

*La edad de las ilitas en areniscas
pérmicas y triásicas de la Cordillera Ibérica
mediante el método K/Ar: Implicaciones
en la historia diagenética y evolución
de la cuenca*

R. MARFIL *, M. G. BONHOMME **, J. A. DE LA PEÑA*,
R. PENHA DOS SANTOS ** e I. SELL*

* *Dpto. de Petrología y Geoquímica,
Facultad de Ciencias Geológicas,*

Universidad Complutense, 28040-Madrid (España)

** *Institut Dolomieu,*

Université Joseph Fourier,

URA 69, CNRS, 15 rue Maurice Gignoux, 38031 Grenoble (France)

RESUMEN

Las areniscas pérmicas y triásicas de un sondeo de casi mil metros, localizado en Sigüenza (SS-44-3), Cordillera Ibérica, con una composición de sublitoarenitas-grauvacas y arcosas-subarcosas, respectivamente, tienen cementos de ilita formados en varias etapas de su historia diagenética, como demuestran su morfología y composición, las reacciones diagenéticas entre estos componentes y otros minerales no arcillosos y la secuencia general de cementación.

Las edades absolutas determinadas por el método K/Ar indican asimismo que las ilitas autigénicas se han formado entre $202,8 \pm 4,4$ M.a. y $153,8 \pm 3,4$ M.a., es decir, entre el Hettangiense-Sinemuriense y el Calloviense-Tithoniense. Estas edades coinciden con el período en que la tectónica extensional fue más intensa en el Aulacógeno Ibérico, con el desarrollo de numerosas manifestaciones volcánicas. La elevación de los flujos caloríficos basales y el movimiento convectivo de los fluidos dieron lugar a la neoformación de las ilitas fibrosas. Las temperaturas para su neoformación, deducidas a partir de la reflectividad de la vitrinita, esta-

rían comprendidas entre 134,8 y 159°C, con profundidades de enterramiento entre 3.800 y 4.500 m. Estos valores implican la existencia de gradientes geotérmicos muy superiores a los que se pueden deducir de la potencia de sedimentos de la cuenca.

Palabras clave: Illitas, datación K/Ar, diagénesis, areniscas, Pérmico, Triásico, Cordillera Ibérica

ABSTRACT

A K/Ar study of the fine-grained authigenic illite in the Permian and Triassic sandstones of the Iberian Range from a Sigüenza well 44-3 core (near 1000 m depth) was performed. The composition of the sandstones range from sublitharenites to greywackes in the Permian and from arkoses to subarkoses in the Buntsandstein. These sandstones show pervasive authigenic illite which occurred during at least three episodes of cementation during the burial history. This is indicated by the compositional and morphological characteristics of the illite and also by the general sequence of cementation.

K/Ar age determinations indicate that the episode of illitization range between 202.8 ± 4.4 M.a. to 153.8 ± 3.4 M.a. during Hettangian-Sinemurian to the Callovian-Tithonian. These ages coincide with the period of the most intensive extensional tectonics in the basin coeval with volcanic events. Upward flow of hot fluids from the basement and the convective fluids movement produced the fibrous illite growth. Constraints placed by vitrinite reflectance deduced temperatures from the associated organic matter which suggest that the diagenetic illite formed at temperatures between 134.8 and 159.5°C from 3 800 to 4 500 m in depth. These estimates imply geothermal gradients significantly greater than those that could have been deduced from the burial history reconstruction of the Permo-Triassic basin.

Key words: Illite, K/Ar ages, diagenesis, sandstones, Permian, Triassic, Iberian Range.

INTRODUCCIÓN

Las relaciones isotópicas Rb/Sr y K/Ar han sido usadas en los últimos años para la datación de rocas sedimentarias (Clauer, 1976 y Bonhomme, 1982). Además, los minerales de arcilla son muy sensibles a los procesos que ocurren después de su sedimentación y por tanto útiles

como cronómetros para el establecimiento de la historia de las cuencas sedimentarias, pudiendo tener los eventos datados implicaciones con la evolución geodinámica e hidrodinámica de las mismas.

Recientemente se ha dado mucho énfasis a la reconstrucción de la historia diagenética de las areniscas en función de las edades isotópicas de sus minerales autigénicos. La ilita autigénica, formada generalmente durante tales procesos, como resultado de las interacciones entre los fluidos migrantes y los minerales de las areniscas, es teóricamente datable por métodos isotópicos (Bonhomme, 1982; Clauer, Sommer & Liewig, 1982; Aronson & Burtner, 1983; Glasmann, Clark & Larter, 1986; Glasmann *et al.*, 1989; Lundergard, 1989; Mossmann, Clauer & Liewig, 1992).

La ilita autigénica es un cemento común en las rocas almacén donde su morfología fibrosa puede afectar en gran manera a la permeabilidad e interferir con la producción de hidrocarburos. La edad de formación de la ilita es de particular importancia, al ser un cemento diagenético, generalmente tardío, precipitado a partir de los fluidos que preceden o acompañan al emplazamiento de los hidrocarburos en los almacenes (Glasmann *et al.*, 1989).

En este estudio se aportan nuevos datos sobre la historia diagenética de las areniscas y lutitas permo-triásicas de la Cordillera Ibérica, aplicando diferentes métodos analíticos a los minerales arcillosos, con especial atención a la geocronología mediante el método K/Ar de la ilita autigénica, integrando estos datos con los petrográficos previos, de microscopía electrónica de transmisión y de barrido, análisis geoquímicos isotópicos de los cementos carbonáticos, así como de maduración de la materia orgánica. Finalmente, se intentan reconstruir las condiciones de la diagénesis más profundas que afectaron a la cuenca, deduciendo sus implicaciones en la evolución de la cuenca permo-triásica, ya que la formación masiva de ilita autigénica puede reflejar episodios tectónicos mayores acaecidos en la misma.

El sondeo Sigüenza (Guadalajara) S-44-3, de 999 metros de profundidad, con coordenadas 41° 05' 30" N y 1° 09' 20" W, ha ofrecido la oportunidad de poder estudiar los procesos diagenéticos a diferentes profundidades en el Pérmico y en parte de las facies Buntsandstein (Triásico) de la zona noroccidental de la Cordillera Ibérica (Fig. 1).

