida por la siguiente asociación de facies:

Arcosas gruesas.—Se presentan en niveles de espesor comprendido entre 2 y 3 metros que frecuentemente presentan base neta, aunque escasamente erosiva, sobre arcillas arenosas. No suelen observarse estructuras de tracción, siendo en general los cuerpos muy masivos, a excepción de algunas cicatrices erosivas internas y cierta granoselección positiva. De forma local aparecen algunas concentraciones de óxidos de Manganeso. La composición de estas arenas es netamente arcósica con porcentajes de más del 30% de feldespato, 60% de cuarzo y el resto está formado por mica y fragmentos de roca. La asociación de minerales pesados consiste fundamentalmente en turmalina, granate, andalucita y circón. La proporción de arcilla es muy escasa oscilando alrededor del 5%. Esta facies constituye el 75% del Conjunto Superior.

Las distribuciones granulométricas de estas arcosas presentan típicamente dos poblaciones lognormales (fig. 11) con índices de selección muy bajos definibles a partir del diagrama C/M (fig. 12) (Passega, 1964). Tanto en uno como en otro tipo de representación granulométrica se observa una neta diferenciación entre los cuerpos arenosos de las diferentes unidades definibles en la sección de Paracuellos.

Arcillas arenosas.—Se presentan en niveles de espesor variable, aunque usualmente no mayores de 1 metro. Esta facies consiste en mezclas desorganizadas de granos arenosos, en ocasiones gruesos, que se distribuyen dispersa e irregularmente en la matriz arcillosa. Constituyen aproximadamente el 25% del Conjunto Superior.

La tonalidad característica es parda, aunque muy frecuentemente se presentan enrojecidas a techo de los niveles. El índice de evolución granulométrica presenta valores de N=1,3 a 1,7, a excepción del nivel en que se encuentra el yacimiento Paracuellos III en el que N presenta un valor de —0,85.

A) *Secuencias elementales*

Se han observado exclusivamente tres secuencias elementales (fig. 10):

C₁: Secuencia de arcosas gruesas y arcillas arenosas. Estas secuencias son las más características de la Unidad, presentando espesores que en ocasiones se aproximan a 6 metros.

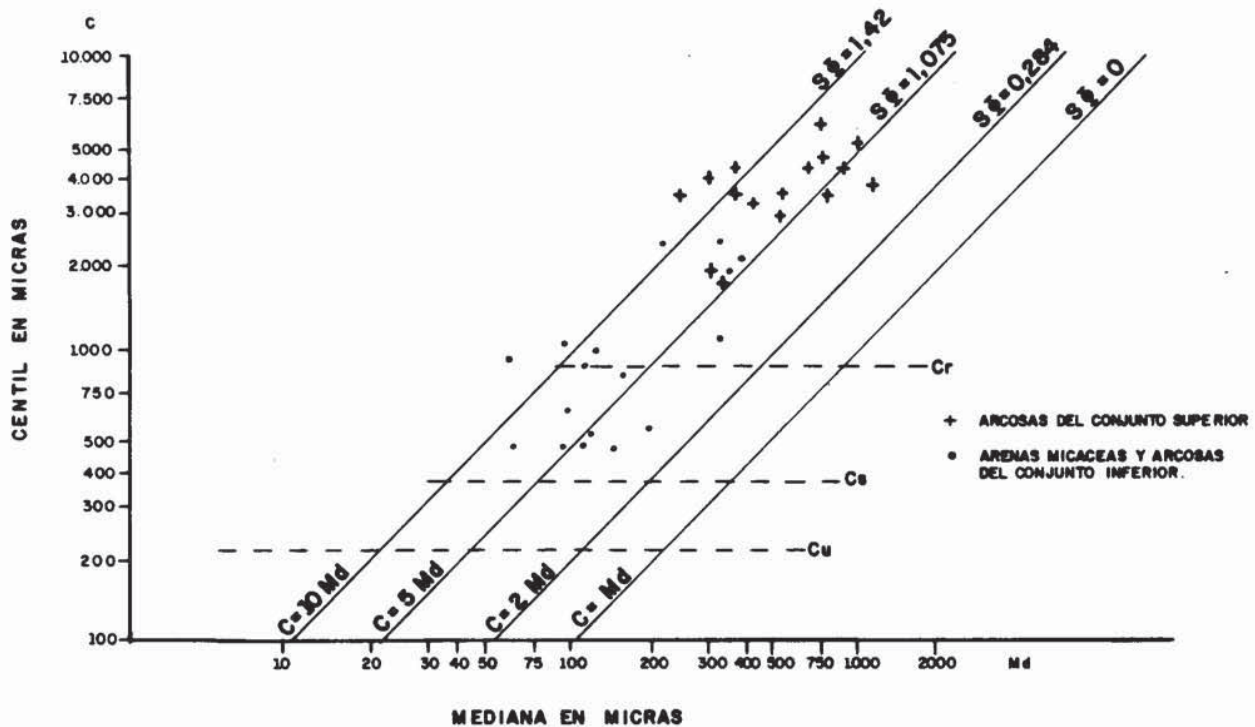


Fig. 12.—Diagrama C/M obtenido a partir de los datos clastométricos de los niveles arenosos estudiados.

C_2 : Secuencia de arcosas muy gruesas y arcillas, se diferencian de las anteriores en la mayor ordenación de los cuerpos arenosos, el espesor de éstas es en general menor que el de las C_1 .

C_3 : Secuencia de arcillas y arcosas conglomeráticas. Su frecuencia de aparición es muy baja en relación con las anteriores. El espesor total de las mismas es de unos 3 metros.

B) Interpretación

Como se ha indicado, las secuencias de tipo C_1 son las más frecuentes dentro del Conjunto Superior. El carácter tabular e internamente masivo de los bancos arcóscicos, su base escasamente erosiva y los lechos de arcillas muy arenosas desorganizadas a techo de las secuencias permiten interpretar estos depósitos como debidos a descargas terrígenas con transporte en masa. La escasa proporción de arcilla en la parte inferior de los bancos arcóscicos y, la presencia de cicatrices internas difusas permiten considerar que el transporte en masa de estos depósitos se realizó mediante mecanismos de transporte algo diferenciados («sand-flow», «grain-flow»,...) (Carter, 1975), aunque este aspecto no ha sido suficientemente desarrollado en el presente estudio.

