

Características texturales y composicionales en depósitos de arcillas magnésicas de la cuenca de Madrid. III) Bentonitas (Sector Villaluenga-Magán)

M. Pozo⁽¹⁾, J. Casas⁽¹⁻²⁾, J.A. Medina⁽¹⁾ y J.A. Martín Rubí⁽³⁾

(1) Dpto. de Química Agrícola, Geología y Geoquímica, Facultad de Ciencias. Universidad Autónoma de Madrid. Cantoblanco. 28049 Madrid

Correo electrónico: manuel.pozo@uam.es

(2) Centro de Ciencias Medioambientales. C.S.I.C. Serrano, 117. 28006 Madrid

(3) Instituto Geológico y Minero de España. La Calera, 1. 28760 Tres Cantos. Madrid

RESUMEN

Se establecen las variaciones composicionales y texturales de litofacies lutíticas de carácter bentonítico en la zona de Villaluenga-Magán (provincia de Toledo), haciendo especial hincapié en los aspectos petrográficos. En el depósito de bentonitas, situado al pie de los cerros del Águila y Magán, se han diferenciado dos litofacies principales: lutitas verdes y lutitas rosáceas. Estos materiales se organizan en diversos tipos texturales que definen tres secuencias sedimentarias que finalizan con rasgos de exposición subaérea. Dos de estas secuencias están constituidas por lutitas verdes y composicionalmente son bentonitas. La tercera está formada por lutitas rosas, caracterizándose por presentar, además de esmectitas trioctaédricas, un elevado contenido en sepiolita, que puede ser mayoritaria, por lo que no se pueden considerar auténticas bentonitas. Desde el punto de vista petrográfico destaca la existencia de frecuentes rasgos edáficos, diferenciándose texturas masivas, intraclásticas, granulares y laminadas.

Palabras clave: bentonitas, cuenca de Madrid, esmectitas magnésicas, sepiolita, texturas lutíticas

Textural and compositional characteristics of magnesian clay deposits in the Madrid basin. III) Bentonites (Villaluenga - Magán zone)

ABSTRACT

Textural and compositional variations of bentonite lutitic lithofacies from the Villaluenga-Magán zone have been established, making special emphasis on petrographic features. The bentonite deposit is located at the foothill of two buttes named Águila and Magán hills (Toledo province), where two main lithofacies have been differentiated: green clays and pink lutites. These materials display several textures arranged in three shallowing upward sequences with subaerial exposure features at their tops. Two of the sequences include green clays with a bentonite composition. The third one is made up of pink lutites with a high content in sepiolite besides Mg-smectite, and therefore is considered no true bentonite but sepiolitic lutite. From a petrographic point of view the abundant pedogenic features are remarkable in these lithofacies. Massive, granular, intraclastic and laminated textures have been differentiated.

Key words: bentonites, clay textures, Madrid basin, magnesian smectites, sepiolite

Introducción

Objetivos y antecedentes bibliográficos

La presente aportación se incluye dentro de una serie de trabajos, de los que ya se han publicado dos (Pozo

et al. 1999 a,b), que abordan el estudio textural de los principales depósitos de arcillas especiales (kerolita, bentonita, sepiolita y paligorskita) de la cuenca de Madrid, complementado con aspectos composicionales (quimismo, mineralogía) y determinadas propiedades tecnológicas (comportamiento térmico, CEC y

caciones de cambio). Los rasgos texturales, tanto deposicionales como postdeposicionales (diagenéticos, edáficos), pueden contribuir a comportamientos tecnológicos dispares del material de una misma capa en un yacimiento. Este hecho afecta especialmente a depósitos de poca potencia o con unas estrictas especificaciones de calidad.

En un trabajo anterior, Pozo *et al.* (1999b) diferenciaron, en la cuenca de Madrid, tres zonas principales con depósitos importantes de bentonitas: Cabañas de la Sagra-Yunclillos, Villaluenga-Magán y Yuncos, realizando el estudio de la primera de ellas. En el presente trabajo, estudiamos los depósitos de Villaluenga-Magán, ubicados en los cerros testigos del Águila y del Monte, cerca de las poblaciones de Villaluenga, Magán y Cabañas de la Sagra.

En el "Proyecto de Investigación Nacional de Bentonitas" (ENADIMSA 1975) se incluye como yacimiento de bentonita potencialmente interesante el Cerro del Monte. Galán *et al.* (1986) estudiaron estas bentonitas desde el punto de vista composicional y tecnológico, concluyendo que están constituidas mayoritariamente por una esmectita magnésica, que identifican como saponita. El estudio más completo de descripción de facies y caracterización mineralógica, en la zona objeto de estudio, es el realizado por García *et al.* (1988, 1990), quienes incluyen el yacimiento de bentonita en la denominada "Unidad de Arcillas Verdes".

Los aspectos sedimentológicos del yacimiento de bentonita han sido estudiados por Pozo *et al.* (1992a, b). Estos autores diferencian tres tramos: dos de bentonita, a base y techo, constituidos por lutitas verdes bentoníticas, y uno intercalado de lutitas rosáceas sepiolíticas. Los estudios mineralógicos, petrográficos y geoquímicos permiten concluir que los tres tramos se corresponden con tres secuencias de somerización en un ambiente lacustre-palustre de llanura lutítica (mud-flat) con desarrollo de paleoverisoles y paleosuelos de sepiolita.

Desde el punto de vista tecnológico, estas bentonitas han sido seleccionadas para su posible empleo como material de sellado en el almacenamiento de residuos radioactivos (Cuevas *et al.*, 1993), siendo también objeto de estudios experimentales de simulación con el fin de determinar sus condiciones de estabilidad al interaccionar con aguas de quimismo controlado y temperaturas hidrotermales (Cuevas *et al.*, 1994 y 2001).

Bentonitas cenozoicas constituidas por arcillas magnésicas similares se han citado en la formación Green river (Dyni, 1976) y el desierto de Amargosa (Hay *et al.*, 1986).

Marco geológico y puntos muestreados

La zona estudiada se sitúa a unos 20 Km. al norte de Toledo, entre las poblaciones de Villaluenga, Magán y Cabañas de la Sagra (Figura 1a). Los depósitos de bentonita se localizan en los cerros del Águila y del Monte, (hoja 629 Toledo, coordenadas X=581,6 Y=598,7) que son, geomorfológicamente, cerros testigos, alcanzando los 650 m de altitud en una zona con cota media próxima a los 525 m (Figura 2a). En la base de ambos cerros se ha desarrollado una intensa actividad minera, encaminada a la explotación de bentonitas.

Como resultado del trabajo de campo se han diferenciado cuatro unidades cartográficas (Figura 1b y c), que son, de base a techo: 1- Unidad siliciclástica roja (potencia no medida). 2- Unidad siliciclástica verde (40 m). 3- Unidad margo-calcárea (30 m). 4- Unidad carbonática silicificada (4 m).

La unidad siliciclástica verde contiene los niveles de arcillas magnésicas (Figura 2b). En ella se diferencia una Unidad Magnésica (UM), que comprende el yacimiento de bentonita, y dos unidades detríticas, a base y techo de la misma. Tanto en la Unidad Detrítica superior (UDS) como en la inferior (UDI) se han reconocido niveles lutíticos, de poca potencia (<1 m) conteniendo esmectitas trioctaédricas, pero con predominio de sepiolita y fenómenos de opalización, por lo que no han sido objeto de estudio en el presente trabajo.

La existencia de frecuentes restos de vertebrados ha permitido datar estos materiales como Aragoniense superior (J. Morales comunicación personal) incluyéndose, por lo tanto, en la Unidad Intermedia del Mioceno (Alberdi *et al.* 1984).

Dentro de la Unidad Magnésica (cota 577-580 m) se han diferenciado tres tramos, que en general aparecen bien representados en la zona, aunque con variaciones notables de potencia (Figura 2c). De forma muy sintética se describen sus características:

I) *Tramo inferior* (1,30-1,50 m). Se dispone sobre facies limo-arenosas grisáceas y está constituido por lutitas verdes, ocasionalmente con tintes castaños, predominantemente masivas pero con incipiente fábrica laminar en contacto con facies laminadas del tramo medio (Figura 2d). Contienen terrígenos dispersos, indicios de intraclastos arcillosos e incipiente bioturbación. Destaca a techo el incremento en rasgos de somerización, con abundantes "slickensides" y rellenos arcillosos en grietas de desecación.

II) *Tramo medio* (0-1,20 m). Este tramo incluye lutitas rosáceas de geometría lenticular, por lo que su potencia es muy variable en el depósito. En contacto

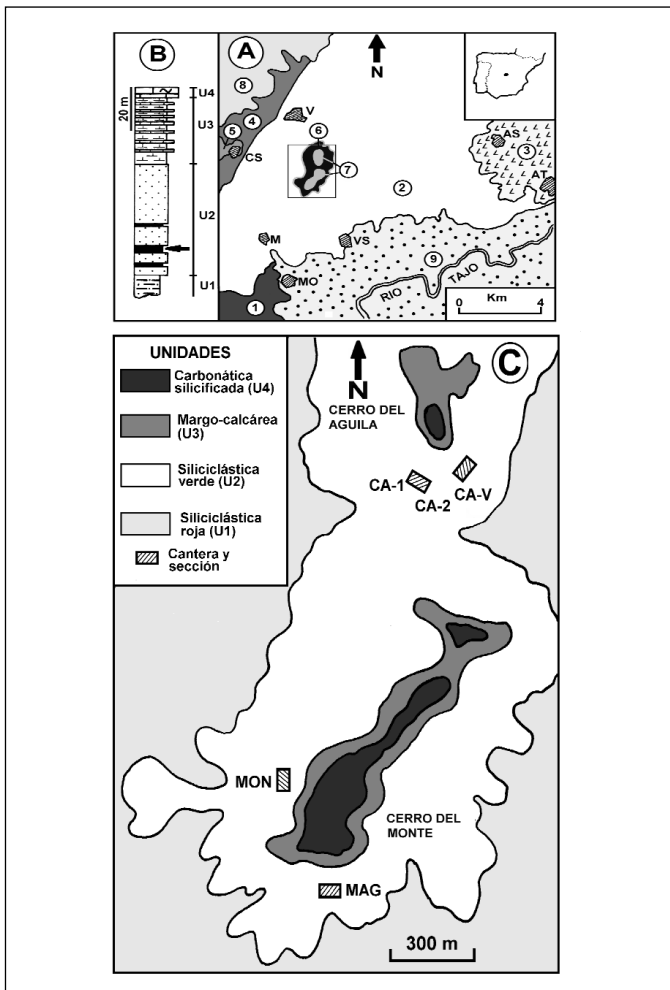


Fig. 1. A) Esquema geológico y de situación de la zona estudiada (recuadro). (Adaptado de García et al. 1990). 1) Arenas gruesas rojas. 2) Arcillas rojas de la Sagra. 3) Unidad yesífera. 4) Arenas finas arcósicas. 5) Lutitas, carbonatos y sílex. 6) Arenas y arcillas verdes. 7) Margas, carbonatos y ópalo. 8) Arenas gruesas arcósicas. 9) Gravas y arenas. CS: Cabañas de la Sagra; V: Villaluenga; M: Magán; Mo: Mocejón; VS: Villaseca de la Sagra; AT: Añover de Tajo; AS: Alameda de la Sagra. B) Unidades litológicas diferenciadas: U1: Unidad siliciclástica roja. U2: Unidad siliciclástica verde (la flecha indica la posición de la unidad magnética UM). U3: Unidad margo-cal cárea. U4: Unidad carbonática silicificada. C) Cartografía de la zona seleccionada en el recuadro de 1A con las unidades diferenciadas en 1B. Se indica la posición de las secciones estudiadas en los cerros del Águila (CA-1, CA-2 y CA-V) y del Monte (MAG y MON)

Fig. 1. A) Geological map and location of the studied zone (rectangle) (Adapted from García et al., 1990). 1) Coarse red sands. 2) La Sagra red clays. 3) Gypsum unit. 4) Fine arkosic sands. 5) Lutites, carbonates and chert. 6) Sands and green clays. 7) Marls, carbonates and opal. 8) Coarse arkosic sands. 9) Gravels and sands. CS: Cabañas de la Sagra; V: Villaluenga; M: Magán; Mo: Mocejón; VS: Villaseca de la Sagra; AT: Añover de Tajo; AS: Alameda de la Sagra. B) Lithological units differentiated: U1: Siliciclastic red unit. U2: Siliciclastic green unit. U3: Marly carbonatic unit. U4: Silicified carbonatic unit. C) Detailed mapping of the rectangle selected in 1A showing the units of 1B. The location of the lithological sections sampled in both Águila (CA-1, CA-2, CA-V) and Magán (MAG, MON) hills is indicated

irregular sobre el tramo inferior, presenta en su base lutitas laminadas transicionales de tonos rosas o verdes que engloban turbulentamente morfologías masivas, que parecen situarse en depresiones del tramo inferior. En su parte superior pasan a lutitas rosáceas de compacidad variable con nodulización, bioturbación y frecuentes rasgos de desecación con rellenos laminados rosáceos. A techo, su aspecto es brechoide, con rellenos, en grietas, de lutitas verdes (Figura 2e). Destaca el incremento notable en la potencia de este tramo en los afloramientos más orientales de los cerros del Águila y Monte, especialmente en este último.