En el Buntsandstein se han podido muestrear dos grandes unidades: *a)* una inferior (entre 369 y 538 m), formada por orto y conglomerados y areniscas, con intercalaciones esporádicas de lutitas aleuríticas hacia el techo de la unidad, y *b)* una superior (entre 369 y 300 m), formada por



Fig. 1.—Localización del sondeo Sigüenza SS-44-3.

Fig. 1.—Map showing the location of the SS-44-3 Sigüenza core-hole.

conglomerados arenosos, areniscas y lutitas arcillosas, más abundantes hacia el techo. Ambas unidades son de color rojo y el criterio de diferenciación ha sido petrológico y la presencia de un conglomerado de 10 m de potencia entre ambas.

En el Pérmico también se han muestreado dos grandes unidades: *a*) una roja superior (Saxoniense-Thuringiense, SHELL-JEN, 1980), formada por lutitas aleuríticas con horizontes y nódulos de anhidrita, en parte carbonatados, areniscas y un conglomerado basal a 762 m, y *b*) una infe-

rior (Autuniense?) desde 762 a 999 m, compuesta por areniscas grises con cantos negros de ortopizarra dispersos o en niveles, con intercalaciones de lutitas rojas con nódulos de anhidrita y carbonatos. Hacia la base las areniscas y lutitas pasan a color gris oscuro e incluso negro, con abundante materia orgánica.

TÉCNICAS DE ESTUDIO

Se han recogido 140 muestras de las cuales se han realizado láminas delgadas orientadas y láminas impregnadas de resina coloreada para el estudio de la porosidad en las areniscas. De las lutitas intercaladas entre los niveles de areniscas se han realizado 20 análisis de difracción de rayos-X de muestra total. Posteriormente se han tomado 10 muestras con gran riqueza en ilita autigénica para la realización de los datos isotópicos K/Ar. Estas 10 muestras también han sido analizadas por difracción de rayos-X (fracción $<2 \mu\text{m}$) y mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) y de transmisión (MET) para confirmar la morfología de las ilitas y sus relaciones con el resto de los cementos.

La mineralogía de la fracción arcilla ha sido definida según las reglas propuestas por Moore & Reynolds (1989), particularmente la clasificación de los interestratificados I-E. El contenido en potasio fue obtenido por fluorescencia de rayos-X (Govindaraju, 1987) y por ICP en las muestras pobres en dicho elemento. La dosimetría en argón radiogénico se determinó a partir de la disolución isotópica en el espectrómetro de masas VG, serie 600. Para el cálculo de la edad se han utilizado las constantes recomendadas por Steiger & Jäger (1977), y la determinación del cálculo de error a partir de la fórmula establecida por Mahood & Drake (1982). Los errores fueron de ± 3 por 100 (1σ), para las muestras con más de un 50 por 100 de argón radiogénico. Todos estos análisis se han efectuado en el Instituto Dolomieu de Grenoble.

Por último se han realizado medidas de la reflectividad de la vitrinita en 2 muestras ricas en materia orgánica de la base del sondeo.

COMPOSICIÓN Y TEXTURAS DE LAS ARENISCAS

Las areniscas de facies Buntsandstein son arcosas y subarcosas de tamaño de grano medio entre 0,25 y 0,5 mm, moderadamente a bien seleccionadas en los tramos superiores del sondeo, y sublitoarenitas de grano

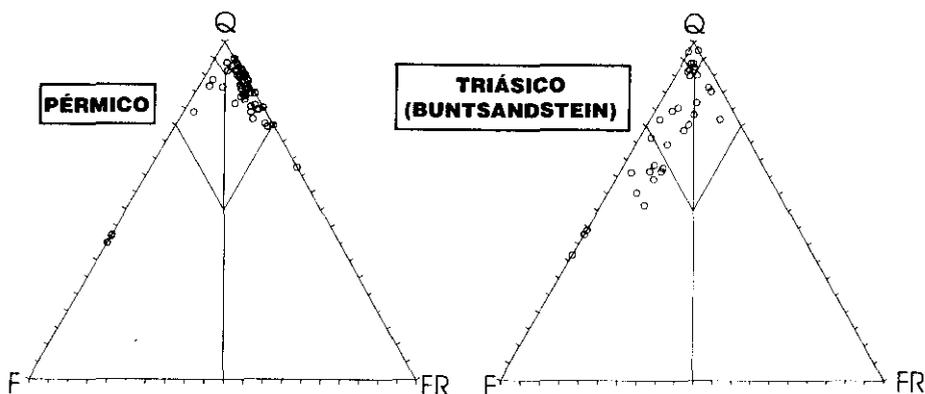


Fig. 2.—Composición de las areniscas del sondeo de Sigüenza (S-44-3) en un diagrama cuarzo, feldspatos, fragmentos de roca. Pérmico: sublitoarenitas y grauwacas líticas. Buntsandstein: arcosas y subarcosas.

Fig. 2.—Ternary plot of framework quartz, feldspars and lithic rock fragments for samples from SS-44-3 Sigüenza core-hole. Permian: sublithoarenites and greywackes. Buntsandstein: arkoses and subarkoses.

ligeramente inferior (0,25-0,125 mm) en los tramos inferiores (Fig. 2). Estas areniscas proceden de áreas fuentes metamórficas de bajo y medio grado en los tramos basales con influencia cada vez más notoria de áreas fuentes granítico-gneísicas hacia los tramos superiores (Arribas, Marfil & De la Peña, 1985). En general se observa hacia el techo la desaparición progresiva de los fragmentos de roca líticas y el aumento de feldespato potásico. Esta variación, influenciada por la procedencia, se refleja en un distinto comportamiento durante la diagénesis de enterramiento.

Los materiales cementantes más importantes en el Buntsandstein son: carbonatos (dolomita, ferrodolomita-ankerita, calcita), con anhidrita y baritina subordinadas, cuarzo como recrecimiento sintaxial, y feldespato potásico como recrecimiento, reemplazando cuarzo detrítico o cementando fracturas (Morad, Marfil & De la Peña, 1989). Los cementos filosilicáticos tienen una composición muy parecida en toda la columna permo-triásica, si bien los porcentajes varían en función del ambiente de sedimentación y de la profundidad de entrada de las aguas meteóricas. La asociación está formada por illita, interestratificados illita-esmectita, caolinita, clorita e interestratificados clorita-esmectita.

Las areniscas pérmicas atravesadas en el sondeo son sublitoarenitas, subarcosas y grauwacas (Fig. 2) con tamaño de grano medio entre 0,25 y

0,125 mm, de moderadamente a mal seleccionadas, derivadas de áreas fuentes metamórficas de medio y bajo grado, volcánicas y sedimentarias.