En las secuencias C_2 la presencia de arcosas algo mejor estructuradas (estratificación cruzada difusa,

lechos de cantos,...) define descargas de terrígenos con menor viscosidad relativa en condiciones de flujo más lento con respecto a las secuencias anteriores.

Por otra parte, las secuencias C_3 , corresponden a descargas episódicas de arcosas de menor entidad. Se presentan en la parte superior de los ciclos mayores de carácter «thinning-upwards», indicando una amortiguación paulatina en las tasas de apilamiento de los abanicos.

En conjunto, la presencia de estos tipos de secuencias se interpreta como definitoria de facies intermedias dentro de un sistema de abanico aluvial de carácter semiárido. El carácter episódico de los depósitos en estas áreas, correspondiente o no a variaciones estacionales, viene netamente marcado por los rasgos en sí de las secuencias, así como por los procesos de edafización incipiente (hidromorfismo) que afectan a las arcillas en gran parte de los términos superiores de las secuencias.

Las distribuciones granulométricas de estas arcosas muestran característicamente dos poblaciones bien definidas (fig. 11); dichas poblaciones definen, a nuestro entender de una forma clara, la dinámica del transporte y depósito de los materiales arcóscicos, reflejando el transporte en masa y depósito desorganizado de gruesos en las sucesivas tongadas, el cual iría acompañado de la decantación rápida de finos. La muy baja selección de ambas poblaciones confirmaría

esta interpretación. Una variación a esta interpretación en lo que se refiere a la población de finos es su posible carácter infiltracional entre los granos gruesos a partir de niveles superiores del depósito.

Modelo paleogeográfico

El análisis sedimentológico realizado permite caracterizar con mayor detalle los conjuntos litoestratigráficos definidos y proponer un esquema de evolución temporal y espacial de la sedimentación durante el Aragoniense medio y superior en este área.

La separación de los dos Conjuntos mayores definidos es neta, quedando marcada por la entrada erosiva de niveles detríticos muy gruesos, en términos relativos, sobre los depósitos del Conjunto Inferior. Dicha entrada generalizada de terrígenos se produce tras un episodio de relativa estabilización de los sistemas deposicionales, correspondientes al Conjunto Inferior, hecho detectable por el desarrollo de niveles carbonáticos lacustres a techo de este Conjunto.

La distribución de las unidades de arcillas pardas, arcosas y carbonatos y de arcillas verdes y carbonatos dentro del Conjunto Inferior refleja una organización N-S de los depósitos en bandas sucesivas de ambientes sedimentarios de abanicos aluviales medios, orla de abanico edafizada y ambiente palustre-lacustre dentro de un modelo centrípeto de relleno cuencal. Esta sucesión de ambientes sedimentarios muestra, por tanto, una polaridad dentro de un modelo proximal-distal de abanicos aluviales (fig. 13). La evolución vertical de las facies, refleja, así mismo, la progradación de los ambientes distales de abanico sobre un ámbito palustre-lacustre.

El Conjunto Superior, constituido por la Unidad de arcosas gruesas, muestra asociaciones de facies que caracterizan las facies medias de abanicos aluviales. La gran homogeneidad que presenta este Conjunto a lo largo de toda la sección no permite una diferenciación de subambientes sedimentarios (fig. 14), quedando, por tanto, algo indefinido con la falta de afloramientos más meridionales (Valle del río Henares).

Así pues, el fuerte aumento en el tamaño de los terrígenos tras un período de estabilización, y el carácter erosivo de esta entrada implica la generación de un nuevo ciclo deposicional de carácter progradante que puede interpretarse como consecuencia de una reactivación tectónica de los bordes de la cuenca durante el Aragoniense superior y/o un cambio hacia climas algo más húmedos en este período. El resultado de la progradación es la superposición de depósitos de facies intermedias de abanicos aluviales sobre depósitos más distales de orla de abanico edafizada en tránsito a ámbitos palustres. Las asociaciones de facies, la presencia de algunas mineralogías características (ver apartado posterior), así como los datos paleoecológicos derivados del estudio de la fauna de

Paracuellos (Alberdi *et al.*, 1983 y 1985) permiten deducir en conjunto unas condiciones climáticas áridas, con períodos de lluvia y sequedad contrastados durante la sedimentación de estos depósitos.

Petrología

En este apartado se describen en detalle y se discuten los aspectos petrogenéticos de diversos tipos de depósitos, ampliamente representados en la Unidad de arcillas pardas, arcosas y carbonatos, así como en la transición entre esta Unidad y la Unidad de arcillas verdes y carbonatos. Destacan en primer lugar los niveles de calcretas, los cuales presentan ciertas peculiaridades en relación con otras acumulaciones pedogenéticas de carbonatos comúnmente descritas. El análisis de los minerales fibrosos de la arcilla se centra esencialmente en la sepiolita, por ser el único fibroso presente. Por último, los niveles de sílex se analizan en base a su asociación, tanto a niveles de calcreta como de arcilla, generalmente sepiolitas.

Las calcretas

El estudio textural de estos niveles se ha realizado mediante el estudio petrográfico de un total de 35 láminas delgadas. Su mineralogía se ha determinado mediante difracción de rayos X sobre las muestras seriadas dentro de los perfiles. La evaluación del contenido en óxidos de calcio y magnesio se realizó mediante análisis complexométrico. Este conjunto de datos mineralógicos y texturales se integra en el reconocimiento a mesoescala de las distintas facies dentro de los perfiles de calcretas.

El desarrollo de calcretas en la sección de Paracuellos tiene lugar generalmente sobre sustratos arcillo-arenosos y más raramente sobre sustratos calcáreos. A lo largo de todos los perfiles observados, estas acumulaciones de carbonatos presentan dos mesofacies características; estructura «platy» u hojaldrada y estructura «glaebular» (Esteban y Klappa, 1983), esta última caracterizada por formas verticales subcilíndricas que no sobrepasan los 2 m. La ordenación vertical de estas mesofacies puede observarse en las secuencias B₅ y B₆ (fig. 10). Aunque en la mayor parte de los casos los perfiles aparecen bien diferenciados, en ocasiones es muy clara la superposición de distintos perfiles de calcreta, pudiendo hablarse en estos casos de neostratificación de origen pedológico como resultado de la interferencia de sucesivas fases pedogenéticas (Freyet y Plaziat, 1982) (fig. 15).