III) *Tramo superior* (0,80-1,50 m). Constituido por lutitas verdes de aspecto masivo, que presentan en su base un episodio intraclástico con proporción variable en morfologías subredondeadas a subangulares de tono rosáceo claro, resultado del retrabajeamiento del techo del tramo medio (Figura 2f). Especialmente a techo, hay evidencias de bioturbación (pedotúbulos) y "slickensides" con tinciones de pirolusita. Las variaciones de potencia en este tramo se relacionan con el carácter erosivo de los depósitos detríticos que se disponen a su techo (Figura 2c).

El muestreo se ha realizado en cinco columnas litológicas, tres levantadas en el Cerro del Águila (CA-1, CA-2, CA-V) y dos en el Cerro del Monte (MON, MAG). La correlación de estas columnas se recoge en la figura 3.

Para el estudio textural se han seleccionado 50 muestras pertenecientes a las dos litofacies descritas en los tres tramos. Con objeto de establecer las características composicionales, químicas y mineralógicas, así como las capacidades de cambio de los materiales se han elegido 9 muestras representativas de las litofacies en los tres tramos.

Metodología analítica

La metodología detallada en la preparación de muestras para cada una de las técnicas analíticas empleadas se recoge en Pozo et al. (1999b). El estudio mineralógico se ha realizado mediante DRX y ATD-TG y los análisis químicos por diversas técnicas que incluyen FRX e ICP.

En el análisis petrográfico de las muestras bentónicas seleccionadas se han estudiado 50 láminas delgadas, siguiendo en las descripciones micromorfológicas la terminología de Bullock et al. (1985). La microfábrica se ha estudiado mediante MEB en 6 muestras no disturbadas. En dos muestras representativas se ha realizado el análisis granulométrico mediante difracción de rayo laser.

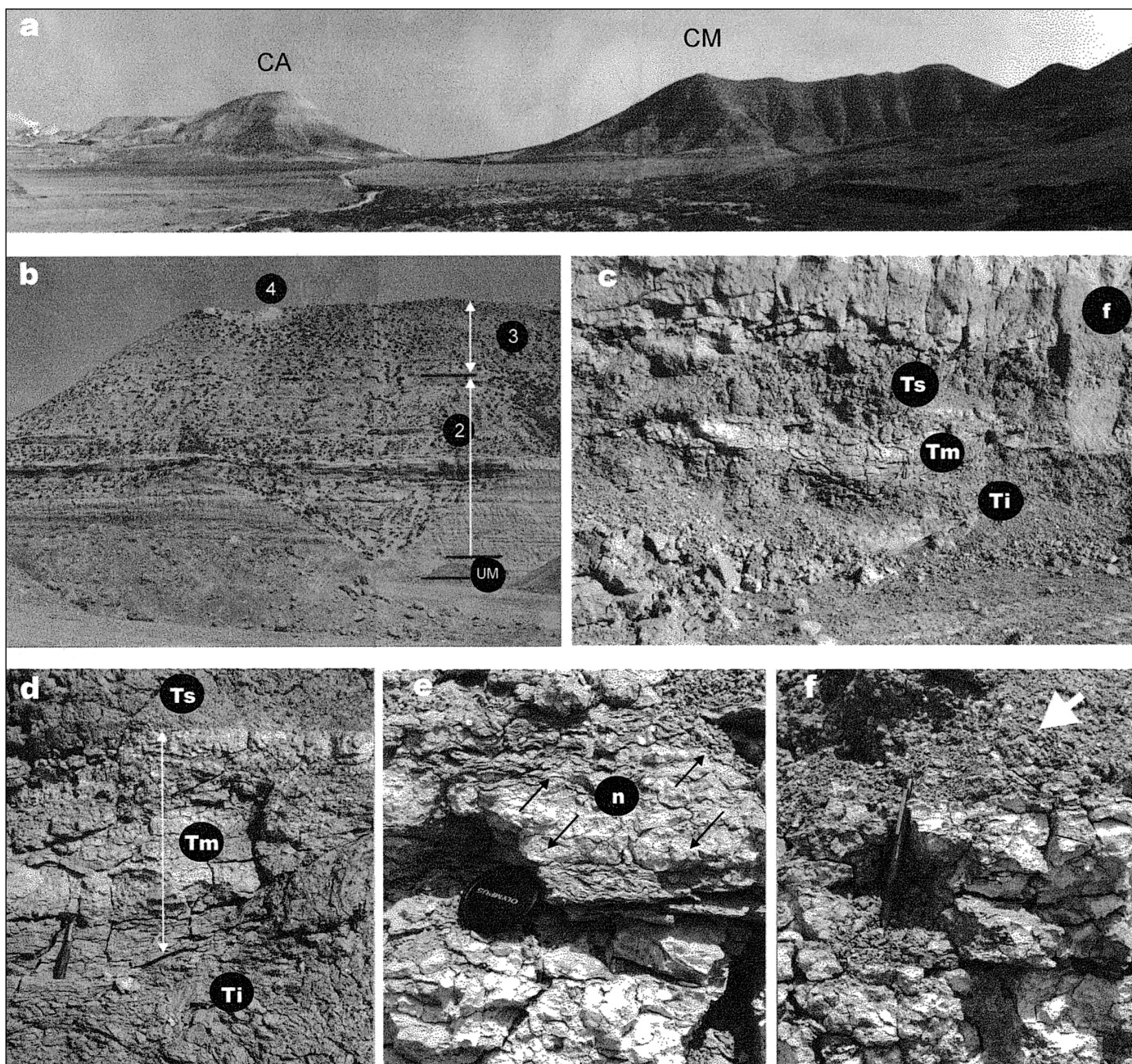


Fig. 2. a) Vista panorámica de los cerros del Águila (izquierda) y Monte (derecha), donde se observa la disposición horizontal de los estratos que se integran en las unidades litológicas diferenciadas. En primer plano, facies siliciclásticas de la unidad U1. b) Afloramiento y frente de cantera mostrando el contacto entre las unidades U2, U3 y U4. Obsérvese la posición de la unidad magnésica (UM) en la base de la unidad U2. c) Afloramiento mostrando los tres tramos que integran la Unidad Magnésica: inferior (Ti), medio (Tm) y superior (Ts). Es notable la morfología lentejona del tramo medio y los contactos alabeados controlados por los "slickensides". En la parte derecha de la foto se reconoce un antiguo pozo de actividad minera (f). d) Detalle de la fotografía anterior mostrando el carácter laminado de la lutita en la base del tramo medio (Tm) y el contacto erosivo de éste con el tramo superior (Ts) a techo. e) Detalle de lutitas rosáceas con evidencias de nodulización (n) y rellenos en grietas de lutitas laminadas (flechas). e) Techo del tramo medio y base del superior. Se observan en el primero evidencias de desecación y en el segundo el retrabajamiento de intraclastos de lutita rosácea (flecha)

Fig. 2. a) Scenery view of Águila (left) and Magán (right) Hills. The horizontal bedding shown by the different units is clearly observed. In foreground siliciclastic facies (U1) are observed. b) Quarry front showing the boundaries among the U2, U3 and U4 units. c) Outcrop showing the lower unit (Ti), middle unit (Tm) and upper unit (Ts) differentiated in the magnesian unit. It is noteworthy the lenticular geometry of Tm and warped boundaries controlled by slickensides. Toward the right side of the picture, an ancient mining pit (f) can be identified. d) Detail of the figure 2c where both laminated lutites at the base and erosive boundary at top are shown. e) Close-up view of pink lutites showing nodulization (n) and infilling in cracks by laminated green clays (arrows). f) Boundary between Tm and Ts top showing desiccation traces and reworked pink lutite intraclasts (arrow), respectively

Aspectos composicionales

Mineralogía global del depósito

Mineralógicamente se han establecido tres asociaciones que coinciden con los tramos diferenciados en el trabajo de campo.

a) *Bentonitas verdes* (tramo inferior): Filosilicatos (esmectita trioctaédrica > illita > sepiolita) > cuarzo-feldespatos.

La proporción en filosilicatos es en general superior al 90%, aunque en algún nivel contaminado por detríticos, descende al 75%. Consecuentemente, el contenido en cuarzo y feldespatos (plagioclasas predominantes) es bajo (<5%), con la excepción mencionada donde unidos alcanzan el 25%. Son escasos los

carbonatos, apenas detectados en DRX, aunque al microscopio se ha observado la presencia de calcita. En la fracción arcilla predomina la esmectita trioctaédrica en porcentajes superiores al 80%, con illita subordinada. La sepiolita es muy escasa (<5%) excepto en muestras con desarrollo de brechas de desecación, donde puede alcanzar el 25%.

b) *Lutitas sepiolíticas rosas*: Filosilicatos (sepiolita-esmectita trioctaédrica >> illita) > cuarzo-feldespatos ± ópalo C-T.

Predominan los filosilicatos, con porcentajes próximos al 100%, excepto en niveles basales laminados y niveles a techo con rellenos de lutitas verdes, donde cuarzo y feldespatos pueden alcanzar, en conjunto, el 20%.

En la fracción arcilla predomina generalmente la sepiolita, siempre acompañada de esmectita trioctaédrica. La escasa illita (<10%) aparece casi exclusivamente a techo del tramo, junto con el mencionado incremento en cuarzo y feldespatos. El estudio por separado de las morfologías nodulosas e intercalaciones laminadas asociadas, pone de manifiesto, en ambas, el predominio de sepiolita, lo que indica, al menos, dos generaciones del mineral fibroso.

c) *Bentonitas verdes con intraclastos rosáceos* (tramo superior): Filosilicatos (esmectitas tri-dioctaédricas>illita>caolinita ± sepiolita) > cuarzo-feldespatos.

Los filosilicatos superan el 90%, con proporciones de cuarzo y feldespatos inferiores al 10%. En la fracción arcilla destaca el carácter mixto di-trioctaédrico de la fase principal que es la esmectita, con illita subordinada e indicios de caolinita. La sepiolita se asocia a los intraclastos dispersos en la bentonita, especialmente en la base del tramo.