En el Pérmico desaparece el cemento sintaxial de feldespato-K, disminuyen los de cuarzo y aumenta la presencia de dolomita, pero reemplazando a los clastos del esqueleto, sobre todo feldespatos y fragmentos de roca. Asimismo, hacia la base aumenta el porcentaje de fragmentos de roca volcánica (FRV) y fragmentos de roca metamórfica (FRM) de medio y bajo grado, con lo que crece la matriz diagenética (pseudomatriz) por alteración y deformación de estos fragmentos inestables.

COMPOSICIÓN DE LAS LUTITAS

En los niveles de lutitas intercaladas a lo largo de toda la columna los minerales de arcilla dominan sobre el resto de los componentes silicáticos y carbonáticos. De estos últimos, el cuarzo y los feldespatos son los componentes relativamente más abundantes en todas las muestras, con un incremento del tanto por ciento de feldespatos hacia la base del Pérmico, llegando casi a igualarse con el cuarzo. Los carbonatos sólo son importantes en el Pérmico, asociados a pequeñas cantidades de anhidrita y baritina e incluso magnesita. El porcentaje de hematites también crece ligeramente en las lutitas del Pérmico, con un máximo de 3,61 %. Los minerales de arcilla mayoritarios son ilita y caolinita, con claro dominio de la ilita (90 % a 10 %), aunque hacia la base esta relación se hace de 85 % a 15 %, con algún valor máximo de caolinita de 22,5 %. Tanto en el Buntsandstein como en el Pérmico son frecuentes *los interestratificados ilita-esmectita y la presencia de clorita, ambos sin cuantificar por estar en proporciones menores del 5 %.*

La cristalinidad de la ilita presenta valores progresivamente en descenso de techo a muro en la columna permo-triásica: 0,7 a 0,9° θ , en el Buntsandstein, y 1,0 a 1,1° θ , en el Pérmico. La relación I(002)/I(001) no muestra cambios aparentes y oscila entre 0,54 y 0,32, es decir, moscovitas y fengitas. No obstante, en las facies rojas del Pérmico superior son micas más ferromagnesianas. Consideramos que estas secuencias de lutitas contienen fundamentalmente filosilicatos detríticos más que autigénicos, al igual que ha sido observado en otras cuencas permo-triásicas europeas (Bonhomme, 1987).

PROCESOS DIAGENÉTICOS

Las determinaciones de la reflectividad de la vitrinita efectuada en las muestras SS-138 y SS-139, correspondientes a 994,5 m y 995,9 m de profundidad respectivamente, sobre 50 medidas para cada muestra, dieron los siguientes valores medios: $0,94 \pm 0,13$ y $1,14 \pm 0,19$, respectivamente. Asimismo, en la composición de la materia orgánica se identificaron: vitrinita, como dominante; inertinita y semifusinita, como subordinadas, y algún bitumen. Estos datos indican que nos encontramos en la catagénesis, dentro de la ventana de generación máxima de hidrocarburos. Como el tipo de materia orgánica es terrestre, correspondería al rango de carbones bituminosos con contenido alto a medio en volátiles. Los valores obtenidos de reflectividad también se pueden comparar con los datos de Bostick (1979) y, en relación con ellos, las profundidades de enterramiento estimadas estarían entre 2700-3500 m, correspondiendo a una temperatura máxima de 165-180°C, que nos parece demasiado elevada para las profundidades de enterramiento.

Aplicando la conversión empírica de temperatura-reflectividad de Barker & Pawlewicz (1986):

$$\log_e R = 0,0096 T - 1,4$$

donde R es la reflectividad y T la temperatura máxima en °C, obtendríamos que la temperatura estaría comprendida entre 134,8 y 159,5°C. Para estas temperaturas las profundidades de enterramiento según Bostick (1979) serían de 3.800 a 4.500 m. Estos valores, aunque superiores a los deducidos anteriormente, estarían de acuerdo con las temperaturas dadas para las neoformaciones de ilita en el Pérmico del Mar del Norte (Lee, Aronson & Savin, 1989) y con el porcentaje de capas expansibles (< 10 %) de las ilitas estudiadas (Perry & Hower, 1970).

En la figura 3 se muestra la secuencia de los procesos diagenéticos en función de la profundidad de enterramiento. En las areniscas pérmicas dominan los procesos diagenéticos relacionados con la presión litostática: compactación mecánica con colapso del esqueleto (Nagtegaal, 1980) y grauvaquización (Marfil & De la Peña, 1981). Por el contrario, en las facies Buntsandstein son más característicos los procesos de diagénesis química con cementos abundantes rellenando la porosidad. Los procesos de disolución por presión son moderados en toda la columna, dominando los contactos entre cuarzos cóncavo-convexos y débilmente suturados. La presencia de una mayor cantidad de matriz arcillosa (> 15 %) en las

CEMENTOS	DIAGÉNESIS	
	TEMPRANA	→ TARDÍA
Ilita	-----	-----
Caolinita	-----	-----
Clorita	-----	-----
Ilita-esmectita	-----	-----
Calcita	-----	-----
Dolomita	-----	-----
Ankerita	-----	-----
Cuarzo	-----	-----
Baritina & anhidrita	-----	-----
Feldespato-K	-----	-----
Óxidos de Ti & Fe	-----	-----
Pseudomatriz (I + Cl + Cl-E)	-----	-----

Fig. 3.—Relaciones entre los principales procesos diagenéticos en las areniscas estudiadas.
 Fig. 3.—Generalized paragenetic relations between principal processes in the studied sandstones.

areniscas pérmicas, sobre todo ílítica, con clorita subordinada, favorece la corrosión del cuarzo por la ilita y genera un tipo de contacto difuso entre ambos minerales (Marfil & Buendía, 1980). Estos diferentes comportamientos diagenéticos inciden sobre la evolución de la porosidad-permeabilidad (Fig. 4): mientras en las arcosas del Buntsandstein conservan valores de hasta 18 % y 73 md, respectivamente, en las sublitoarenitas y grauvacas del Pérmico los valores máximos medidos han sido 8 % y 0,1 md, confirmando la pérdida de capacidad como roca almacén de las mismas.