La escasa variedad de facies y estructuras así como la falta de algunas facies indicativas de mayor madurez pedológica (Gardner, 1972; Klappa, 1983) permite considerar los niveles de calcretas de Paracuellos como inmaduros. Dicha consideración se basa tanto

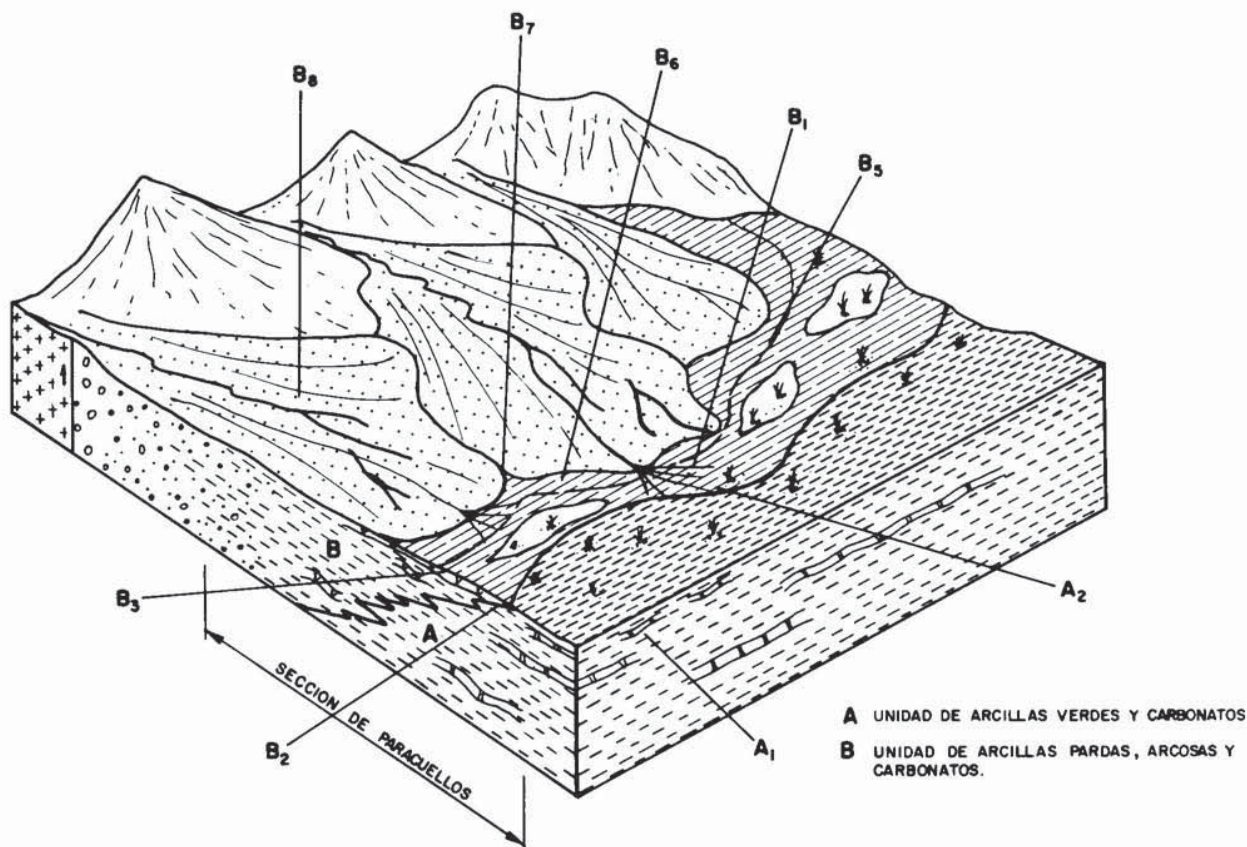


Fig. 13.—Esquemas idealizado de los sistemas deposicionales del Conjunto Inferior.

en la moderada a baja capacidad de drenaje de los sustratos arcillo-arenosos como en el supuesto de la falta de tiempo suficiente para el mejor desarrollo del perfil, entre los sucesivos eventos deposicionales.

El contenido medio en óxidos de calcio (40-45%) y magnesio (1-3%) de estos niveles presenta valores similares a los usualmente señalados en niveles de calcretas (Goudie, 1973). Una característica particular de algunas de las calcretas analizadas es su composición dolomítica. La posición de estos niveles en la base de la Unidad de arcillas pardas, arcosas y carbonatos nos permite concluir que la dolomita asociada a los perfiles edáficos puede tener su origen a partir de aguas con relaciones Mg/Ca elevadas inducidas por evaporación (Watts, 1980). Así mismo, tal como se discute posteriormente estas aguas tendrían composiciones muy próximas a las necesarias para formar sepiolita.

En lo referente a las microfacies de estos carbonatos edáficos se han observado dos tipos:

a) Carbonatos con estructura reticulada (lámina I. fig. 2). Esta estructura está definida por dolomicroesparita que limita masas de filosilicatos. Además de la dolomicroesparita, se observan venas de calcita en

empalizada. Son muy frecuentes las grietas de desecación afectando a masas de filosilicatos.

b) Calizas arenosas con grumos de arcillas (lámina I. fig. 3). La textura dominante es de micrita; presentando así mismo frecuentes grumos de filosilicatos con grietas de desecación. La proporción de detríticos es muy variable llegando en ocasiones hasta el 30%. Los detríticos más abundantes son granos de cuarzo y feldspato, tanto potásicos como plagioclasas. Se observan frecuentemente removilizaciones de óxidos de hierro. En algunos casos se encuentran canales y venas de cemento esparítico, bien diferenciados dentro de la textura general.

Ambas microfacies se diferencian netamente de las presentadas por el resto de los carbonatos estudiados en el área de Paracuellos de Jarama, tanto de los perfiles pedogenéticos presentes en ambientes palustres de dolomicritas nodulizadas y algo recristalizadas, con frecuentes grumos de filosilicatos (lámina I. fig. 1), como de los carbonatos del techo del Conjunto Inferior, los cuales presentan envueltas acrecionales (lámina I. fig. 4) y zonas brechificadas, calizas micríticas con «bird's-eyes» (lámina I. fig. 5), etc.