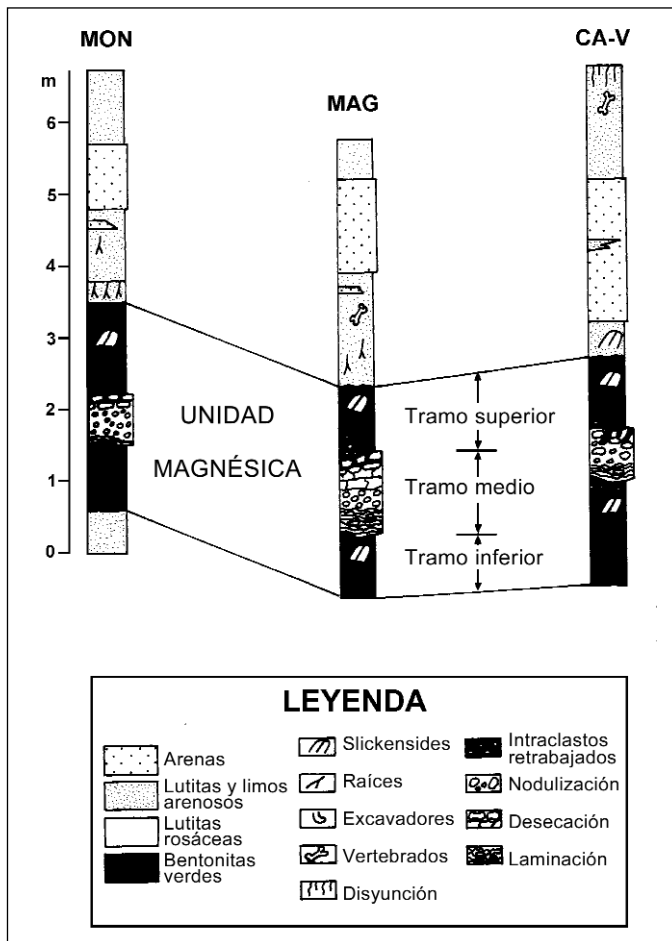


Fig. 3. Correlación de tres de las secciones representadas en la figura 1c (MON, MAG y CA-V). Obsérvense los tres tramos diferenciados en la Unidad Magnésica y la presencia generalizada de aportes detríticos a techo

Fig. 3. Stratigraphic correlation of three lithological sections located in figure 1c. The units differentiated in the Magnesian Unit and the presence of generalised detrital deposits at top are shown

Estudio mineralógico de las muestras seleccionadas

Difracción de rayos X

Bentonitas verdes (MAG-1, MAG-2, CA-1-1, CA-1-2 y CA-2-2)

Se caracterizan por la presencia mayoritaria de filosilicatos, con espaciados muy intensos a 14 Å y otros dos menores a 4.56 y 2.58 Å. Las reflexiones correspondientes al espaciado d(060) se presentan entre 1.524 y 1.531 Å, indicando el carácter netamente trioctaédrico de las muestras. El cuarzo se presenta en pequeñas proporciones, así como los feldespatos, principalmente plagioclasas (figura 5a). El estudio de los diagramas orientados y glicolados permite identificar la esmectita como mineral mayoritario, expandiendo a 17-17.5 Å tras tratar con etilengli-

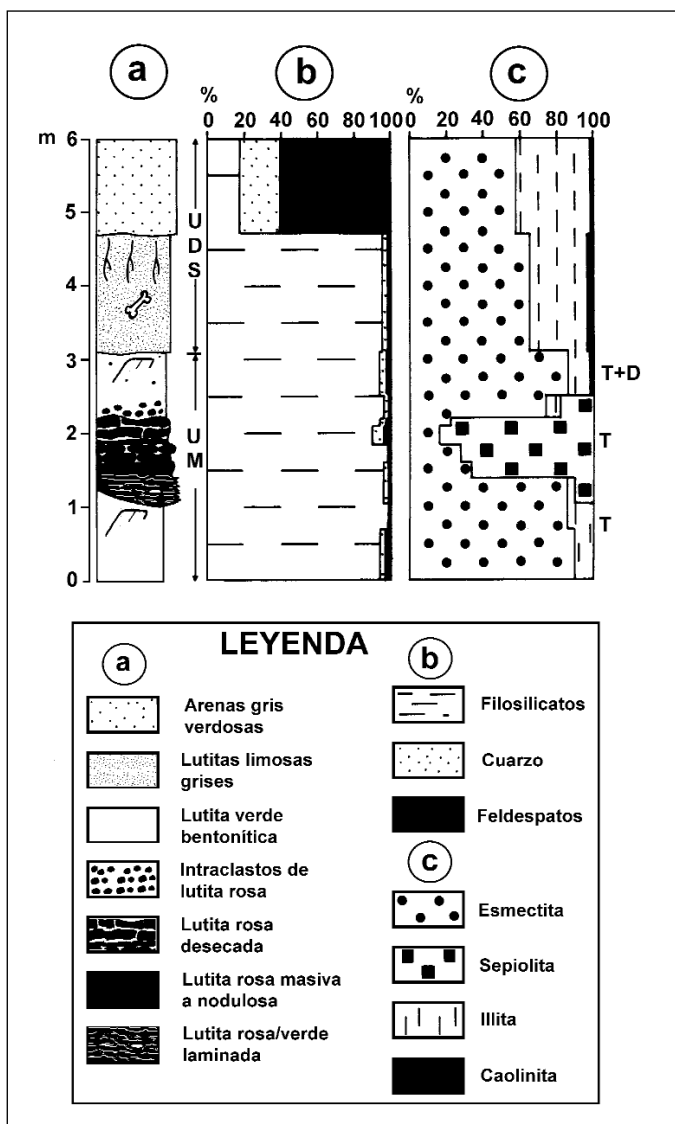


Fig. 4. Sección litológica tipo en el sector de Villaluenga-Magán (a), mostrando la distribución mineralógica total (b) y de fracción arcilla (c). UDS. Unidad detrítica superior. UM. Unidad Magnésica. T: Trioctaédrica; D: Dioctaédrica. (Símbolos como en la figura 3)
 Fig. 4. Lithological section type in Villaluenga-Magán zone (a) showing bulk mineralogical composition (b) and the composition of the clay fraction (c). UDS. Upper detrital unit. UM. Magnesian unit. T: Trioctahedral; D: Dioctahedral (Symbols as in figure 3)

col (figura 6a) y colapsa a 10 Å al calcinar a 550°C. En alguna muestra se han identificado pequeñas cantidades de sepiolita. La cristalinidad de la esmectita es elevada, con índices de Biscaye oscilando entre 0.83 y 0.89.

Lutitas rosas sepiolíticas (MAG-3, MAG-4 y CA-V-2)

Los diagramas de polvo presentan una intensa reflexión asimétrica en torno a 12.5 Å así como otras más débiles en 4.5 y 2.57 Å. Las reflexiones en 4.27 y

3.34 Å permiten identificar el cuarzo y las de 3.24 y 3.19 Å feldespatos potásicos y plagioclasas (figura 5b). En los diagramas correspondientes a muestra glicolada se observan dos intensas reflexiones: una que permanece en torno a 12.5 Å y otra desplazada hasta 17 Å, que corresponden respectivamente a sepiolita y a esmectita (figura 6b). La proporción de ambos minerales varía en las muestras de este tramo, como puede observarse en la figura 5c, en que el pico se presenta a 14 Å con un pequeño resalte hacia 12.5 Å que se desdobra en dos a 17 y 12.55 Å en los diagramas de muestras glicolada (figura 6c). La cristalinidad de las esmectitas es algo inferior a la del tramo anterior, pues los índices de Biscaye varían entre 0.76 y 0.80.

Aunque globalmente la sepiolita es el mineral predominante, es posible observar una variación lateral de sus contenidos, que se incrementan notablemente desde CA-1 a CA-V inversamente a la esmectita. La esmectita es trioctaédrica, mostrando una disminución de su cristalinidad conforme se incrementa la proporción de sepiolita, lo que coincide además con la práctica desaparición de la illita.

Bentonitas verdes con intraclastos rosáceos (muestra MAG-8)

Los diagramas de difracción presentan una reflexión intensa a 14.5 Å y otras menos marcadas a 4.5 y 2.56 Å correspondientes a filosilicatos. Se presenta también cuarzo (4.26 y 3.34 Å) y feldespatos, potásicos (3.24 Å) y calcosódicos (3.19 Å). Los filosilicatos son, mayoritariamente de carácter trioctaédrico (1.537 Å) pero con cierta proporción de dioctaédricos (1.504 Å) (figura 5d)

En cuanto a los minerales de la arcilla, predominan las esmectitas, como evidencia el neto hinchamiento a 17 Å, acompañada de pequeñas cantidades de illita (9.92 Å) (figura 6d). No se han observado en esta muestra indicios de sepiolita. La esmectita presenta una buena cristalinidad, con índices de Biscaye del orden de 0.82.

Análisis térmico diferencial y termogravimétrico (ATD-TG)

En función del comportamiento térmico de las muestras seleccionadas (Tabla 1), se han establecido dos tipos en las bentonitas verdes, compuestas exclusivamente por filosilicatos 2:1 y un tercero en las lutitas rosas sepiolíticas.

Tipo 1 (MAG-1) (Figura 7a). Se caracterizan por presentar un doblete de picos endotérmicos a temperaturas entre 90-200°C y entre 820-830°C. Estos endotérmicos corresponden a las temperaturas de pérdida

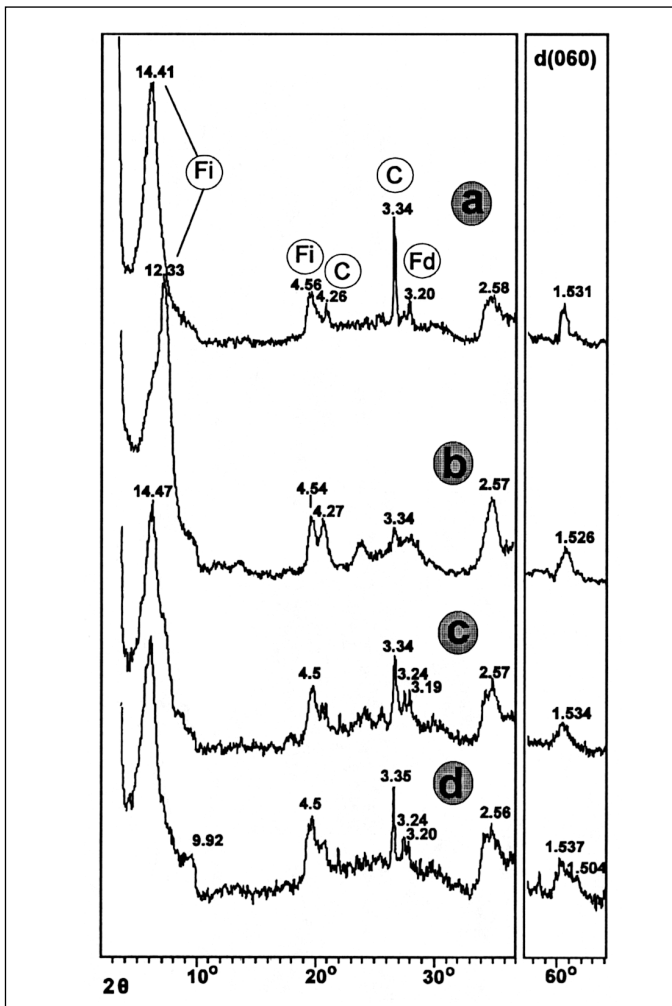


Fig. 5. Diagramas de rayos X representativos de las litofacies. Muestras en polvo con indicación de los espaciados (Å); a la derecha se incluye la región correspondiente a d(060). a) Bentonita verde masiva. b) Lutita rosácea. c) Bentonita verde transicional. d) Bentonita verde con intraclastos. Fi. Filosilicatos. C. Cuarzo. Fd. Feldspatos

Fig. 5. Representative X-ray diagrams of powder samples indicating d spacing (Å), toward right d (060) region is shown. a) Massive green bentonite. b) Pink lutite. c) Transitional green bentonite. d) Green bentonite with intraclasts. Fi. Phyllosilicates. C. Quartz. Fd. Feldspars