Con el fin de conocer la incidencia de cada proceso diagenético sobre la porosidad y la reducción de espesor de sedimentos durante el enterramiento, se han realizado estimaciones según Rittenhouse (1971), Beard & Weyl (1973) y Mitra & Beard (1980) en la columna de areniscas del Buntsandstein. La pérdida de porosidad por compactación mecánica

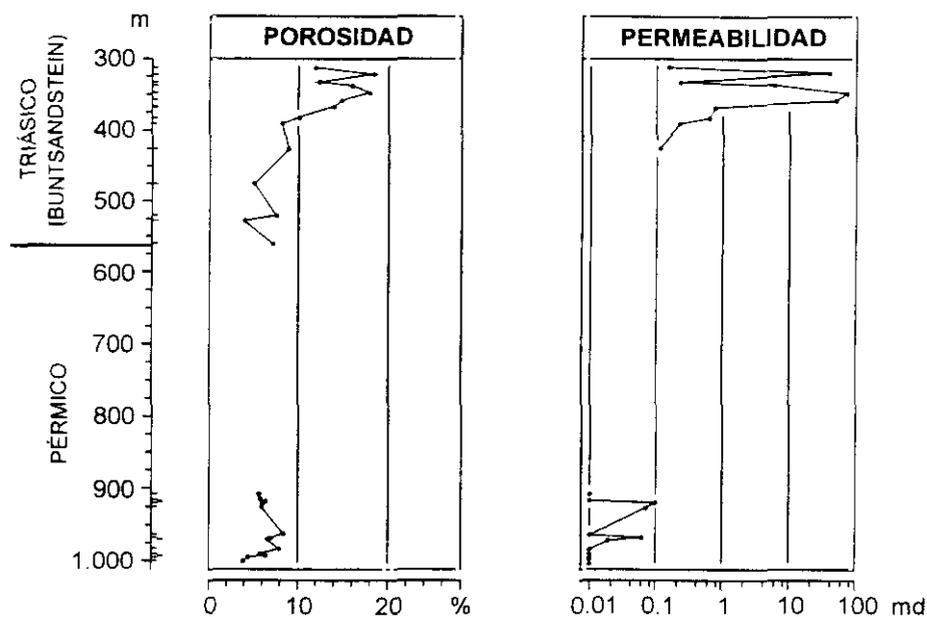


Fig. 4.—Evolución de la porosidad y de la permeabilidad en función de las distintas litologías en las areniscas estudiadas.

Fig. 4.—Diagrams of porosity and permeability data showing the different behaviour in the Permian and Buntsandstein sandstones.

arroja un promedio del 17 %; por cementación, incluida la arcillosa, de un 7 %; y por compactación química (disolución por presión) de un 10 %. El tanto por ciento de porosidad original promedio sería de 38 %, con lo cual el promedio de porosidad primaria remanente es del 6 %. También se calculó en estas areniscas, por su bajo contenido en lutitas intercaladas con respecto a las del Pérmico, el tanto por ciento de decrecimiento de espesor de la columna original, encontrándose pérdidas de un 32 % (Marfil, Turrero & Scherer, *in litt.*)

Para una profundidad de enterramiento de aproximadamente 3.000 m (De La Peña *et al.*, 1983) y para rocas de 245-230 millones de años el promedio de porosidad primaria debería ser 11-15 % (Scherer, 1987), o incluso 20-30 % como en el Mar el Norte. Luego, posiblemente, el cemento arcilloso, y en general la grauvaquización, han afectado seriamente a la porosidad y permeabilidad, o bien estas rocas sufrieron un mayor enterramiento (hasta 4.500 m), como se deduce de los datos de la reflectividad de la vitrinita. Los datos de permeabilidad de que disponemos

son inversamente proporcionales a la cantidad de cementos de illita e interestratificados illita-esmectita, no existiendo una relación clara con los otros tipos de cemento (carbonatos, cuarzo, feldespato-K...). Este hecho es más patente en las areniscas del Pérmico.

La formación de porosidad secundaria, por disolución de feldespatos o cementos carbonáticos, está asociada a la entrada de aguas meteóricas durante la actividad tectónica y exposición subaérea durante la emersión y parece ser de menor importancia (Marfil *et al.*, *in litt.*). Este proceso sólo se refleja en la precipitación de caolinita-dickita, que actualmente se conservan sin ilitizar y en la presencia de calcita y óxidos de hierro relacionados con procesos esporádicos de dedolomitización (Morad *et al.*, 1990).

LAS ILITAS AUTIGÉNICAS. DATACIÓN K/Ar

De las diez muestras elegidas para la separación de illita en la fracción $<2 \mu\text{m}$ sólo obtuvimos concentración suficiente en seis de ellas. Los datos de difracción de rayos-X de estas muestras figuran en la Tabla 1. En ella se observa que la composición mayoritaria es illita más el interestratifica-

Tabla 1

Muestra	I + I/E >> 90% I, R ₃	Cl + Cl/E %	Caol	I _{cris.}	002/001	Acc.
1 (SS- 12)	95 (25%I)	5	—	1,18°	0,55	—
6 (SS-105)	95 (> 90% I)	5	:	1,02°	0,47	—
7 (SS-113)	85 (> 90% I)	15	—	0,89°	0,56	—
8 (SS-118)	*** (> 90% I)	*	tr.	0,79°	0,50	Q *
9 (SS-133)	90 (> 90% I)	10	—	0,89°	0,46	Q tr.
10 (SS-135)	80 (> 90% I)	20	—	0,90°	0,40	—

Q = Cuarzo

*** = muy abundante

* = abundante

tr. = trazas

Tabla 1.—Datos composicionales de los cementos arcillosos de las areniscas pérmicas y triásicas.

Table 1.—Compositional data of clay cements from Permian and Triassic sandstones.