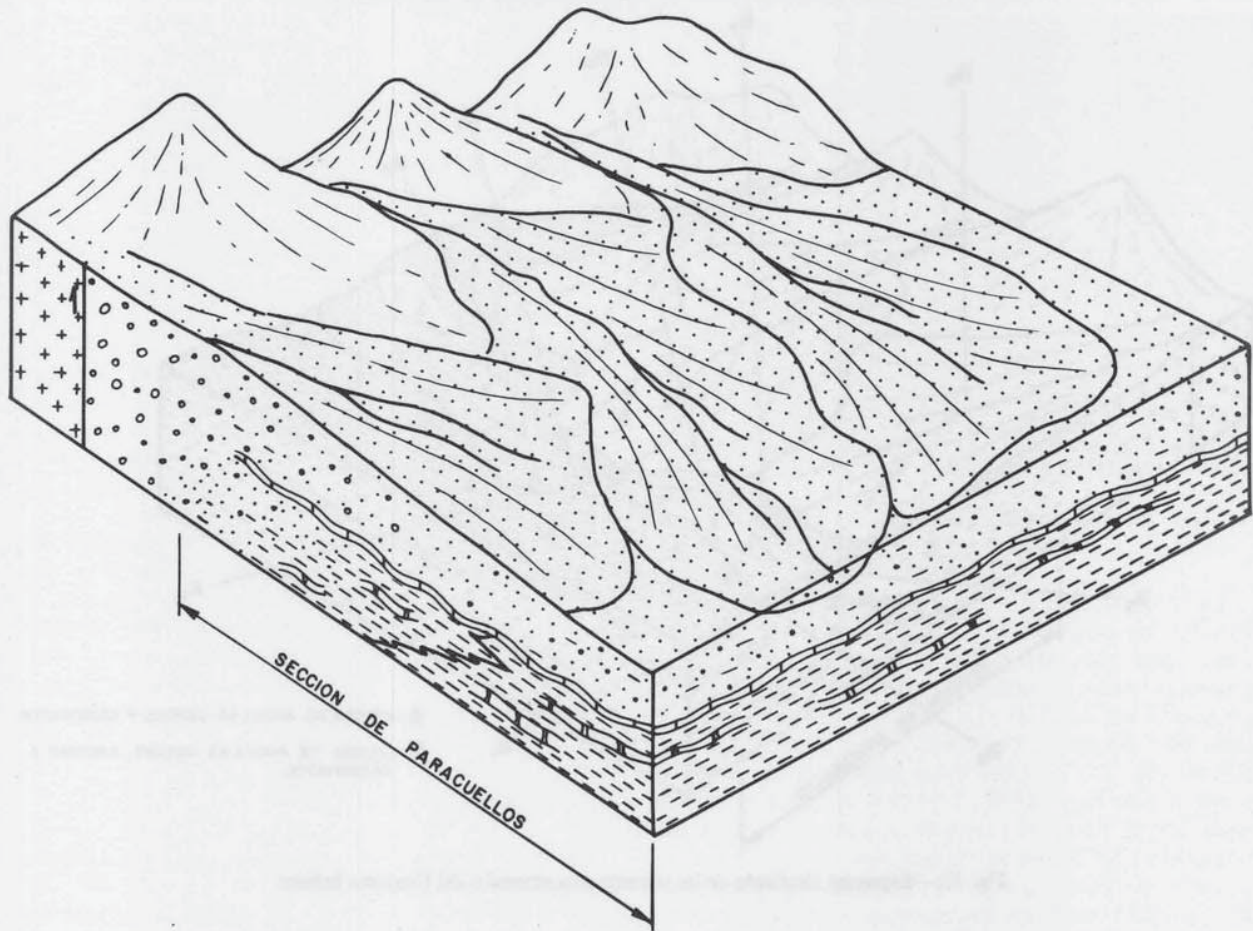


Fig. 14.—Esquema idealizado de los sistemas deposicionales del Conjunto Superior.

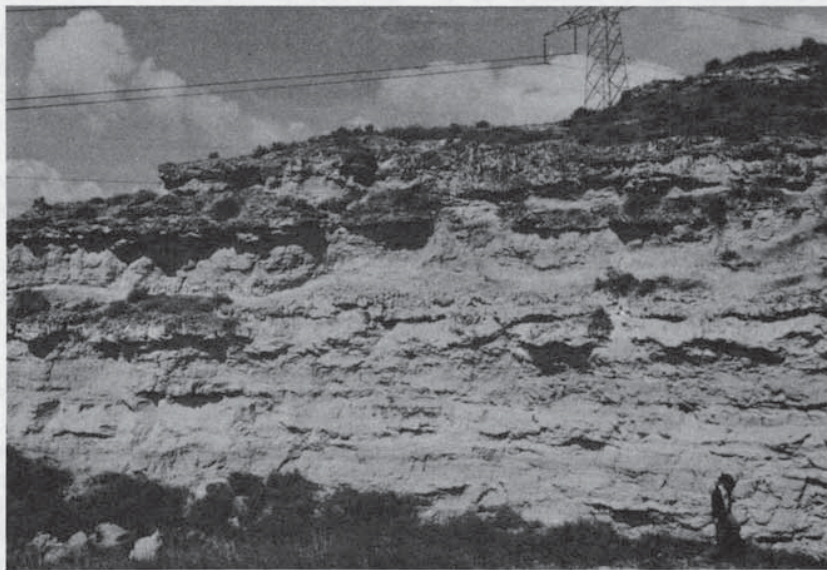


Fig. 15.—Niveles de calcretas en las proximidades de los Cerros de la Presa, se observa la superposición de los distintos perfiles edáficos.

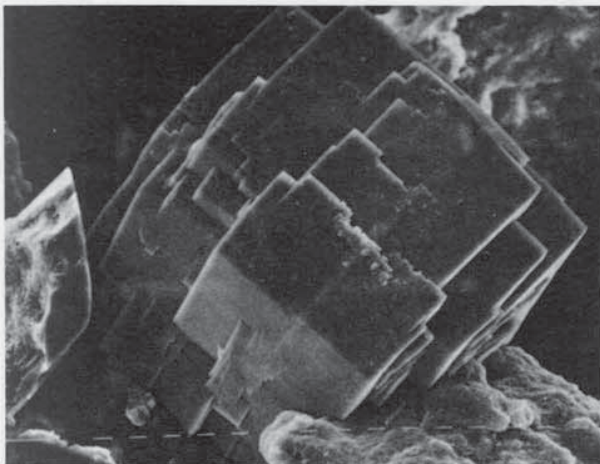


Fig. 16.—Analcima identificada mediante S.E.M. X320.