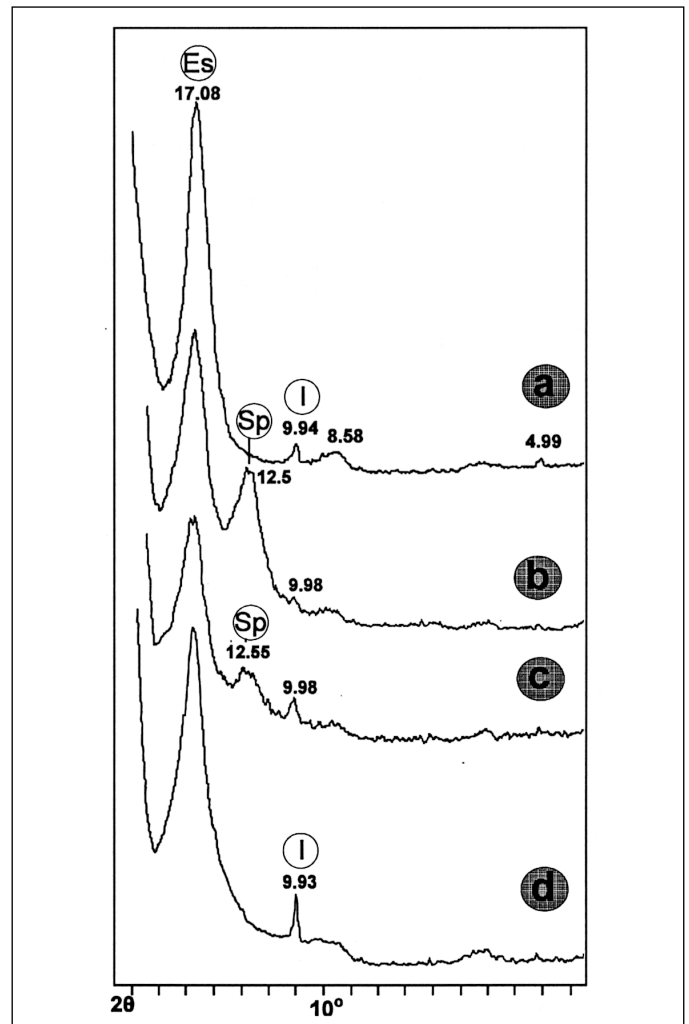


Fig. 6. Diagramas de rayos X representativos de las litofacies. Muestras de fracción arcilla (<2 μm), agregados orientados solvados con etilenglicol (espaciados en Å). a) Bentonita verde masiva. b) Lutita rosácea. c) Bentonita verde transicional. d) Bentonita verde con intraclastos. ES : Esmectita. I: Illita. Sp: Sepiolita

Fig. 6. Representative X-ray diagrams. Clay fraction samples (<2 μm), oriented aggregates solvated with etyleneglycol. (d-spacing in Å). a) Massive green bentonite. b) Pink lutite. c) Transitional green bentonite. d) Green bentonite with intraclasts. ES. Smectite. I. Illite. Sp. Sepiolite

| Muestra | ATD | TG (pérdidas en %) | | | | TOTAL |
|---------|-----------------------------------|--------------------|-------------|-------------|--------------|-------|
| | | (20-105°C) | (105-200°C) | (200-770°C) | (770-1000°C) | |
| MAG-1 | 90 (-), 197 (-), 651 (+)826 (-) | 7.38 | 3.10 | 2.98 | 2.42 | 15.88 |
| MAG-2 | 95 (-), 823 (-), 835 (+) | 7.91 | 3.54 | 3.14 | 2.51 | 17.17 |
| MAG-4 | 95(-),319(-),355(+),798(-),833(+) | 7.86 | 2.86 | 4.50 | 2.17 | 17.39 |
| MAG-8 | 94 (-), 831 (-), 843 (+) | 8.19 | 4.12 | 3.22 | 1.67 | 17.22 |
| CA-1-2 | 94 (-), 190 (-), 823 (-), 838 (+) | 8.14 | 3.81 | 2.69 | 2.37 | 17.01 |

Tabla 1. Análisis térmico diferencial (ATD) y termogravimétrico (TG) de muestras seleccionadas
Table 1. Differential thermal analysis (DTA) and Thermogravimetry (TG) of selected samples

de agua ceolítica y deshidroxilación respectivamente, siendo mucho más intenso el primero. El rango de temperaturas de pérdida del agua estructural (deshidroxilación) se corresponde con el de esmectitas trioctaédricas (saponita y/o estevensita).

Tipo 2 (MAG-2, MAG-8, CA-1-2) (Figura 7b). Presenta, como el tipo anterior, un endotérmico entre 90-95°C y otro a temperaturas más altas entre 820-830°C, pero además un exotérmico en el rango 830-845°C. Este último corresponde a la descomposición térmica de la muestra, que da lugar a fenómenos de recristalización con neoformación de fases de alta temperatura, en este caso de enstatita. Como en el tipo 1, la existencia de un solo endotérmico a altas temperaturas indica la ausencia de láminas brucíticas desordenadas en la esmectita trioctaédrica.

Tipo 3 (MAG-4) (Figura 7c). Incluye una serie de endotérmicos a baja (<100°C), media (350-600°C) y alta temperatura que, junto al exotérmico a 833°C, indican la presencia de sepiolita, además de una esmectita trioctaédrica. El perfil escalonado de la curva del TG refleja la presencia del mineral fibroso.

El análisis termogravimétrico de las muestras indica pérdidas totales (20-1000 °C) muy próximas, entre 15,81 y 17,88%, observándose los valores más bajos en la bentonita de tipo 1. Las pérdidas de agua ceolítica (adsorbida y de hidratación de cationes interlaminares) entre 20-200°C, varía entre 10,48 y 12,26%, en función de la cristalinidad y del catión de cambio predominante, observándose una mayor pérdida en las bentonitas de tipo 2, mientras que los tipos 1 y 2 presentan valores similares. En las esmectitas trioctaédricas la pérdida del agua estructural tiene lugar entre 770-1000°C. Los valores obtenidos, entre 1,67 y 2,51%, quedan muy por debajo del valor teórico, alrededor del 5%, por lo que se infiere que la pérdida de agua estructural se produce a temperaturas más bajas. Como ya se determinó en las bentonitas del Sector de Cabañas de la Sagra-Yunclillos (Pozo *et al.* 1999b), la deshidroxilación de estas bentonitas tiene lugar en un amplio rango de temperaturas que debe iniciarse en torno a los 300°C.

Características químicas

Análisis químicos

Los resultados obtenidos en los análisis químicos en las muestras seleccionadas se recogen en la tabla 2. Destaca la proporción de MgO, que oscila entre 15,96 y 22,88%, observándose los contenidos mayores en muestras de lutitas rosas sepiolíticas (MAG-4) o laminadas transicionales (CA-V-2, MAG-3). Por el contra-

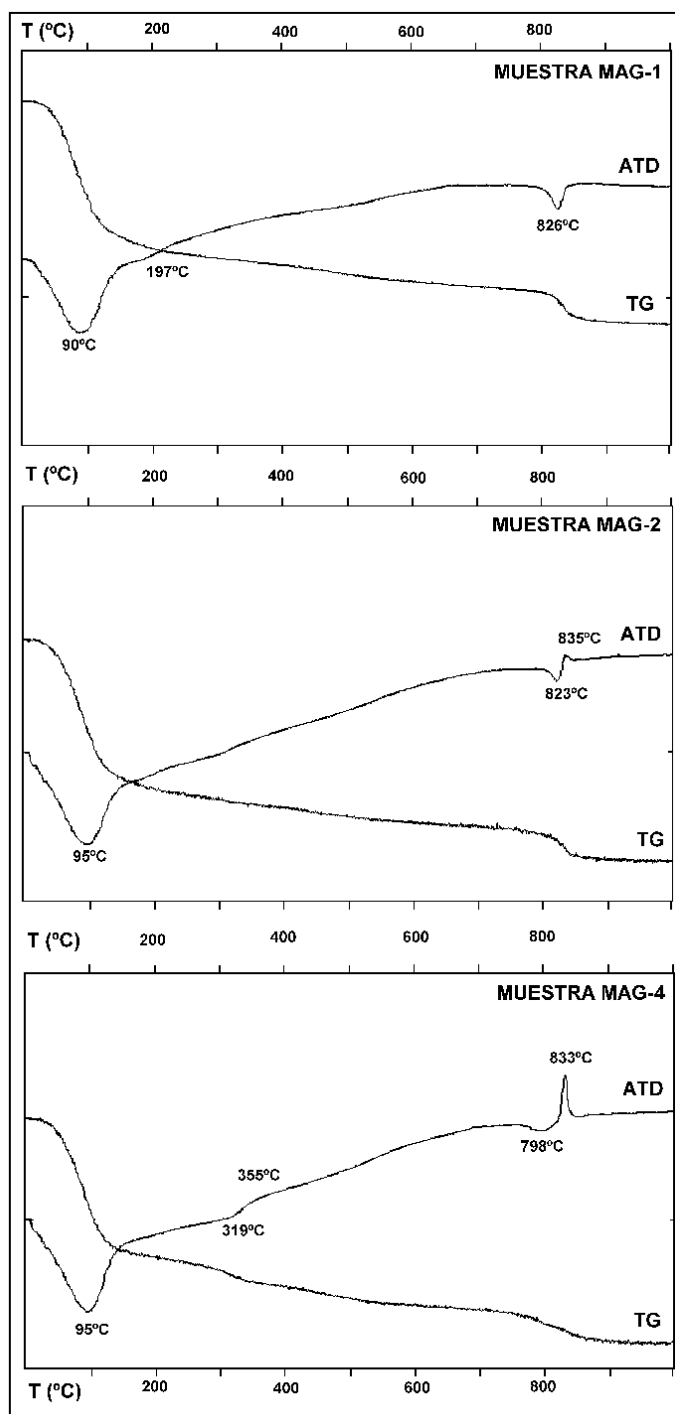


Fig. 7. Análisis térmico diferencial y termogravimétrico. Se observan los tres tipos de comportamiento térmico en bentonitas (a y b) y en lutitas sepiolíticas (c)

Fig. 7. Differential thermal analysis and thermogravimetric analysis. Three types of thermal behaviour can be observed in bentonites (a and b) and in sepiolitic lutites (c)

rio, en estas muestras se detectan las proporciones más bajas de Al₂O₃, Fe₂O₃ y K₂O, que están asociados

| Muestra | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | TiO ₂ | MnO | K ₂ O | MgO | Na ₂ O | P ₂ O ₅ | ppc | SiO ₂ /MgO molar |
|---------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------------------|------|------------------|-------|-------------------|-------------------------------|-------|-----------------------------|
| CA-1-1 | 49.76 | 7.02 | 2.72 | 0.54 | 0.44 | 0.04 | 1.55 | 19.17 | 0.73 | 0.01 | 18.01 | 1.74 |
| CA-1-2 | 46.96 | 6.41 | 2.48 | 0.71 | 0.42 | 0.03 | 1.07 | 21.91 | 0.56 | 0.02 | 19.43 | 1.44 |
| CA-2-2 | 50.29 | 8.12 | 2.90 | 0.67 | 0.52 | 0.03 | 1.65 | 17.58 | 0.81 | 0.01 | 17.43 | 1.91 |
| CA-V-2 | 49.81 | 5.63 | 2.13 | 0.50 | 0.36 | 0.02 | 1.24 | 20.68 | 0.73 | <0.01 | 18.90 | 1.62 |
| MAG-1 | 50.35 | 6.20 | 2.69 | 0.78 | 0.21 | 0.03 | 1.15 | 19.40 | 0.59 | 0.02 | 18.57 | 1.75 |
| MAG-2 | 48.96 | 4.92 | 1.98 | 0.64 | 0.27 | 0.03 | 0.65 | 21.43 | 0.27 | 0.01 | 20.82 | 1.53 |
| MAG-3 | 49.63 | 3.63 | 1.39 | 0.52 | 0.20 | 0.02 | 0.41 | 22.22 | 0.61 | 0.01 | 21.35 | 1.50 |
| MAG-4 | 51.07 | 2.56 | 0.94 | 0.45 | 0.15 | 0.02 | 0.29 | 22.88 | 0.29 | 0.01 | 21.32 | 1.50 |
| MAG-8 | 47.95 | 9.59 | 3.71 | 0.76 | 0.48 | 0.04 | 1.58 | 15.96 | 0.48 | 0.03 | 19.40 | 2.01 |

Análisis químicos de elementos mayores y menores en muestra total

| Muestra | Rb | Sr | Zr | Ba | Cr | Nb | V | Zn | Y | Li | F |
|---------|-----|-----|----|-----|----|----|----|----|----|-----|-------|
| MAG-1 | 50 | 106 | 88 | 108 | 16 | 13 | 33 | 51 | 12 | 420 | 3.200 |
| MAG-2 | 52 | 109 | 90 | 80 | 30 | 14 | 30 | 46 | 10 | 450 | 3.500 |
| MAG-3 | 34 | 89 | 82 | 59 | 32 | 12 | 30 | 36 | 5 | 390 | 6.500 |
| MAG-4 | 26 | 71 | 77 | 59 | 20 | 11 | 32 | 32 | 5 | 380 | 6.300 |
| MAG-8 | 108 | 133 | 88 | 154 | 36 | 16 | 46 | 72 | 15 | 310 | 2.100 |

Análisis químicos de elementos traza en muestra total

Tabla 2. Análisis químicos de elementos mayores, menores y trazas realizados sobre muestra total
 Table 2. Chemical analysis of major, minor and trace elements in bulk sample

a componentes detríticos. La baja proporción de CaO (0,45-0,78%) indica la práctica ausencia de carbonatos, como se observó en el estudio por DRX. En los elementos traza es reseñable el contenido de F en las lutitas rosáceas donde alcanzan 6.500 ppm, mientras que en las bentonitas verdes no superan las 3.500 ppm. Se observa asimismo un empobrecimiento en Li (<400 ppm) en las lutitas rosáceas y bentonitas verdes del tramo superior.