Tabla 2

Muestra	K ₂ O (%)	$\frac{^{40}\text{Ar}_{rad}}{^{40}\text{Ar}_{tot}}$ (%)	$^{40}\text{Ar}_{rad}$ (μl/g)	Ma ± 1σ	$\frac{^{40}\text{K}}{^{36}\text{Ar}}$ (10 ³)	$\frac{^{40}\text{Ar}}{^{36}\text{Ar}}$
1 (SS- 12)	8,91	89,3	60,7	199,6 ± 4,3	202,0	2773
6 (SS-105)	7,96	90,8	38,4	188,4 ± 4,0	298,1	3621
7 (SS-113)	6,40	90,8	38,4	177,9 ± 4,0	269,2	3203
8 (SS-118)	7,09	91,7	39,0	168,8 ± 3,8	327,6	3538
9 (SS-133)	7,66	89,7	39,7	153,8 ± 3,4	276,8	2877
10 (SS-135)	4,90	88,9	33,9	202,8 ± 4,4	190,7	2673

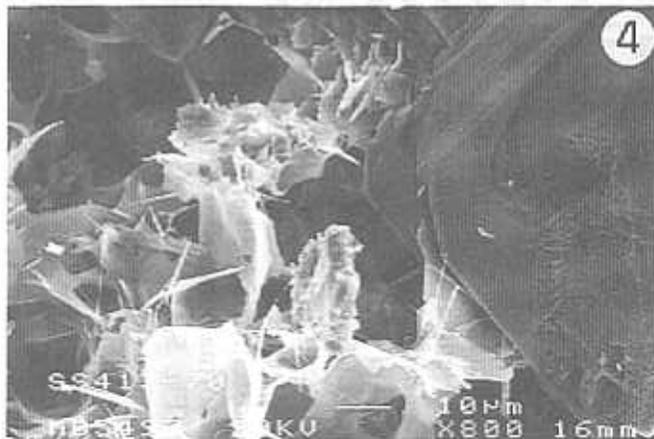
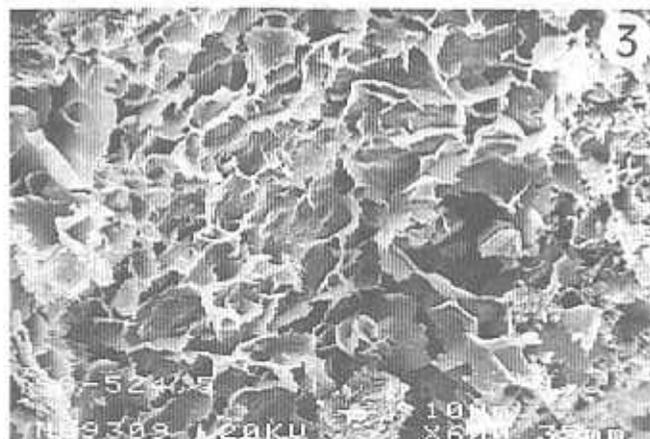
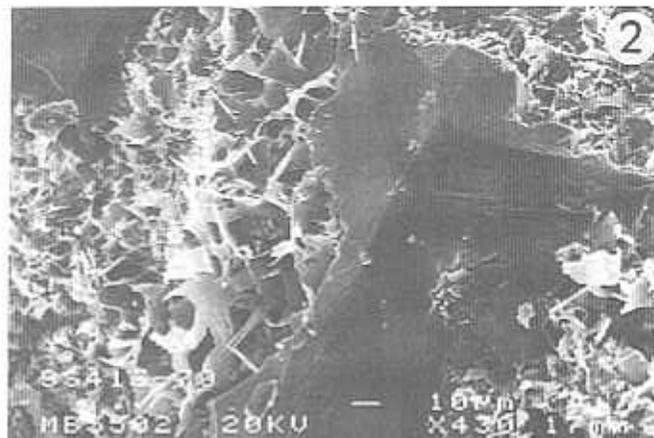
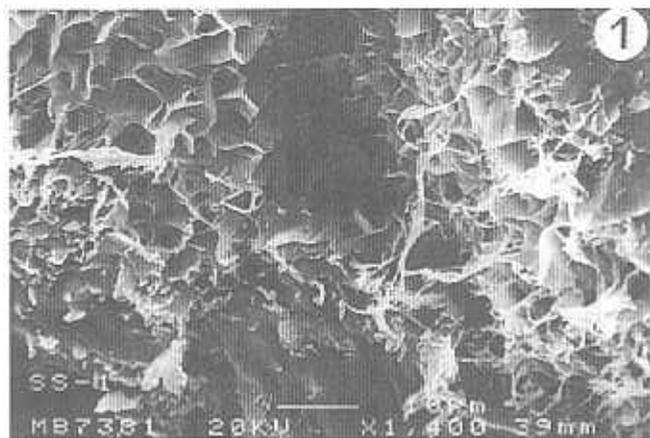
Tabla 2.—Datos isotópicos de las ilitas autigénicas de las areniscas pérmicas y triásicas.
Table 2.—Isotopic data of authigenic illites from Permian and Triassic sandstones.

do I-E, que es más abundante en las areniscas del Buntsandstein. La illita es del tipo R = 3 (Moore & Reynolds, 1989). Los otros componentes son clorita más el interestratificado Cl-E, que crecen moderadamente hacia la base del Pérmico. La caolinita-dickita fueron eliminadas ya que tienen un tamaño de partículas, en general, superiores a 2 μm.

La cristalinidad de la illita autigénica crece hacia la base del Pérmico, al contrario de lo que ocurría con las ilitas detríticas. La relación 002/001 indica que son ilitas bastante aluminicas (moscovita), con algo más de contenido en ferromagnesianos en las muestras de la base.

Fig. 5.—Fotografías al MEB de: 1) *Pore filling* (cemento) de interestratificados illita-esmectita. También se observan varios cristales de feldespato-K autigénicos intercrecidos con el cemento arcilloso. Arcosa del Buntsandstein. 2) Clay rim formado por interestratificados de illita-esmectita, algo transformado en illita fibrosa, y parcialmente recubierto por cemento de cuarzo sintaxial. Arcosa del Buntsandstein. 3) Interestratificados illita-esmectita que cementan y reemplazan micas y fragmentos de roca. Grauwacke del Rotliegendes. 4) Cemento de illita fibrosa que reemplaza interestratificados de illita-esmectita y que es posterior al cemento sintaxial de cuarzo. Arcosa del Buntsandstein.