La mineralogía del sustrato arcillo-arenoso al que se asocian las calcretas ha sido considerada en detalle. Los rasgos más específicos pueden resumirse en la presencia casi constante de analcima y sepiolita en proporciones variables. La analcima ha sido identificada por difracción de rayos X, así como mediante S.E.M. (fig. 16) en tres de los perfiles estudiados. De acuerdo con Hay (1978) su aparición estaría relacionada con el desarrollo de suelos alcalinos en regiones semiáridas. La presencia de sepiolita en los niveles de calcretas de Paracuellos será discutida posteriormente. En cualquier caso, ambos minerales serán indicativos de un medio básico con pH comprendido entre 8 y 9 (Starkey y Blackmon, 1984). un aspecto a señalar es que ambos minerales no se han encontrado asociados en los niveles estudiados. Ello puede ser explicado por el hecho de que las condiciones físico-químicas necesarias para su formación son similares pero algo diferenciadas. Así, la génesis de ceolitas en suelos alcalinos requeriría un mayor aporte de aluminio y pH algo más elevado que el necesario para formar sepiolita de acuerdo con las consideraciones hechas por diversos autores (Stoesell y Hay, 1978; Starkey y Blackmon, 1984).

Como conclusión para los niveles de calcretas estudiados señalaremos que su génesis tuvo lugar, tal y como se ha deducido del análisis sedimentológico, en un ámbito de orla distal de abanico aluvial. La sedimentación en este ambiente se produce en lapsos de tiempo diferenciados, con etapas de sedimentación de materiales finos seguidas de otras etapas de no sedimentación o estabilización en las que se generarían los niveles de calcretas. La formación de estos niveles implicaría en todos los casos condiciones de exposición subáerea (desarrollo de cobertera vegetal con formación de rizolitos, grietas de desecación) bajo un clima caracterizado por períodos de lluvia y sequedad

contrastados. El desarrollo de una cobertera vegetal, así como aguas meteóricas favorecen el aumento de la presión de CO_2 en épocas húmedas, mientras que etapas más áridas favorecen la precipitación de carbonatos por evaporación (Read, 1976). La presencia de analcima y sepiolita en los perfiles permite deducir el carácter alcalino de estos ambientes.

Minerales fibrosos de la arcilla: la sepiolita

La presencia de sepiolita es un hecho destacable, especialmente en el Conjunto Inferior y, más concretamente en la parte más meridional de la sección. Así, la sepiolita se ha detectado al menos, en 33 de las muestras obtenidas. Su identificación precisa se ha llevado a cabo mediante difracción de Rayos X, tanto sobre polvo total como sobre agregados orientados posteriormente tratados con etilén-glicol.

Una primera observación de conjunto permite separar dos ámbitos en los que aparece la sepiolita en este área: por una parte asociada de depósitos correspondientes a charcas someras situadas hacia la parte distal de los lóbulos aluviales y conectadas con el área lacustre y, por otra, la sepiolita asociada a los perfiles de carbonatación (calcretas).

A) *Sepiolita de carácter lacustre*

Aparece asociada a esmectitas, sílex y dolomías. Esta asociación fue ya previamente señalada por algunos autores (Megías *et al.*, 1982), y caracteriza desde un punto de vista litoestratigráfico, la transición entre la Unidad de arcillas verdes y carbonatos y la Unidad de arcillas pardas, arcosas y carbonatos. Además de esto, se han reconocido arcillas sepiolíticas en secuencias de carácter lacustre a techo de la Unidad de arcillas pardas, arcosas y carbonatos.

El aspecto de la sepiolita en todos estos niveles corresponde a un material de tono marrón-rosado algo endurecido, con lajeado característico en seco y baja densidad. La textura más típica está constituida por intraclastos de sepiolita (Knoury *et al.*, 1982), incluidos en una pasta también sepiolítica y bastante homogénea. La presencia de vetas finas de sepiolita, que suele coincidir con bioturbación fina de raíces hace aún más compleja esta textura.

Las arcillas con las que se asocian los niveles de sepiolita corresponden siempre a esmectitas de carácter trioctaédrico, muy magnesianas (Megías *et al.*, 1982; Domínguez, 1985). Esta asociación mineralógica puede ser contrastada con otros yacimientos de sepiolita en cuencas lacustres cerradas (Knoury *et al.*, 1982; Jones, 1985). Las condiciones físico-químicas para la formación de sepiolita (Siffert y Wey, 1962; Wollast *et al.*, 1969; Stoesell y Hay, 1978; Jones, 1985) corresponden a medios alcalinos, con pH com-

prendidos entre 8 y 9, y concentraciones elevadas de sílice y magnesio, condiciones que suelen alcanzarse en medios naturales áridos.

El mecanismo concreto de génesis de sepiolita en facies lacustres en el área de Paracuellos exige un análisis detallado, que será abordado en estudios posteriores. Dada la asociación de esta sepiolita con esmectitas e interestratificados de carácter magnesiano nos inclinamos, en una primera aproximación, por un modelo genético de la sepiolita en base a transformaciones diagenéticas en medio alcalino de otros minerales de la arcilla precursores, frente a un posible modelo de precipitación directa. Las relaciones diagenéticas apuntadas han sido señaladas en otras cuencas por diversos autores (Knoury *et al.*, 1982; Post y Janke, 1982; Jones, 1985).

B) *Sepiolita en perfiles de calcreta*

En los perfiles de calcreta estudiados la sepiolita aparece asociada tanto a los términos más carbonáticos como a los términos arcillosos inferiores del perfil.

Esta asociación de la sepiolita a los perfiles de calcreta constituye un rasgo característico de los niveles de encontramiento carbonático dentro de la Unidad de arcillas pardas, arcosas y carbonatos en la sección de Paracuellos. La sepiolita con tonos pardo blanquecinos y aspecto pulverulento, aparece en la base de los perfiles, dentro de las arcillas arenosas, asociada a illitas y esmectitas sin presentar texturas netas de diferenciación. Por el contrario, en la proximidad o dentro de los niveles carbonatados, constituye el único mineral arcilloso, hecho no frecuente en niveles de calcretas pero que ha sido señalado en ocasiones por algunos autores (Hay y Wiggins, 1980; Jones, 1983).

Si bien es frecuente encontrar referencias sobre minerales fibrosos de la arcilla en perfiles de calcretas, éstas se refieren, sobre todo, a la presencia de palygorskita (Montenat, 1976; Packet, 1983), o bien a la presencia de ambas, siendo dominante la palygorskita (Gardner, 1972; Goudie, 1973; Callen, 1984; Armenteros y Alonso-Gavilán, 1984). Nuestras observaciones nos permiten concluir que en las calcretas de Paracuellos la palygorskita está ausente, siendo el único fibroso de la arcilla representado la sepiolita.