En la figura 8 se muestra la distribución en la vertical de los elementos más significativos, en una sección representativa del depósito de Villaluenga-Magán, y su comparación con datos de cristalinidad de la esmectita y capacidad total de cambio (CEC).

Fórmulas cristalóquímicas

El análisis químico de dos muestras en fracción inferior a 2 µm y saturadas en Sr²⁺ ha permitido el cálculo de las fórmulas cristalóquímicas representativas de esmectitas (tabla 3). Se trata de saponitas con una carga laminar de 0.68-0.69 y carga tetraédrica variable entre -0.54 y -0.69. Destaca también en ellas la existencia de huecos en capa octaédrica oscilando entre 0.31 y 0.25 por fórmula.

Estas fórmulas estructurales son muy parecidas a las calculadas por nosotros (Pozo *et al.*, 1999b) para las saponitas de la zona de Cabañas-Yuncillos, si bien en aquellas la carga global era algo menor, lo que se justificaba como consecuencia de la existencia de kerolita-estevensita. Pequeñas cantidades de estevensita deben estar presentes también en las muestras analizadas en este trabajo, lo que justificaría la existencia de huecos en capa octaédrica y cierta proporción de carga octaédrica.

Resultados similares se han visto en trabajos publicados en la zona. Así, De Santiago *et al.* (1998) calculan una fórmula estructural media para las saponitas del Cerro del Águila con una carga laminar de -0.28 (para 11 oxígenos) y una ocupación octaédrica de sólo 2.51 (para 11 oxígenos). Cuevas *et al.* (2001) corrigen el contenido en sepiolita (12%) y obtienen una fórmula más próxima a las calculadas por nosotros, con una carga laminar de 0.9 y una ocupación octaédrica de 5.40.

Capacidades de cambio (CEC) y cationes de cambio

Los valores obtenidos en las muestras analizadas se recogen en la tabla 4. Las capacidades de cambio, dada la composición mineral de las muestras, oscilan

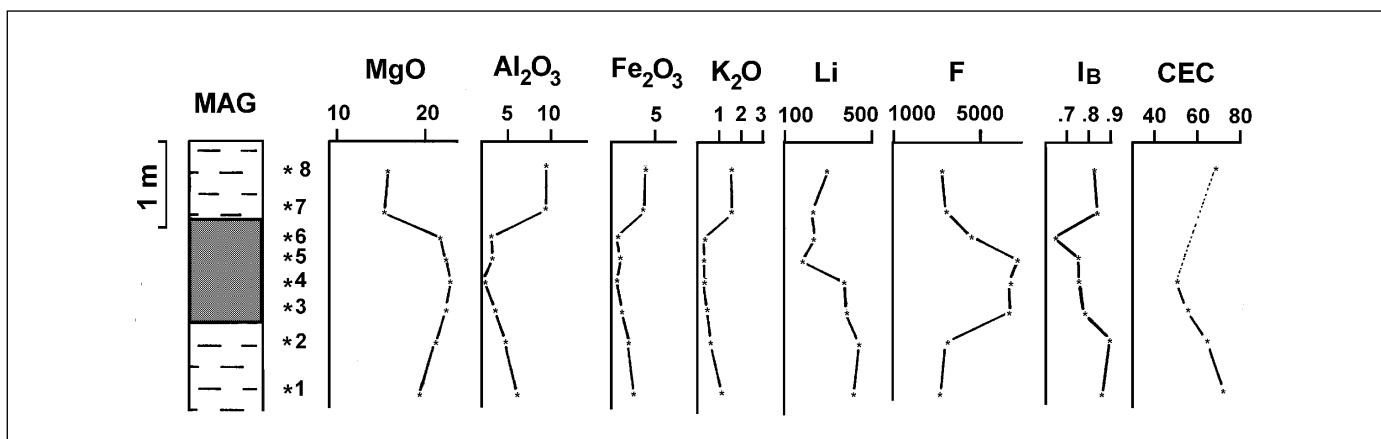


Fig. 8. Sección tipo del depósito de bentonita de Villaluenga-Magán, mostrando la distribución de los elementos químicos más significativos y su comparación con la cristalinidad de la esmectita, (índice de Biscaye, IB) y la capacidad de cambio total (CEC) en cmol(+). Kg⁻¹. MgO, Al₂O₃, Fe₂O₃ y K₂O se expresan en %, Li y F en ppm

Fig. 8. Representative lithological section of Villaluenga-Magán bentonite deposit showing the distribution of the most representative chemical elements and their comparison with smectite crystallinity (Biscaye index, IB) and total exchange capacity (CEC) in cmol(+). Kg⁻¹. MgO, Al₂O₃, Fe₂O₃ and K₂O are expressed in %, Li and F in ppm

ampliamente, entre 40.0 y 82.7 (cmol (+). Kg⁻¹), con los valores más altos en las muestras claramente bentoníticas, como CA-1-2 y CA-2-2, y los más bajos en las lutitas rosas, donde, dado su carácter esencialmente sepiolítico, las capacidades de cambio bajan hasta valores de 40 - 45.3. La composición intermedia de algunas muestras (CA-V-2) queda reflejada en su capacidad de cambio. Este hecho es el resultado lógico de la relación directa existente entre la carga total (estructural + superficial) de la arcilla y la concentración de cationes, tanto interlaminares como de capas superficiales, responsable de la capacidad de cambio resultante. Entre los cationes de cambio hay un predominio de Mg²⁺ y Ca²⁺ y muy subordinados Na⁺ y K⁺.

Estudio textural de las litofacies bentoníticas y asociadas

Características petrográficas

El estudio petrográfico de 50 muestras se ha realizado en los tres tipos litológicos principales diferenciados en el campo: bentonitas, lutitas transicionales y lutitas sepiolíticas.

Bentonitas. Se incluyen los rasgos texturales observados en muestras de bentonita de los tramos superior e inferior de la Unidad Magnésica. Aunque son, predominantemente, bentonitas, mediante DRX se ha constatado una relación entre la existencia de rasgos de exposición (grietas de desecación) y la presencia de sepiolita en proporción superior al 15%. A

partir del estudio petrográfico se han establecido en las bentonitas tres texturas principales:

a) Textura masiva (Figura 9A). Es la textura predominante, se caracteriza por presentar un aspecto homogéneo de agregados micro o criptocristalinos (chert-like), con un bajo contenido en granos detriticos (<10%), fundamentalmente cuarzo redondeado y feldespatos (microclina, plagioclasa). Estos minerales pueden incrementarse notablemente en la base del tramo inferior, mientras que en el superior destaca la alta proporción en minerales micáceos en las fracciones finas (limo-arcilla), que confieren un aspecto menos limpio a la masa arcillosa. En general la porosidad es baja, reconociéndose fábricas birrefringentes (b-fabric) de tipo granoestriado, biestriado y, más raramente, poroestriado. En algunas muestras se han identificado morfologías de bioturbación que destruyen la textura original (excavadores) de la lutita y provocan un aumento de la porosidad (raíces), y, asociada a esta, argilanes e indicios de carbonatos en agregados fibrosos.

Asociados al tramo inferior de bentonitas se reconocen rellenos lutíticos microlaminados (Figura 9B), de espesor inferior a 1 μm, y evidencias de compactación (laminación turbulenta), que afecta a intraclastos lutíticos elongados y pequeños granos siliciclásticos (<100 μm). La microlaminación aparece enfatizada por material geliforme, posiblemente relacionado con materia orgánica. A techo del tramo, estas intercalaciones presentan más relevancia, alcanzando hasta 1 cm de grosor en materiales con evidencias de brechificación por desecación.

| Muestra | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | TiO ₂ | MgO | MnO | CaO | K ₂ O | Na ₂ O | SrO | Li ₂ O | PPC |
|---------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|-------|------|------|------------------|-------------------|------|-------------------|-------|
| Ca-1-2 | 48.46 | 6.98 | 2.60 | 0.31 | 21.74 | 0.03 | 0.12 | 0.70 | 0.15 | 3.16 | 0.05 | 12.61 |
| Mag-2 | 47.40 | 5.55 | 2.12 | 0.22 | 20.96 | 0.02 | 0.09 | 0.48 | 0.14 | 3.22 | 0.05 | 17.10 |

Análisis químicos de fracción menor de 2 µm tras saturación de las muestras con SrCl₂

| | |
|--------|---|
| CA-1-2 | [Si _{7.31} Al _{0.69}] [Al _{0.23} Fe ³⁺ _{0.23} Ti _{0.03} Mg _{5.24} Li _{0.03}] O ₂₀ (OH) ₄ Ca _{0.02} Na _{0.04} Sr _{0.30} C. IV=-0.69 C. VI=+0.01 Cat.VI=5.75 X ⁻ =0.68 |
| Mag-2 | [Si _{7.46} Al _{0.54}] [Al _{0.24} Fe ³⁺ _{0.20} Ti _{0.03} Mg _{5.19} Li _{0.03}] O ₂₀ (OH) ₄ Ca _{0.01} Na _{0.03} Sr _{0.32} C. IV=-0.54 C. VI=-0.15 Cat.VI=5.69 X ⁻ =0.69 |

Número de cationes calculados sobre la base de 22 oxigenos
Corregido el pequeño contenido en K como illita detectada por D.R.X. Se utilizó para ello la fórmula promedio obtenida de la región:
[Si_{6.46} Al_{1.54}] O₂₀ (OH)₄ [Al_{2.71} Fe_{0.90} Mg_{0.62} Mn_{0.01}] K_{1.42} Ca_{0.01} Na_{0.01}, calculada a partir de los análisis de Domínguez (1994)