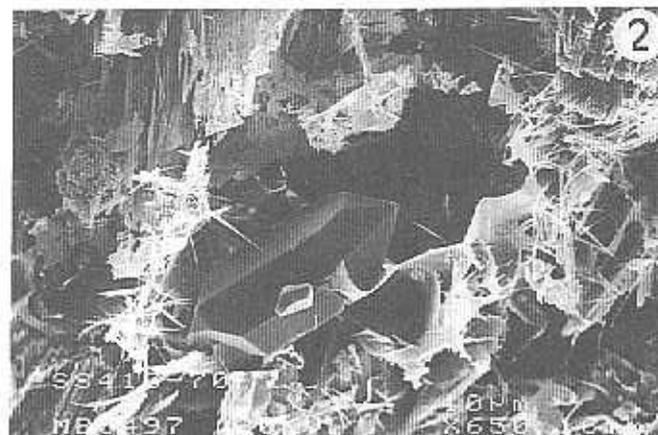
Fig. 5.—SEM photomicrographs of: 1) Authigenic illite-smectite mixed layers pore filling. Several crystals of authigenic K-feldspar can also be observed. Buntsandstein arkose. 2) Authigenic illite-smectite mixed layers clay rim partially transformed to illite, predating quartz overgrowth. This texture suggests a pre-silica cement origin for these clays. Buntsandstein arkose. 3) Intergranular authigenic illite-smectite mixed layers cement and replacement of mica and rock fragments. Greywacke from the Rotliegendes. 4) Intergranular fibrous illite formed from precursors illite-smectite mixed layers, postdating quartz overgrowth. Buntsandstein arkose.



Respecto a la edad obtenida (Tabla 2), ésta oscila entre $202,8 \pm 4,4$ m.a. (1σ) y $153,8 \pm 3,4$ m.a. (1σ), es decir, desde el Hettangiense-Sinemuriense hasta el Calloviense-Tithoniense (Harland *et al.*, 1989). En la escala de Odin & Odin (1990) equivaldría a un periodo de tiempo comprendido entre el techo del Hettangiense y el límite Calloviense-Oxfordiense. Se ha intentado relacionar estas diferencias de edades con la presencia de distintos tipos de illita autigénica, formadas en periodos diagenéticos posiblemente distintos. Tanto al microscopio petrográfico como al MEB se distinguen: *a)* Una primera fase de illita e interestratificados I-E como *clay rims* (Fig. 5-1) y reemplazando feldespatos, anteriores al cemento de cuarzo (Fig. 5-2). Esta illita, analizada por EDAX tiene pequeñas cantidades de Fe y Mg, y está presente tanto en el Buntsandstein como en el Pérmico (Fig. 5-3). *b)* Una segunda fase de illita se neoforma con posterioridad al cemento de cuarzo con morfología fibrosa (Fig. 5-4), partiendo de los interestratificados I-E (Fig. 6-1), de feldespatos-K alterados o de *pore-fillings* de caolinita (Fig. 6-2). Estas illitas en el Buntsandstein no cierran más que parcialmente los poros, al estar el proceso de transformación I-E a illita en una fase moderada; mientras que en el Pérmico su crecimiento origina marañas de fibras que cierran prácticamente la porosidad (Fig. 6-3). *c)* Una tercera fase de illita tiene morfología acintada, procede de la rotura de micas, corroe a los clastos de cuarzo y reemplaza a corrensita y cloritas autigénicas más tempranas (Fig. 6-4). Su análisis al EDAX denota su riqueza en Fe y algo de Mg. Estas illitas sólo se encuentran en el Pérmico y originan el cierre prácticamente total de la porosidad. Su etapa de formación es difícil de precisar al no haber una relación apreciable con el cemento de cuarzo.

Fig. 6.—Fotografías al MEB de: 1) Cemento de illita fibrosa, feldespato-K parcialmente disuelto e ilitizado, y *pore filling* de caolinita con procesos de ilitización. También se observa cemento sintaxial de cuarzo anterior a la formación de illita fibrosa. 2) Feldespato-K, parcialmente disuelto y caolinitizado, reemplazado por illita fibrosa y cuarzo. Subarcosa del Buntsandstein. 3) Illita fibrosa autigénica formando mallas entre los granos y reduciendo drásticamente la permeabilidad. Grauvaca del Rotliegenden. 4) Illita con morfología acintada o en listones originada como consecuencia de la intensa compactación mecánica de micas y fragmentos de roca. Grauvaca del Rotliegenden.

Fig. 6.—SEM photomicrographs of: 1) Intergranular authigenic fibrous illite partially dissolved and illitized K-feldspar and illitized kaolinite pore filling. Some quartz overgrowth predating fibrous illite can also be observed. Buntsandstein subarkose. 2) K-feldspar partially dissolved and kaolinitized, replaced by authigenic fibrous illite and quartz. Buntsandstein subarkose. 3) Generalized growth of authigenic fibrous illite, form a mat bridging the pores between grains. This clay texture severely reduces permeability. Rotligendes greywacke. 4) Lath or ribbon morphologies of illite originated by intensive mechanical compaction from micas and rock fragments. Rotligendes greywacke.



Estas diferencias texturales y mineralógicas podrían justificar la existencia de más de un momento de formación de ilitas, correspondiendo los interestratificados I-E de tipo *clay-rim* y las acintadas, al estar éstas relacionadas con la compactación mecánica de las areniscas (Smidt & McDonald, 1979) y proceder de la transformación de micas detríticas (Bjørlykke *et al.*, 1992), a la primera etapa (eodiagénesis-mesodiagénesis inmadura). Las ilitas fibrosas, derivadas de los interestratificados I-E, serían las más tardías en formarse, en las etapas de enterramiento más profundo, con un rango de temperaturas mínimo de 80-110°C (Eslinger & Pevear, 1988). Las muestras SS-12 y SS-135 son las más ricas en *clay-rim* de interestratificados I-E y en ilitas acintadas, y cuya autigénesis sería más temprana (edad más antigua: $199,6 \pm 4,34$ y $202,8 \pm 4,4$ m.a.). El resto de las muestras, con edades intermedias (Tabla 2) y más recientes, corresponderían a varios episodios de crecimientos de ilitas fibrosas entre el Lias superior y el Malm.

IMPLICACIONES DE LA EDAD DE LAS ILITAS CON LA EVOLUCIÓN GEODINÁMICA DE LA CUENCA PERMO-TRIÁSICA

La Cordillera Ibérica se caracteriza porque su historia sedimentaria y tectónica se ha desarrollado en un marco intracratónico, en el interior de la Placa Ibérica, y en las proximidad de dos áreas móviles: las Cordilleras Béticas y los Pirineos. Su individualización tuvo lugar en el Triásico, evolucionando como un graben complejo y transverso al margen pasivo bético-baleár, que ha sido interpretado por Álvaro, Capote & Vegas (1978) como un aulacógeno. Durante el Mesozoico estuvo sometido a un régimen de tectónica extensional impuesto por su ubicación entre dos áreas de *rifting* y de apertura oceánica, el Atlántico y el Tethys (Álvaro, 1987).