Las condiciones de formación de la sepiolita ya han sido señaladas anteriormente, pudiendo resumirse éstas en unas condiciones de alcalinidad de pH próximo a 8 y concentraciones elevadas de sílice y magnesio.

Estas consideraciones conducen a pensar que la génesis de sepiolita asociada a carbonatos subaéreos es el resultado de la precipitación química a partir de soluciones vadasas en suelos calcáreos (Jones, 1983).

De acuerdo con esto pensamos que la sepiolita presente en los niveles de calcreta de Paracuellos es interpretable como mineral autigénico frente a un posible origen detrítico o singenético. Esta hipótesis es acorde con las conclusiones obtenidas por diversos autores a partir de calcretas conteniendo sepiolita en ambientes actuales o recientes (Bachman y Machette, 1977; Hay y Wiggins, 1980; Watts, 1980; Jones, 1983). La sepiolita se presenta dentro de las calcretas en asociación con otros minerales autigénicos, tanto calcita como minerales de la sílice. La presencia de esmectitas dioctaédricas, no magnesianas, junto a la sepiolita, estaría favorecida por la removilización selectiva del calcio para formar la calcita pobre en magnesio de las calcretas y el consiguiente aumento en la relación Mg/Ca de las soluciones vadasas (Watts, 1980). Estas soluciones en ambiente carbonatado alcanzarían pH suficientemente elevado para la formación de sepiolita. Todo el proceso estaría favorecido por una relativamente alta tasa de evaporación en las zonas distales de los abanicos.

La génesis de la sepiolita requiere actividades altas tanto de sílice como de magnesio. El aporte de sílice puede ser considerado teniendo en cuenta varias posibilidades entre las que cabe destacar un origen alóctono, como producto de la alteración de materiales graníticos en los bordes, o bien un origen autóctono, como consecuencia de la liberación de sílice en el reemplazamiento en las calcretas de silicatos por calcita (Walker, 1960). Por su parte, el aporte de Mg, puede ser valorado consistentemente si se admite como hipótesis más adecuada la de su procedencia a partir de las áreas lacustres alcalinas situadas más al sur de los abanicos (Megías *et al.*, 1982; Leguey *et al.*, 1984).

Sílex

La presencia de niveles síliceos es un rasgo muy generalizado en la sección de Paracuellos, esencialmente en su parte meridional. El reconocimiento de la mineralogía del sílex se ha llevado a cabo mediante difracción de Rayos X. La presencia de las bandas de 4,3 Å y 4,09 Å y los picos de 2,45 Å y 2,5 Å, principalmente nos indica que el componente principal de la silicificación es, además de cuarzo, ópalo CT. A nivel de mesoescala se puede apreciar que la silicificación se asocia tanto a niveles arcillosos (62% de los niveles síliceos) como a niveles carbonatados (38%). Los rasgos más característicos de estas asociaciones son los siguientes:

A) *Arcillas silicificadas*.—La textura más común consiste en masas arcillosas homogéneamente mezcladas con ópalo. La diferenciación entre las dos mineralogías es difícil, apareciendo a veces finos intercrecimientos sílice-arcilla. En otras ocasiones el ópalo se

presenta como masas esféricas de tonos rosados que dan lugar a texturas de ópalo perlítico-globular. En pequeñas venas se observan cementos politexturales de sílice. Los difractogramas muestran que las arcillas asociadas al sílex son predominantemente sepiolíticas, mientras que la sílice se presenta como ópalo CT.

La presencia de ópalo asociado a la sepiolita implica una migración de magnesio debida a alteraciones pedológicas. El hecho de que esta asociación se de más frecuentemente en las zonas distales implica que la concentración de iones sería mayor favoreciendo así la precipitación de la sílice como ópalo y no como cuarzo (Bustillo, 1976b), aunque las partículas arcillosas pueden servir como estabilizadores y favorecer la precipitación con soluciones menos concentradas.

B) *Carbonatos silicificados*.—En lámina delgada se distinguen distintos tipos texturales, tanto de sílice como de carbonatos, observándose masas dispersas de sílice amorfa junto a fases más ordenadas de cuarzo fibroso, cuarzo en mosaico, megacuarzo. Estas últimas texturas del cuarzo se encuentran fundamentalmente rellenando poros.

El hecho de que el componente principal sean las formas fibrosas del cuarzo implica una menor concentración de sílice que en el caso del ópalo, ahora bien, las distintas texturas encontradas: cuarzo granular sacaroides, calcedonita y megacuarzo requieren progresivamente menores concentraciones de sílice (Bustillo, 1976a). En lo que se refiere a la cuarcina ésta se ha encontrado puntualmente en dos muestras, habiéndose descrito en ambientes calcáreos sulfatados o ricos en magnesio (Bustillo, op cit.). En todo caso, el reemplazamiento de los carbonatos por sílice está fundamentalmente controlado por el pH (Summerfield, 1982).

Conclusiones

Los resultados obtenidos en este trabajo confirman la importancia del área estudiada para el establecimiento de la transición facies marginales y centrales del Neógeno (Mioceno medio) en el sector N y NW de la Cuenca de Madrid.

Desde un punto de vista litoestratigráfico se han distinguido dos conjuntos sedimentarios mayores separados por una discontinuidad que queda bien representada por la brusca progradación de terrígenos del Conjunto Superior, sobre términos más finos (arcillas y carbonatos con arcosas finas) del Conjunto Inferior. La edad de estos conjuntos se atribuye al Aragoniense medio y superior.

De acuerdo con todo ello, se reconoce una ruptura sedimentaria bien definida hacia la base de Aragoniense superior que puede ser interpretada como reflejo de una reactivación tectónica en los bordes de

la cuenca y/o evolución a condiciones más húmedas. La entidad de esta ruptura sedimentaria y su continuidad quedan pendientes de investigaciones posteriores en otras áreas de la Cuenca de Madrid.