Tabla 3. Análisis químicos de elementos mayores de fracción menor de 2 µm y fórmulas mineralógicas calculadas
Table 3. Chemical analysis of <2 µm and calculated mineralogical formulae

| Muestra Litología | I. B.* | SiO ₂ /MgO | CEC | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Na ⁺ | K ⁺ |
|------------------------------------|--------|-----------------------|------|------------------|------------------|-----------------|----------------|
| CA-1-1 Bentonita verde masiva | 0.85 | 1.74 | 62.8 | 16.9 | 35.6 | 4.0 | 1.5 |
| CA-1-2 Bentonita verde masiva | 0.88 | 1.44 | 82.7 | 22.8 | 47.1 | 4.6 | 1.6 |
| CA-2-2 Bentonita verde laminada | 0.83 | 1.91 | 71.4 | 30.4 | 31.9 | 6.2 | 2.4 |
| CA-V-2 Bentonita verde/rosa masiva | 0.80 | 1.62 | 52.7 | 22.2 | 25.1 | 3.5 | 1.9 |
| MAG-1 Bentonita verde masiva | 0.85 | 1.75 | 71.2 | 30.7 | 30.4 | 7.3 | 2.8 |
| MAG-2 Bentonita verde masiva | 0.89 | 1.53 | 63.8 | 28.7 | 25.2 | 7.8 | 2.1 |
| MAG-3 Lutita rosa/verde laminada | 0.78 | 1.50 | 45.3 | 19.3 | 18.5 | 6.0 | 1.5 |
| MAG-4 Lutita rosácea | 0.76 | 1.50 | 40.0 | 17.6 | 14.1 | 7.1 | 1.2 |
| MAG-8 Bentonita con intraclastos | 0.82 | 2.01 | 69.1 | 29.7 | 29.7 | 6.7 | 3.0 |

*Indices de Biscaye de esmectitas

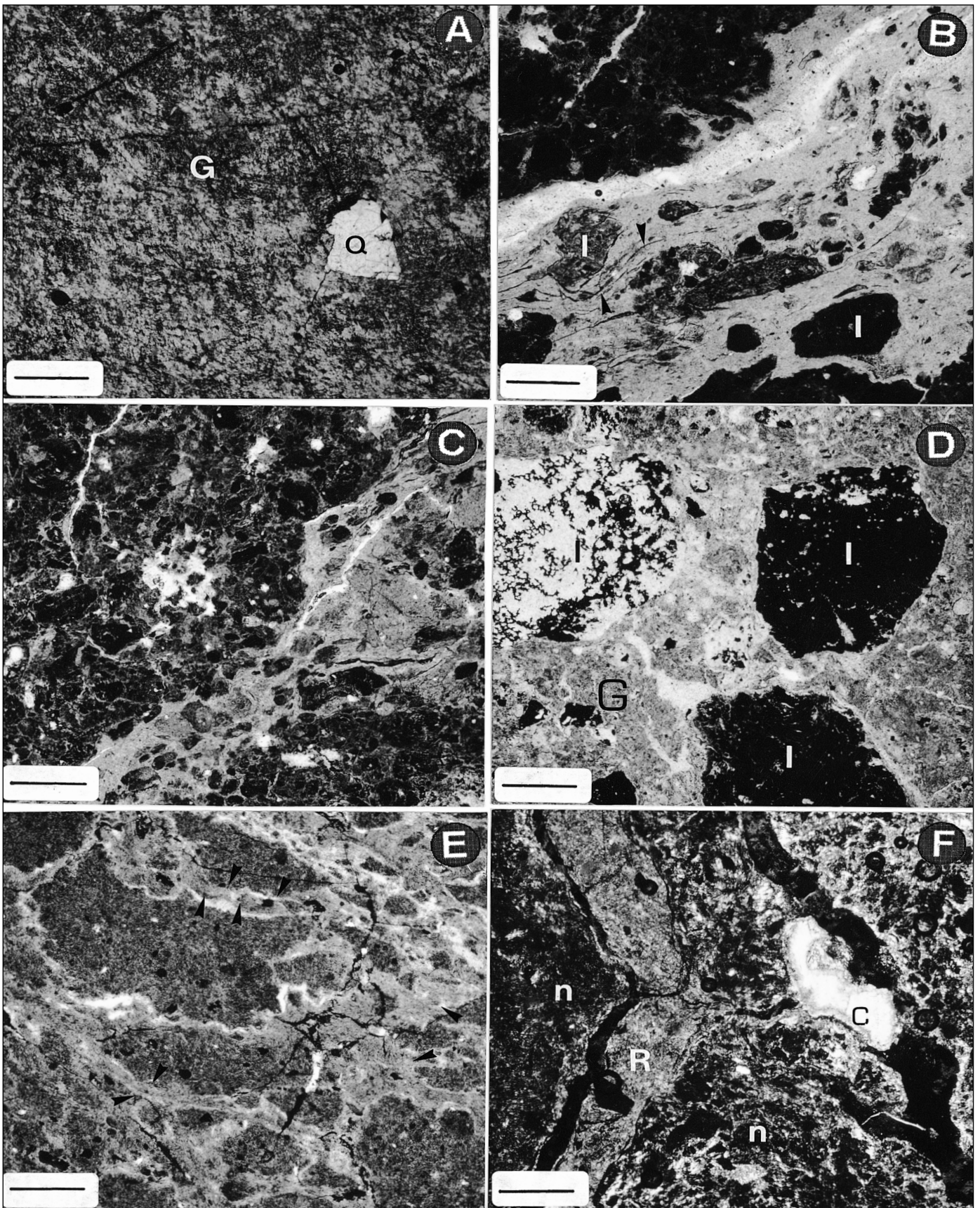
Tabla 4. Índices de Biscaye, relaciones molares SiO₂ /MgO y capacidades de cambio catiónico de las muestras seleccionadas
Table 4. Biscaye index, molar relation SiO₂ /MgO and cation exchange capacity (CEC) of selected samples

La granulometría de una muestra representativa de esta textura se recoge en la figura 10a.

b) Textura granular (Figura 9C). Es poco frecuente, y se asocia al tramo inferior. Se caracteriza por presentar abundantes morfologías clásicas (<1 mm, tamaño medio 0,35 mm) resultado de una pedalidad granular fina, debida a fenómenos de desecación y bioturbación de una bentonita con textura masiva. Estos gránulos se presentan grano-soportados, redondeados a subredondeados, a veces con acusadas variaciones de tamaño, nodulización en su interior, y frecuente desarrollo de recubrimientos arcillosos (coatings), que se disponen con fábricas

perpendiculares a la superficie afectada. Presentan porosidad de tipo canal y cavidad relacionadas con la actividad de organismos. En muestras procedentes del techo de la secuencia lutítica, esta textura puede presentar frecuentes grietas de desecación con relleños de las arcillas suprayacentes, reconociéndose además mayores evidencias de bioturbación de raíces y de organismos excavadores.

c) Textura intraclástica (Figura 9D). Se ha reconocido esta textura en las bentonitas del tramo superior. Petrográficamente se caracteriza por una textura clásica, constituida por una masa arcillosa de aspecto sucio (minerales micáceos) y escasa proporción de



detríticos finos (<100 µm), donde se detectan fábricas monoestriadas, granoestriadas y biestriadas. Dispersos en la masa arcillosa se disponen intraclastos angulosos a subredondeados de lutita sepiolítica (identificada mediante DRX), resultado del retrabajamiento del substrato infrayacente. En su interior se han observado evidencias de bioturbación (estriotúbulos, agrotúbulos), pudiendo presentar, envolviéndolos, recubrimientos arcillosos (coatings).

En la base del tramo, los clastos pueden superar 1 cm de diámetro, con gran variación de tamaños que decrecen progresivamente en tamaño y proporción en la vertical. A techo del tramo superior destaca la presencia de clastos retrabajados de pequeño tamaño (<2mm) que flotan en una pasta lutítica con evidencias de desecación y relleno de materiales suprayacentes originando una textura brechoide peculiar (Figura 9E). Estos rellenos muestran microlaminaciones y morfologías típicas de argilanes de iluviación. Estas bentonitas pueden presentar localmente intensa bioturbación (excavadores y raíces) y placas de carbonatos (0,4 mm) en grietas.

La granulometría de una muestra representativa de esta textura se recoge en la figura 10 b.

Lutitas transicionales. Comprenden las lutitas laminadas de la base del tramo medio que, composicionalmente, muestran grandes variaciones en la proporción de esmectita magnésica y sepiolita. Petrográficamente presentan texturas laminadas, unas veces con microlaminación homogénea (tamaño medio de lámina 70 µm), otras englobando lutitas con texturas masivas que confieren cierto aspecto "gnéisico". En ambas aparecen englobados clastos lutíticos de diverso tamaño, desarrollándose, como resultado de la compactación, una laminación turbulenta. Alrededor de los intraclastos se desarrollan arcillas neoformadas, que se disponen radialmente alrededor de los componentes afectados, lo que se puede interpretar como fenómenos de reemplazamiento de la esmectita trioctaédrica por sepiolita. El

estudio por DRX evidencia que tanto los intraclastos como los términos laminados pueden presentar elevadas proporciones de sepiolita, que se incrementa de base a techo de los términos laminados. El contenido en granos detríticos es en general bajo (<10%) observándose que, en muestras con proporciones mayores, tienden a acumularse en capas dentro de la laminación, predominando el cuarzo y los feldspatos.

Lutitas sepiolíticas. Dispuestas sobre las lutitas laminadas transicionales, presentan diversas texturas, predominando las de tipo granular, frecuentemente con abundante material geliforme asociado, que está ligado a la bioturbación de excavadores (agrotúbulos). La presencia de poros circulares y cilíndricos indica, además, actividad de raíces.

Otra textura frecuente es la masiva con diverso grado de nodulización, donde se reconocen fábricas biestriadas, poroestriadas y granoestriadas. A techo del tramo medio estas lutitas presentan sistemas de grietas de desecación con rellenos de lutitas laminadas (de tono más verdoso) que engloban fragmentos lutíticos (Figura 9F), formando a veces "coatings" en el borde del material afectado que se interpretan como rasgos cutánicos (argilanes). La presencia de carbonatos es escasa y queda restringida a pequeños agregados fibrosos en porosidades de desecación.

Microfábrica de las bentonitas

Bentonitas con textura masiva. Presentan microfábricas muy compactas de tipo matriz, sin orientación preferente y baja porosidad general (Figura 11A). En detalle, está constituida por microagregados de láminas de esmectita con disposición cara-cara y cara-borde, en general de bordes limpios (Figura 11B), pero que ocasionalmente pueden mostrar el desarrollo de incipientes fibras de pequeño tamaño (<5 µm).

Fig. 9. Principales texturas observadas en los depósitos arcillosos. A) Textura masiva. La masa arcillosa (G) presenta intensa orientación de arcillas (fábrica birrefringente) y granos detríticos dispersos (Q). (N+, barra 0.3 mm). B) Textura laminada en una bentonita masiva; se observa en ella una laminación turbulenta (flechas) que incluye intraclastos subredondeados lutíticos (I). (N//, barra = 0.3 mm). C) Textura granular. Se observan gránulos subredondeados que se disponen en fábricas granosoportadas relacionadas con procesos postsedimentarios (desecación, bioturbación). (N//, barra=0.3 mm). D) Textura intraclástica. Intraclastos sepiolíticos de tamaño arena (I) que se presentan dispersos en una masa arcillosa de composición distinta (G). (N//, barra = 0.3 mm). E) Textura brechoide relacionada con períodos de desecación. Se observa en grietas el relleno de arcillas microlaminadas (flechas). (N//, barra =0.3 mm). F) Lutita sepiolítica mostrando abundantes nódulos e inclusiones de amorfos (n). En grietas se observan rellenos de carbonatos (C) y de arcillas verdes (R). (N+, barra = 0.3 mm)

Fig. 9. Main textural types recognized in the clay deposits of Villaluenga-Magán. A) Massive texture. The groundmass (G) shows strong clay orientation (b-fabric) and scattered detrital grains (Q). (N+, bar= 0.3 mm). B) Laminated texture in massive bentonite; turbulent-lamination (arrows) including subrounded lutitic intraclasts (I) is observed. (N//, bar = 0.3 mm). C) Granular texture showing a grain-supported fabric of subrounded granules probably related to postsedimentary processes. (N//, barra=0.3 mm). D) Intraclastic texture. Sand-sized sepiolitic intraclasts (I) occur scattered in a clayey groundmass of different composition (G). (N//, bar = 0.3 mm). E) Brecciated texture related with desiccation events. Infilling the fissures microlaminated clays are observed (arrows). (N//, bar =0.3 mm). F) Sepiolitic lutite showing abundant nodules and amorphous inclusions (n). Carbonate (C) and green clays (R) infilling cracks are observed. (N+, bar = 0.3 mm)