Durante la etapa de graben (Pérmico Superior a Trías Inferior y Medio) la Cordillera Ibérica es un graben complejo con geometría controlada por fracturas, que se rellena por sedimentos clásticos (*red beds*) y colmata con carbonatos de aguas someras (Muschelkalk). El Trías superior corresponde a la etapa de transición o paso de un mecanismo de subsidencia por *rifting* a otro por estiramiento y subsidencia térmica. La distensión permite el ascenso de materiales ígneos a favor de las principales fracturas: doleritas toleíticas (ofitas) en el aulacógeno y coladas de basaltos alcalinos en el área balear. Para Alvaro (1987) durante el Jurásico inferior tiene lugar una etapa de flexura con hundimiento de los bordes del

aulacógeno, que origina la transgresión liásica. El máximo estiramiento se produce en el Toarciense. La progresión del estiramiento culmina con la fragmentación de la plataforma carbonatada en el Dogger y la aparición de las efusiones de rocas básicas submarinas, cuya edad estaría entre el Toarciense superior y el Bajociense inferior y medio (Ancochea, Muñoz & Sagredo, 1988). En el Jurásico terminal (Kimmerigiense) se inicia la rotación de Iberia respecto a Europa, incrementándose aún más la inestabilidad tectónica (movimientos neokiméricos y áustricos) como consecuencia del inicio de un nuevo ciclo de *rifting*. La rotación se completa durante el Neocomiense y Barremiense, creándose un área oceánica en el Golfo de Vizcaya y Pirineos. Durante el Cretácico Superior el *rifting* del Jurásico-Cretácico Inferior da paso a una nueva etapa de subsidencia térmica que perdura hasta que se inicia la inversión tectónica de la región.

La estratigrafía secuencial y los análisis de subsidencia han permitido (Salas y Casas, 1993) distinguir cuatro etapas durante el Mesozoico en el margen oriental de la Cordillera Ibérica: 1) *rift* triásico (Pérmico Superior-Jurásico inferior); 2) *Post-rift* (Jurásico Inferior y Medio); 3) *rift* (Jurásico Superior-Cretácico Inferior); y 4) *Post-rift* (Cretácico Superior). Para estos autores, al final del Triásico y antes de la sedimentación de los carbonatos del Liásico, tuvo lugar un importante período de erosión, marcado por una brecha basal (Hetangiense) en discontinuidad con el Triás e indicando una formación de bloques basculantes debido a fallas lístricas. El incremento importante de temperatura (180°C) durante el estadio de *rift* del Triásico Superior causó el calentamiento y apertura del sistema K/Ar en los feldespatos (180-200 M.a.) en los granitos de la Cordillera Costero Catalana (Solé-Viñas, Delaloye & Enrique, 1991). La etapa *post-rift* del Jurásico Inferior y Medio fue controlada por subsidencia térmica y actividad volcánica en el sector valenciano de la Cordillera Ibérica (Ortí Cabo & Vaquer, 1980). Para Salas & Casas (1993) el *rift* del Jurásico Superior-Cretácico Inferior parece comenzar más tarde (Kimmerigiense) que en las cuencas del margen del Atlántico norte donde comienza en el Jurásico Medio-Superior. Asimismo opinan que existe una evolución paralela de la estratigrafía, discontinuidades y períodos de deformación entre la evolución del Mesozoico de la Cordillera Ibérica oriental y las del margen noratlántico, cuenca de Aquitania, basamento mesozoico de la cuenca del Ebro y la cuenca sur del Pirineo.

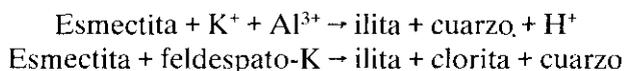
Bonhomme (1982, 1987) también llega a la conclusión de que en Europa occidental debió de ocurrir entre 185-160 M.a. un evento de gran magnitud, que pudo dar lugar a la neoformación de ilitas en las areniscas pérmicas y triásicas en las cuencas francesas y alemanas. Este autor rela-

ciona en el tiempo y en el espacio este hecho con el *rifting* y apertura del Atlántico norte y del Thetys. Su modelo explica que la tectónica tensional que acompaña a estos procesos induce a un adelgazamiento crustal que permite una mejor transmisión del flujo calorífico interno hacia la superficie. Esto produce un movimiento convectivo de los fluidos a través de los bloques de la corteza fallados y basculados, con la consiguiente alteración de los filosilicatos que puede ser datada isotópicamente.

Lee *et al.* (1989), en las areniscas del Rotliegendes del sur del Mar del Norte, encuentran una edad de 175 m.a. para las ilitas, relacionando la misma con los movimientos orogénicos del Kimmerigiense. Robinson, Coleman & Gluyas (1993), para la misma zona, encuentran una edad media de 158 M.a. \pm 18,6, pudiendo crecer las ilitas durante períodos relativamente cortos, coincidiendo con el *rifting* (durante el Jurásico Medio-Superior) y con el desarrollo de fallas extensionales y rápida subsidencia asociada con un incremento del flujo calorífico basal. Estos eventos fueron capaces de producir un movimiento regional del agua intersticial que a su vez fue responsable del crecimiento de la ilita fibrosa.

La dispersión de edades encontrada en la columna permo-triásica estudiada parece indicar que la ilita se formó durante un período relativamente largo de tiempo, lo que podría justificar sus distintos tipos texturales y las secuencias de cementación asociadas. Este período de tiempo, entre el Jurásico Inferior (Hettangiense) y el límite Calloviense-Oxfordiense, coincide con el momento en que la tectónica extensional fue más intensa en toda Europa, causando cambios importantes en el régimen hidrológico, temperaturas y presiones. Ante estos cambios los componentes más afectados, dentro de las potentes series siliciclásticas rojas profundamente enterradas y en contacto con el zócalo, serían los minerales de arcilla, cuyas reacciones principales darían también lugar a la precipitación de abundante cemento cuarzo.

Entre 60 y 100°C la esmectita y los interestratificados I-E se hacen inestables y se transforman en ilita (Hower *et al.*, 1976). Las principales reacciones que tienen lugar son:



La caolinita empieza a ser inestable entre 120-150°C (Hower, Eslinger & Perry, 1976), con lo que a 3.500-4.000 m de profundidad la reacción sería según Bjørlykke & Aagaard, 1992):



Todas estas reacciones explican el crecimiento en profundidad de la ilita autigénica, a partir de estas temperaturas, en las rocas almacén arcósicas. Para Bjørlykke & Aagaard (1992) la ilita procedente de la transformación esmectita→ilita es particularmente abundante en las rocas almacén del Pérmico y Triásico del Mar del Norte.