Así mismo, se han caracterizado desde un punto de vista sedimentológico los subambientes en que tiene lugar el depósito de las diferentes unidades. Así, en el Conjunto Inferior, la Unidad de arcillas verdes y carbonatos representa un ambiente palustre-lacustre somero, representando el cambio de las facies de esta Unidad a las de la Unidad de arcillas pardas, arcosas y carbonatos la transición entre dicho ámbito palustre y facies y carbonatos de abanico aluvial s.s. Este tránsito se realiza a través de una orla de abanico aluvial edafizada. Como rasgo general se observa una neta polaridad N-S, situándose los depósitos palustres en zonas más meridionales y los depósitos específicamente propios de abanicos en zonas más septentrionales. El Conjunto Superior constituido por la Unidad de arcosas gruesas se interpreta como un sistema de abanicos aluviales en facies intermedias.

Desde un punto de vista petrogenético y mineralógico, gran parte de las litofacies correspondientes al Conjunto Inferior, en particular en la parte meridional de Paracuellos presentan un marcado carácter autigénico. Los niveles de calcreta muestran perfiles poco evolucionados, siendo frecuente la presencia en ellos de sepiolita, apareciendo éste como único mineral fibroso en los perfiles. La sepiolita aparece así mismo ligada a ambientes de charcas someras, característicamente situados en la zona transicional a los ámbitos palustres. Por último, el sílex aparece asociado tanto a arcillas sepiolíticas como a carbonatos. Tanto en uno como en otro tipo de depósito se han definido sus variaciones petrográficas, observándose diferencias bastante marcadas en función de su distinta posición paleogeográfica.

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a los doctores M. Bustillo y R. Fort por su ayuda en el tratamiento y análisis de minerales pesados; a los doctores S. Ordoñez y M. Hoyos por sus sugerencias sobre diversas temáticas relacionadas con el área de trabajo, en general, sobre la Cuenca de Madrid. Agradecemos también la ayuda de la doctora Bustillo en el reconocimiento de los depósitos silíceos. También a los doctores S. Leguey y J. A. Medina por haber puesto a nuestra disposición las técnicas de Microscopía Electrónica de barrido, así como por sus observaciones sobre los resultados obtenidos. El trabajo de delineación fue realizado por V. Mateos y J. M. Angulo. La reproducción del material fotográfico corrió a cargo de E. Alegre.

Este trabajo de investigación se incluye dentro del subproyecto «Evolución geológica de la Cuenca Media del Tajo: aspectos sedimentológicos, geoquímicos y recursos» financiado por la C.A.Y.C.I.T.-C.S.I.C.

Bibliografía

- Alberdi, M. T.; Hoyos, M.; Junco, F.; López Martínez, N.; Morales, J.; Sesé, C. y Soria, D. (1983): Biostratigraphie et evolution sedimentaire de l'aire de Madrid. *Interim Colloquium Mediterranean Neogene Continental Paleoenvironments and Paleoclimatic Evolution*. Montpellier, Avril, 18-23.
- Alberdi, M. T.; Hoyos, M.; Mazo, A.; Morales, J.; Sesé, C. y Soria, D. (1985): Biostratigrafía, paleoecología y biogeografía del Terciario de la provincia de Madrid. En: *Geología y Paleontología del Terciario Continental de la provincia de Madrid*. (Alberdi, M. T. edit) C.S.I.C., Madrid: 99-105.
- Armenteros, I. y Alonso-Gavilán, G. (1984): Génesis y evolución de los caliches miocenos del sureste de la depresión del Duero. *Estudios geol.*, 40: 153-163.
- Arribas, A. (1963): Mineralogía y metalotecnia de los yacimientos españoles de Uranio: Paracuellos de Jarama. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat.*, 61: 51-55.
- Bechman, G. O. y Machette, M. N. (1977): Calcic soils and calcretes in the southwestern United States. *U. S. Survey Open-file Rept.*, 77-94.
- Brewer, R. (1964): *Fabric and Minerals Analysis of soils*. 470 Pp. Ed. Willey & Sons.
- Bustillo M. A. (1976a): Texturas de las rocas silíceas inorgánicas en ambiente continental y significado genético. *Estudios geol.*, 32: 371-383.
- Bustillo, M. A. (1976b): Estudio petrológico de las rocas silíceas miocenas de la Cuenca del Tajo. *Estudios geol.*, 32: 451-497.
- Buurman, P. (1980): Paleosols in the Reading Beds (Paleocene) of Alum Bay, Isle of Wight, U. K. *Sedimentology*, 27: 593-607.
- Callen, R. A. (1984): Clays of the palygorskite-sepiolite group. Depositional environments, age and distribution. En: *Palygorskite-sepiolite occurrence, genesis and uses*. (Singer y Galan, edit.). Developments in sedimentology, 37: 1-38.
- Calvo, 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. Mat. Proc. Geol.*, 2: 145-176.
- Carter, R. M. (1975): A discussion and classification of subaqueous mass-transport with particular application to grain-flow, slurry-flow and fluxoturbidites. *Earth. Sci. Rev.*, 11: 145-177.
- Crusafont, M. y Golpe-Posse, M. L. (1971): Sobre unos yacimientos de mamíferos vindobonienses en Paracuellos de Jarama. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat.*, 69: 255-259.
- Despraires, A. (1983): Relation entre le parametre B des esmectites et leur contenu en fer et magnesium. Application a l'etude des sediments. *Clay Miner.*, 18: 165-175.
- Domínguez, M. C. (1985): *Sedimentología y mineralogía de las facies detríticas neógenas en la Cuenca de Madrid*. Tesis de licenciatura. Facultad de C. Geológicas. Univ. Compl. Madrid. 134 pp.
- Duchaufour, P. (1975): *Manual de Edafología*. Ed. Torray Masson, 476 pp.
- Esteban M. y Klappa, C. F. (1983): Subaerial exposure environment. En: *Carbonate depositional environments* (Scholle, P. A.; Debout, D. G. y Moore, C. H., edit). A.A.P.G. Mem., 33: 1-96.
- Freytet, P. (1973): Petrography and paleoenvironments of continental carbonate deposits with a particular reference to Upper Cretaceous Lower Eocene of Languedoc. Southern France. *Sediment. Geol.*, 10: 25-60.
- Freytet, P. y Plaziat, J. C. (1982): Continental carbonate sedimentation and pedogenesis Late Cretaceous and Early Tertiary of southern France. *Contributions to sedimentology* 12. 213 pp.
- Gardner, L. G. (1972): Origin of the Mormon Mesa Caliche. Clark County, Nevada. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 83: 143-156.
- Goudie, A. S. (1973): *Duricrust in tropical and subtropical Landscapes*. Clarendon Press, Oxford. 174 pp.
- Hay, R. L. (1978): Geologic occurrence of zeolites. En: *Natural zeolites*. (Sand, L. B. y Mumpton, F. A. edit). Pergamon Press: 135-143.
- Hay, R. L. y Wiggins, B. (1980): Pellets, ooids, sepiolite and silica in three calcretes of the southwestern United States. *Sedimentology*, 25: 559-576.
- Jones, B. F. (1983): Occurrence of clay minerals in surficial deposits of southwestern Nevada. *Sci. Geol. Mém.*, 72: 81-92.
- Jones, B. F. (1985): Clay mineral diagenesis on lacustrine sediments. U. S. *Geological Survey Bulletin* (in press).
- Junco, F. y Calvo, J. P. (1984): *Cuenca de Madrid*. En: Libro homenaje a J. M. Ríos, 2, I.G.M.E. (en prensa).
- Knoury, H. N.; Eberl, D. D. y Jones, B. F. (1982): Origin of magnesium clays from the Amargosa Desert Nevada. *Clays and Clay Min.*, 30: 327-336.
- Klappa, C. F. (1983): A process-response model for the formation of pedogenetic calcretes. En: *Residual deposits: surface related weathering processes and materials*. (Wilson, R.C.L., edit). Blackwell Sci. Pub. Oxford., 221-134.
- Leguey, S.; Ordóñez, S.; García del Cura, M. A. y Medina, J. A. (1984): Estudio geoquímico y mineralógico de las facies arcóscas distales de la Cuenca de Madrid. *I Congreso Español de Geología*, 2: 355-371.
- Lomoschitz, A.; Calvo, J. P. y Ordóñez, S. (1985): Sedimentología de las facies detríticas de la Unidad Intermedia del Mioceno al sur y este de Madrid. *Estudios Geol.*, (en prensa).
- López Vera, F. (1975): *Hidrogeología regional de la Cuenca del río Jarama, en los alrededores de Madrid*. Tesis Doctoral. Univ. Compl. Madrid, Publicado 1977. Memorias I.G.M.E.
- López Vera, F. y Pedraza, J. (1976): Síntesis geomorfológica de la Cuenca del río Jarama en los alrededores de Madrid. *Estudios Geol.*, 32: 499-508.
- Megías, A. G.; Leguey, S. y Ordóñez, S. (1982): Interpretación tectosedimentaria de la génesis de los fibrosos de la arcilla en series detríticas continentales (Cuencas de Madrid y del Duero) España. *V Congreso Latinoamericano de Geología*, Argentina, 2: 427-439.
- Megías, A. G.; Ordóñez, S. y Calvo, J. P. (1983): Nuevas aportaciones al conocimiento geológico de la Cuenca de Madrid. *Rev. Mat. Proc. Geol.*, 1: 163-191.
- Montenat, Ch. (1976): Les bassins Néogènes du Levant, d'Alicante et de Murcia (Cordilleres bétiques orientales Espagne). Stratigraphie, Paleogéographie et évolution dynamique. *Doc. Lab. Geol. Fac. Sci. Lyon*, 69: 345 pp.
- Nickel, E. (1985): Carbonate in alluvial fan systems, an approach to physiography, sedimentology and diagenesis. *Sediment. Geol.*, 42: 83-104.
- Packet, H. (1983): Stability, instability and significance of attapulgite in the calcretes of Mediterranean and tropical areas, with marked dry season. *Sci. Géol. Mem.*, 72: 131-140.
- Passaga, R. (1964): Grain size representation by CM patterns as geological tool. *J. Sedim. Petrol.*, 34: 830-847.
- Post, J. L. y Janke, N. C. (1984): Ballarat sepiolite. Inyo County California. En: *Palygorskite-sepiolite occurrence, genesis and uses* (Singer y Galan, edit). Developments in Sedimentology, 37: 159-167.