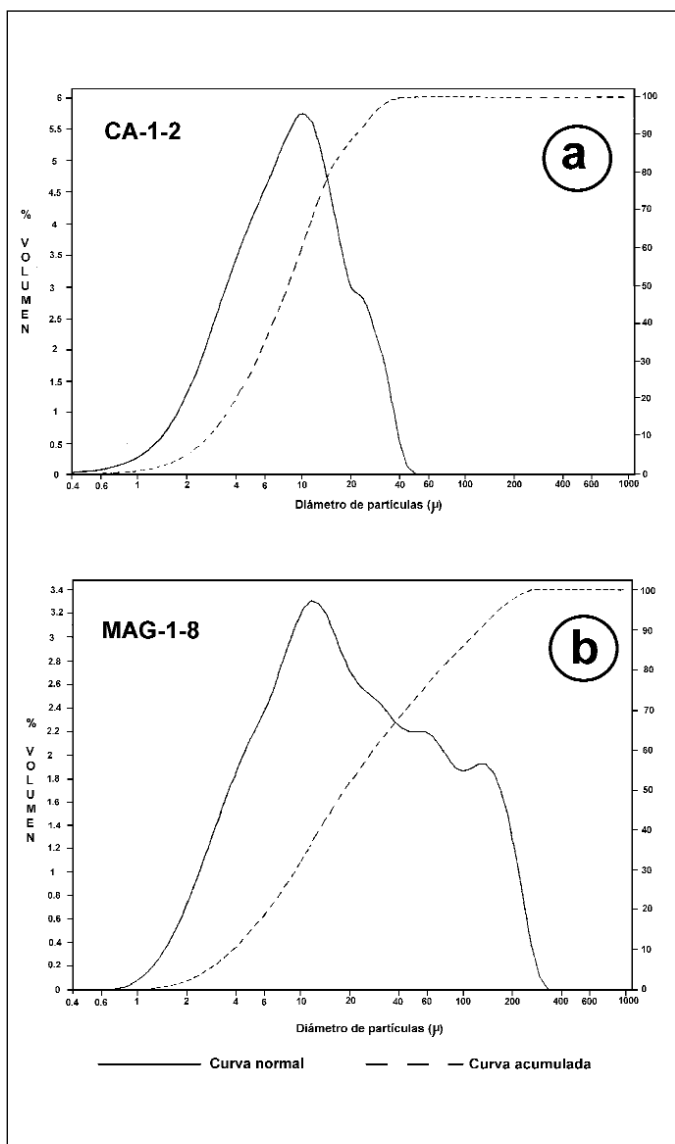


Fig. 10. a) Distribución granulométrica de una muestra representativa de la facies bentonitas verdes masivas. Su curva normal es ligeramente platikurtica con pequeña asimetría a la izquierda, presentando un máximo muy marcado a 10.2 μm y una inflexión en torno a 22 μm . El valor de la mediana es de 8.25 μm su índice de Trask de 1.78 lo que indica una buena selección. b) Distribución granulométrica de una muestra representativa de las bentonitas con intraclastos. Presenta una curva normal platikurtica con asimetría a la derecha y un máximo muy marcado a 11.6 μm y otro mucho menos neto a 120 μm , así como una meseta en torno a 50 μm . El valor de la mediana es de 18.6 μm y el del índice de Trask de 2.37

Fig. 10. a) Granulometric curve corresponding to a sample representative of green massive bentonites. Normal curve is slightly platykurtic and left skewed with a strong maximum at 10.2 μm and a warping about 22 μm . Median value is 8.25 μm and Trask index 1.78, indicating good sorting. b) Sample representative of bentonites with intraclasts. It shows a normal curve platykurtic, right skewed with strong maximum to a 11.6 μm , another less clear at 120 μm and a plateau around 50 μm . Median value is 18.6 μm and Trask index 2.37

La porosidad interpartícula en estos casos es importante (Figura 11C). Localmente se ha observado la existencia de recubrimientos cementantes en las esmectitas, que provocan una disminución notable en la porosidad interpartículas mencionada (Figura 11D). De forma puntual, se ha observado una microfábrica distinta, de tipo laminar a laminar turbulento (Figura 11E), donde las esmectitas se disponen cara-cara en las microláminas (5 μm), incluyendo en agregados glomerulares contaminantes como granos detríticos (cuarzo y feldspatos) e indicios de pequeños cristales (10 mm) de yeso fibroso.

El análisis puntual mediante EDX pone de manifiesto un carácter magnésico con relaciones $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ entre 2,16 y 2,36, no detectándose grandes diferencias en partículas de microfábrica distinta.

Bentonita con textura granular. Presenta microfábrica glomerular, con desarrollo de morfologías lutíticas frecuentemente subredondeadas y con superficies crenuladas (Figura 11F). En detalle se reconocen morfologías en láminas arrugadas, características de las esmectitas (Figura 12A). Subordinadas y dispersas, se observan morfologías con microfábrica diferente, más densa y de aspecto geliforme, que se interpretan como nódulos (Figura 12B). Estos nódulos presentan en su interior agregados fibrosos densamente empaquetados (Figura 12C). El análisis puntual EDX indica que no hay grandes diferencias composicionales entre las láminas esmectíticas y los agregados geliformes con fibras, con relaciones $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ oscilando entre 2,87 y 2,96, destacando en los últimos un mayor contenido en SiO_2 .

Bentonitas con intraclastos. La masa arcillosa presenta una microfábrica de tipo matriz a localmente laminar, con cierta porosidad y constituida por microagregados esmectíticos mezclados con minerales micáceos y granos de cuarzo y feldspatos (Figura 12E). Flotando en la masa arcillosa se reconocen morfologías compactas de baja porosidad global, que en tránsito a la primera presentan una envuelta de arcilla compactada, lo que confirma su carácter intraclástico (Figura 12D). El examen detallado de estos intraclastos revela una microfábrica formada por microagregados densos de fibras de pequeño tamaño (<2 μm) que parecen recubrir morfologías previas (Figura 12F). Los resultados del análisis puntual EDX arrojan algunas diferencias notables respecto de las bentonitas previamente descritas. Así, destaca el notable incremento en aluminio en los constituyentes de la masa arcillosa, con relaciones $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ entre 0,96 y 1,17. El análisis de los intraclastos muestra una mayor riqueza en magnesio, con relaciones $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ entre 3,62 y 4,22, que se correlaciona bien con su naturaleza sepiolítica.

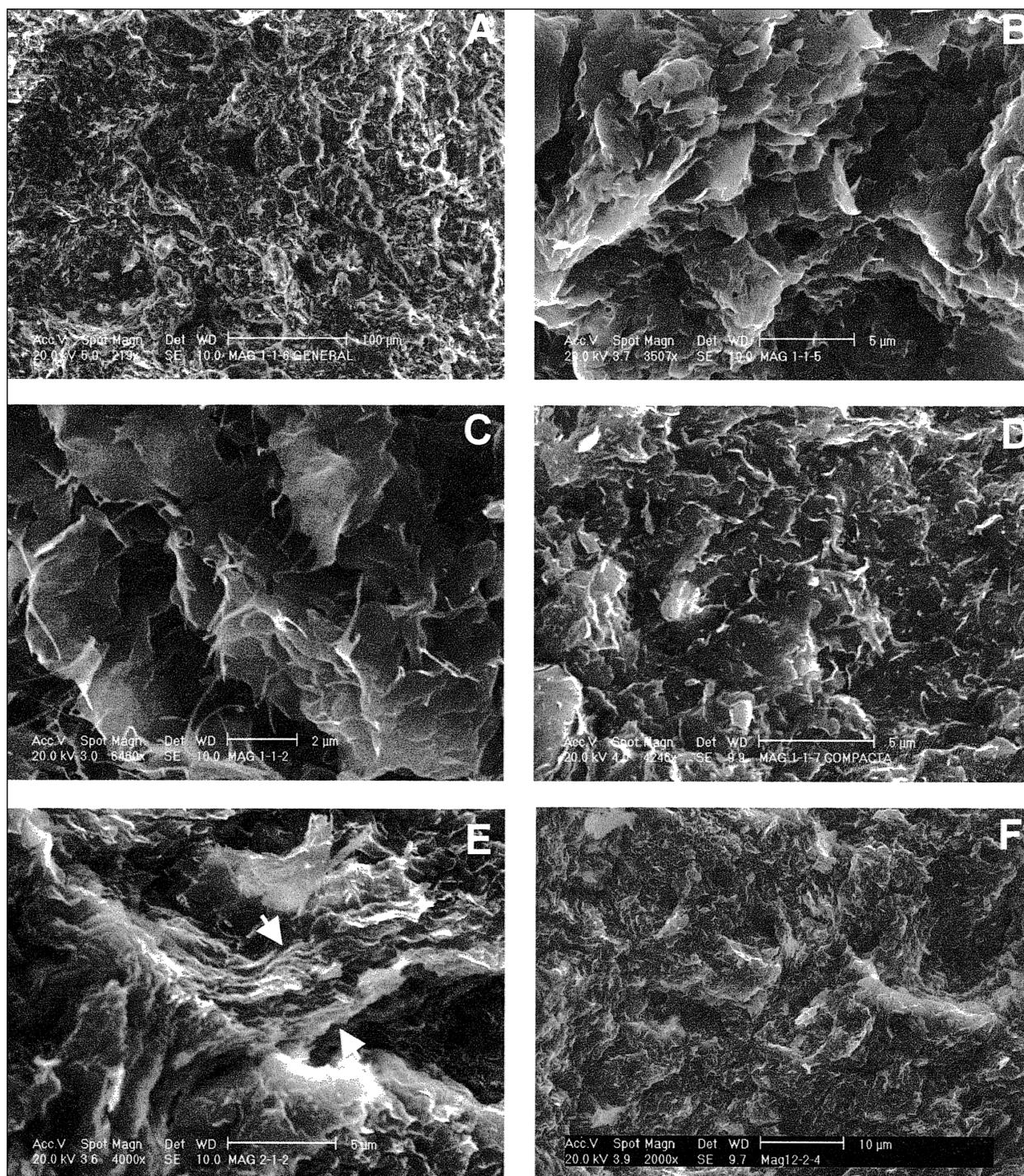


Fig. 11. A) Aspecto general de la microfábrica (tipo matriz) en una bentonita con textura masiva. Obsérvense la baja porosidad y el grado de compactación. B) Detalle de agregados de láminas de esmectita con disposición preferente cara-cara y porosidad interpartícula. C) Detalle de fibras de pequeño tamaño en los bordes de láminas de esmectita. D) localmente se pueden observar zonas con cementación que cierran la porosidad. E) Relleno de arcillas laminadas en una bentonita masiva. Obsérvense el carácter turbulento de la microfábrica y su escaso grosor (flechas). F) Microfábrica glomerular en una bentonita con textura granular. Destaca la presencia de morfologías subredondeadas granosportadas

Fig. 11. A) General view of microfabric (matrix type) in a bentonite with massive texture. A low porosity and evidences of compactness are observed. B) Detail of smectite sheet aggregates with preferred face-face arrangement and interparticle porosity. C) Detail of small-sized fibres coating smectite sheet edges. D) Locally cemented zones, closing porosity is observed. E) Laminated clay infilling in a massive bentonite. It is noteworthy a turbulent lamination microfabric and its small thickness (arrows) F) Glomerular microfabric in a bentonite with granular texture. Highlights the presence of grain-supported subrounded morphologies