- Read, J. F. (1976): Calcretes and their distinction from stromatolites. En: *Stromatolites*. Developments in Sedimentology, 20: 55-71.
- Reeves, J. R. (1970): Origin, classification and geological history of caliche on the southern High Plains, Texas and eastern New Mexico. *Journ. Geol.*, 78: 352-362.
- Riba, O. (1957): Terrasses du Manzanares et du Jarama aux environs de Madrid. *LN.Q.U.A. V Congres Inter Libre Guide de l'excursion*, 5-55.
- Riviere, A. (1977): *Méthodes granulométriques. Techniques et interprétations*. Masson. 170 pp.
- Robles, S. y Ardevol, L. F. (1984): Evolución paleogeográfica y sedimentológica de la cuenca lacustre de Sossis (Eoceno superior, Prepirineo de Lérida): ejemplo de influencia de la actividad de abanicos aluviales en el desarrollo de una cuenca lacustre asociada. *Pub. de Geología* 20. tomo Homenaje a L. Sánchez de la Torre, 232-268.
- Royo Gómez, J. (1929): Memoria y hoja geológica de Madrid (nº 559). Mapa geológico nacional 1.ª ser. 1.ª ed. I.G.M.E. Madrid.
- Siffert, B. y Wey, R. (1962): Synthèse d'une sepiolite a temperature ordinaire. *C. R. Aca. Sci. Fr.*, 254: 1460-1463.
- Starkey, M. C. y Blackmon, P. D. (1984): Sepiolite in Pleistocene Lake Tecopa, Inyo County, California. En: *Palygorskite-sepiolite occurrence, genesis and uses* (Singer y Galán, edits.). Developments in Sedimentology, 37: 137-148.
- Stoesell, R. K. y Hay, R. L. (1978): The geochemical origin of sepiolite and kerolite at Amboseli: Kenia. *Contrib. Min. Petrol.*, 65: 255-268.
- Summerfield, M. A. (1982): Distribution, nature and probable genesis of silcrete in arid and semi-arid southern Africa. En: *Aridic Soils and Geomorphic Processes*. (Yaalon, D. H., edit), 37-65.
- Walker, T. R. (1960): Carbonate replacements of detrital crystalline silicate minerals as a source of authigenic minerals in sedimentary rocks. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 71: 145-152.
- Watts, N. L. (1980): Quaternary pedogenetic calcretes from the Kalahari, mineralogy, genesis and diagenesis. *Sedimentology*, 27: 661-687.
- Wollast, R.; Mackenzie, F. T. y Bricker, O. P. (1968): Experimental precipitation and genesis of sepiolite at earth-surface conditions. *Am. Mineralogist*, 53: 1645-1662.

Recibido el 12 de febrero de 1986
Aceptado el 7 de abril de 1986