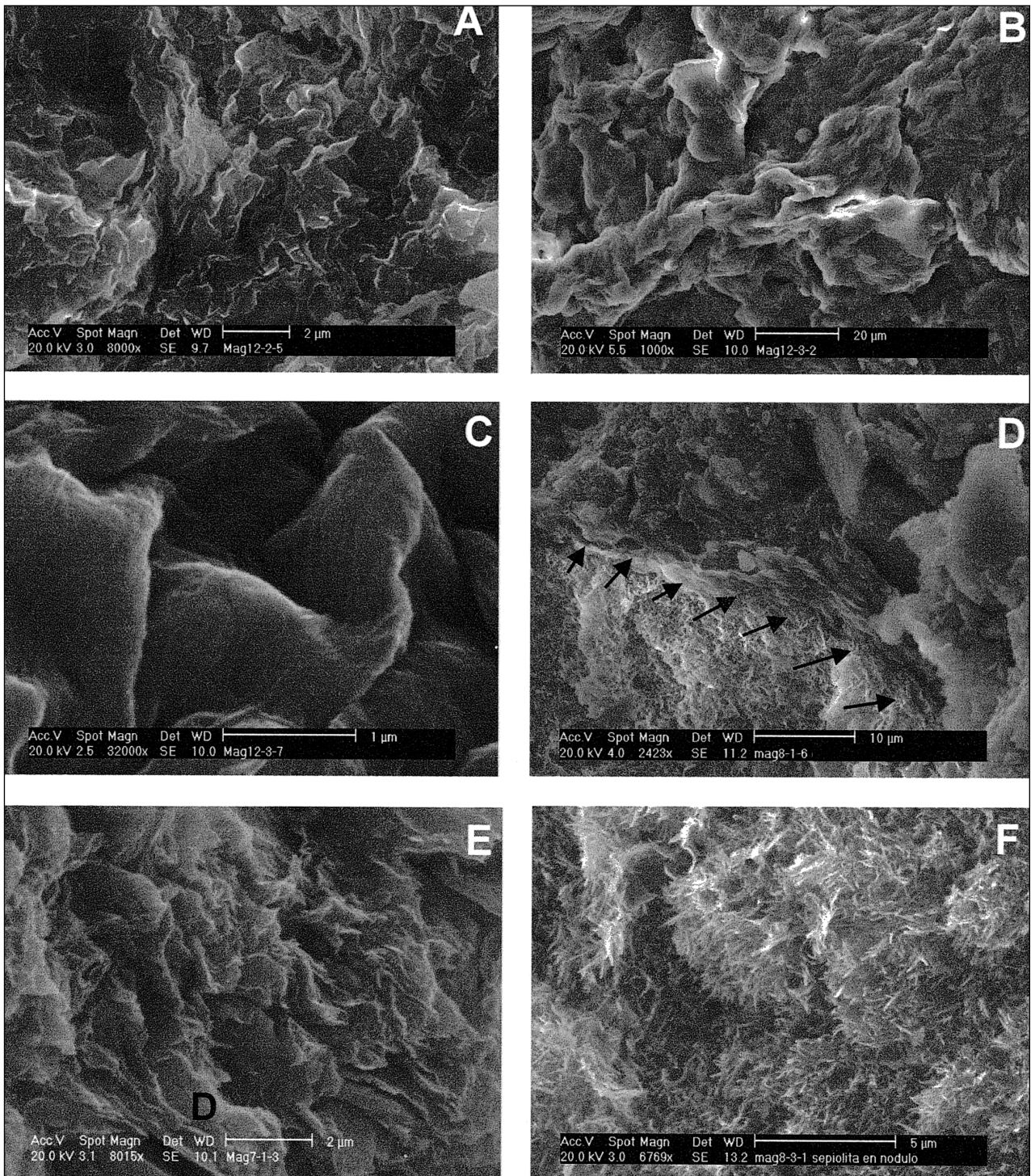


Fig. 12. A) Detalle de un glomérulo, donde se reconocen láminas arrugadas, típicas de las esmectitas. B) Agregados geliformes que se observan localmente en bentonitas con textura granular. C) Detalle de 12B, donde destaca la morfología ondulada y la existencia de agregados fibrosos en su interior. D) Bentonita con intraclastos donde se muestra el contacto de la masa arcillosa y un intraclasto (flechas). E) Detalle de la masa arcillosa de 12D, donde están presentes agregados esmectíticos y minerales detríticos dispersos (D). F) Se observan agregados densos de sepiolita en el interior de los intraclastos

Fig. 12. A) Close-up view of a glomerule where crumpled sheets, typical of smectites are shown. B) Amorphous aggregates locally observed in bentonites with granular texture. C) Detail of 12B where is remarkable the wavy morphology and the presence of fibrous aggregates in within. D) Bentonite with intraclasts, the boundary between the groundmass and an intraclast is observed (arrows). E) Close-up view of the 12D groundmass where smectitic aggregates and scattered detrital minerals (D) are shown. F) Dense aggregates of sepiolite within intraclasts are observed

Conclusiones

1.- El depósito de bentonitas de Villaluenga-Magán se incluye en una unidad lutítica muy rica en magnesio (Unidad magnésica). Dentro de esta unidad, las bentonitas tienen una potencia que oscila entre 2 y 3m, siendo frecuente que presenten una intercalación de lutitas rosáceas y composición esmectítico-sepiolítica. En las bentonitas, la asociación mineralógica es la siguiente: esmectita trioctaédrica > illita > (sepiolita) > cuarzo-feldespatos. La caracterización de la esmectita basada en DRX y, especialmente, a partir de la fórmula mineralógica, indica que el término predominante es la saponita, si bien existen evidencias de la presencia de estevensita muy subordinada.

Los valores de la CEC alcanzan 83 cmol (+) kg.⁻¹, observándose una disminución importante según la proporción de sepiolita presente. Del estudio térmico se deduce ausencia de capas brucíticas en posición interlaminar, con temperaturas de deshidroxilación que pueden comenzar a 300°C.

2.- Desde el punto de vista petrográfico se han diferenciado cuatro texturas en las bentonitas: masiva, granular, intraclástica y laminada. La más frecuente es la textura masiva, caracterizada por su baja porosidad, escasez de detríticos y aspecto homogéneo. La textura laminada puede presentarse en finas intercalaciones en los términos masivos, pero adquiere su máximo desarrollo en las lutitas transicionales que se sitúan en la base del tramo medio diferenciado. Presenta intraclastos englobados, y, ocasionalmente, acumulaciones de detríticos. La textura intraclástica es característica del tramo bentonítico superior y se presenta como una masa arcillosa en la que flotan intraclastos de composición sepiolítica. Muy localmente, se presenta la textura granular, constituida por morfologías subredondeadas que se disponen granosoportadas con tamaños de arena fina.

3.- El estudio mediante MEB-EDX pone de manifiesto la elevada pureza en esmectita de las bentonitas con textura masiva, que presentan microfábrica de tipo matriz con morfologías arrugadas características, ocasionalmente con desarrollo de fibras en los bordes de las láminas. En los términos laminados la microfábrica pasa a laminar-turbulenta englobando morfologías también arcillosas. Las bentonitas con textura granular presentan microfábrica glomerular, con gránulos de composición esmectítica coexistiendo con morfologías geliformes ligadas a nódulos que incluyen agregados fibrosos. En los materiales con textura intraclástica destaca el desarrollo de agregados densos de fibras de sepiolita en los intraclastos, mientras que en la masa arcillosa la microfábrica es de tipo laminar con frecuentes detríticos dispersos.

4.- Las bentonitas económicamente más interesantes son aquellas de textura masiva y ligadas al tramo inferior establecido en la Unidad Magnésica. Los constituyentes que pueden actuar como modificadores de propiedades en la bentonita son fundamentalmente los detríticos (frecuentes en la base del tramo superior) y la sepiolita, presente en rellenos de grietas, reemplazando o como intraclastos.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido subvencionado parcialmente con cargo al proyecto PB-95-0106-C02-01 financiado por la DGICYT. Deseamos agradecer al DR. J.L. Martín de Vidales la determinación de las capacidades de cambio y a D. Juan Manuel Teodoro de la compañía Südchemie las facilidades dadas en el muestreo de canteras.

Referencias

- Alberdi, M.T., Hoyos, M., Junco, F., López Martínez, N., Morales, J., y Soria, D. 1984. Biostratigraphy and sedimentary evolution of continental Neogene in the Madrid area. *Paléobiologie continentale*. 14, 47-68.
- Bullock, P., Fedoroff, N., Jongerius, A., Stoops, G. y Tursina, T. 1985. *Handbook for soil thin section description*. Wayne Research Publications. Albrighton. England. 150 pp.
- Cuevas, J. Pelayo, M., Rivas, P. y Leguey, S. 1993. Characterization of Mg-clays from the Neogene of the Madrid Basin and their potential as a backfilling and sealing material in high level radioactive waste disposal. *Applied Clay Science*. 7, 383-406.
- Cuevas, J., Leguey, S y Pusch R. 1994. Hydrothermal stability of saponitic clays from the Madrid Basin. *Applied Clay science*. 8. 467-484.
- Cuevas, J. Garralón, A. Ramírez, S. y Leguey, S. 2001. Hydrothermal alteration of a saponitic bentonite: mineral reactivity and evolution of surface properties. *Clay Minerals*. 36, 61-74.
- De Santiago Buey, C., Suárez Barrio, M., García Romero, E., Domínguez, M.C. y Doval Montoya, M. 1998. Electron microscopic study of the illite-smectite transformation in the bentonites from Cerro del Aguila (Toledo, Spain). *Clay Minerals*. 33, 501- 510.
- Dyni, J.R. 1976. Trioctahedral smectite in the Green River Formation, Duchesne County, Utah. *U.S. Geol. Surv. Prof Paper*, 967, 1-14.
- Domínguez M.C. 1994. Mineralogía y sedimentología del Neógeno del sector Centro Occidental de la Cuenca del Tajo. Tesis Doctoral U.C.M. 309 pp.
- ENADIMSA. 1975. Investigación nacional de bentonitas. Plan Nacional de Minería. M° de Industria, D.G. Minas. IGME.

- Galán, E., Álvarez, A. y Esteban, M.A. 1986. Characterization and technical properties of a Mg-rich bentonite. *Applied Clay Science*, 1, 295-309.
- García, E., Doval, M., Brell, J.M. y Perruchot, A. 1988. Procesos diagenéticos en las arcillas de la región de La Sagra (cuenca del Tajo). *Boletín Geológico y Minero*. 99, 958-974.
- García, E., Brell, J.M., Doval, M. y Navarro, J.V. 1990. Caracterización mineralógica y estratigráfica de las formaciones neógenas del borde sur de la Cuenca del Tajo (Comarca de La Sagra). *Boletín Geológico y Minero*. 101, 945-956.
- Hay, R.L., Pexton, R.E., Teague, T.T. y Kyser, T.K. (1986). Spring related carbonate rocks, Mg clays, and associated minerals in Pliocene deposits of the Amargosa desert, Nevada and California. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 97, 1488-1503.
- Pozo, M., Casas, J., Moreno, A. y Medina, J.A. 1992 (a). Magnesium clay paleosoils from Madrid Neogene Basin (Spain). *Mineralogica Petrographica Acta*, 35-A.235-244.
- Pozo, M., Casas, J. y Moreno, A. 1992(b). Rasgos paleoedáficos en episodios de somerización de lutitas magnésicas (Cerro del Águila, Cuenca de Madrid). *III Cong. Geol. de España y VII Cong. Latin. de Geología*. Salamanca. Simposios T-I, 289-299.
- Pozo, M., Casas, J., Martín de Vidales, J.L. Medina, J.A. y Martín Rubí, J.A. 1999 (a). Características texturales y composicionales en depósitos de arcillas magnésicas de la Cuenca de Madrid. I). Kerolitas (sector de Esquivias y Pinto). *Boletín Geológico y Minero*. 110-1 (77-102).
- Pozo, M., Casas, J., Martín de Vidales, J.L., Medina, J. A. y Martín Rubí, J.A. 1999 (b) Características texturales y composicionales en depósitos de arcillas magnésicas de la Cuenca de Madrid. II. Bentonitas (sector Cabañas de la Sagra-Yunclillos). *Boletín Geológico y Minero*. 110-3 (273-296).

Recibido: Julio 2001

Aceptado: Diciembre 2001