Los espesores de la serie Pérmico + Triásico + Lias + Dogger en la zona estudiada no alcanzan la profundidad teórica que hemos deducido a partir de los valores correspondientes a la reflectividad de la vitrinita y de las temperaturas de formación de la ilita fibrosa, con un gradiente geotérmico normal. Ello supone la existencia de gradientes térmicos elevados durante el Jurásico Inferior y Medio (superiores a un 50 % sobre los valores normales); es decir, una tasa de estiramiento y adelgazamiento cortical importante durante este período.

CONCLUSIONES

Las ilitas de las areniscas pérmicas y triásicas de la Cordillera Ibérica muestran varias etapas de formación dentro de la secuencia diagenética general.

Durante la eodiagénesis se neoforman *clay rims* de ilita, interestratificados I-E e interestratificados Cl-E, y se produce la alteración de feldespatos-K a interestratificados I-E, dependiendo de la salinidad de las aguas del ambiente de sedimentación. Estos cementos filosilicáticos aparecen tanto en las arcosas-subarcosas del Buntsandstein como en las sublitoarenitas y grauvascas del Pérmico.

En la etapa de enterramiento moderado, mesodiagénesis inmadura (Schmidt & McDonald, 1979) se forman las ilitas acintadas, por desagregación de micas y fragmentos de roca micáceos, como consecuencia de la compactación mecánica. Este proceso tiene lugar fundamentalmente en las grauvascas del Pérmico.

En la etapa de enterramiento profundo, mesodiagénesis madura (Schmidt & McDonald, 1979), se neoforman las ilitas fibrosas a partir de interestratificados I-E, feldespatos-K, interestratificados Cl-E y caolinitas. Esta generación es posterior al cemento de cuarzo y a los cementos carbonáticos más tardíos, pero anterior a las caolinitas-dickitas relacionadas con la fracturación y emersión de la cuenca (telodiagénesis).

La formación de illita acintada y de illita fibrosa en las areniscas pérmicas ha reducido la porosidad primaria y la permeabilidad a valores por debajo de su capacidad como roca almacén (8 % valor máximo de porosidad y 0,1 md de permeabilidad).

Los *clay rim* de I-E y los feldespatos alterados a I-E en las arcosas y subarcosas del Buntsandstein, al estar su proceso de transformación a illita fibrosa en fase moderada, han dejado valores aceptables de porosidad y permeabilidad, conservando su capacidad como roca almacén (hasta 18 % de porosidad y 73 md de permeabilidad).

La madurez de la materia orgánica encontrada en los niveles más bajos del Pérmico ha permitido obtener temperaturas máximas entre 134,8 y 159,5°C y profundidades de enterramiento entre 3.800-4.500 m, valores que estarían de acuerdo con los obtenidos para la neoformación de illita en el Pérmico del Mar del Norte.

Las edades absolutas encontradas para las illitas oscilan entre $202,8 \pm 4,4$ M.a. y $153,8 \pm 3,4$ M.a., es decir, desde el límite Hettangiense-Sinemuriense hasta el Calloviense-Tithoniense. Este período de tiempo coincide con el momento en que la tectónica extensional fue más intensa en la cuenca, con desarrollo de numerosas manifestaciones volcánicas que provocarían la elevación de los flujos caloríficos basales y el movimiento convectivo de los fluidos a partir de los cuales se neoformarían las illitas fibrosas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado en el marco del proyecto DGICYT PB92-0724. Los autores expresan su agradecimiento al Dr. Albert Permanyer, de la Universidad de Barcelona, por las determinaciones de la reflectividad de la vitrinita, y al Dr. Mariano Álvaro, de CGS, por la crítica del manuscrito y aportación de ideas muy interesantes para la realización de este trabajo.

NOTA BIBLIOGRÁFICA:

- ÁLVARO, M. (1987): «La subsidencia tectónica en la Cordillera Ibérica durante el Mesozoico», *Geogaceta*, 3: 34-37.
- ÁLVARO, M.; CAPOTE, R. & VEGAS, R. (1978): «Un modelo de evolución geotectónica para la cadena Celtibérica», *Acta Geol. Hisp.*, 14: 172-177.
- ANCOCHEA, E.; MUÑOZ, M. & SAGREDO, J. (1988): «Identificación geoquímica del vulcanismo jurásico de la Cordillera Ibérica», *Geociencias, Aveiro*, 3: 15-22.
- ARONSON, J. & BURTNER, R. L. (1983): «K/Ar dating of illitic clays in Jurassic Nugget Sandstone and timing of petroleum migration in Wyoming Overthrust Belt (abs.)», *Bull. Am. Assoc. Petrol. Geol.*, 67: p. 414.

- ARRIBAS, J.; MARFIL, R. & DE LA PEÑA, J. A. (1985): «Provenance of Triassic feldspathic sandstones in the Iberian Range (Spain): significance of quartz types», *Jour. Sed. Petrol.*, 55: 864-868.
- BARKER, C. E. & PAWLEWICZ, M. J. (1986): «The correlation of vitrinite reflectance with maximum temperature in humic organic matter», en BUNTEBARTH, G. & STEGENA, L. (eds.): «Lecture Notes in Earth Sciences», 5, *Paleogeothermics*: 79-93.
- BEAR, D. C. & WEYL, R. E. (1973): «Influence of texture on porosity and permeability of unconsolidated sand», *Bull. Am. Assoc. Pet. Geol.*, 57: 349-369.
- BJØRLYKKE, K. & AAGAARD, P. (1992): «Clay minerals in North Sea sandstones», en *Diagenesis and Petrophysics of clay minerals in sandstones*, SEPM, *Special Publ.*, 47: 65-80.
- BJØRLYKKE, K.; NEDKVITNE, T.; RAMM, M. & SAIGAL, G. C. (1992): «Diagenetic processes in the Brent Group (Middle Jurassic) reservoirs of the North Sea: an overview», en MORTON, A. C.; HASZELDINE, R.S.; GILES, M. R. & BROWN, S. (eds.), *Geology of the Brent Group*. Geological Society, Special Publication, 61: 263-287.
- BONHOMME, M. G. (1982): «The use of Rb/Sr and K/Ar dating methods as a stratigraphic tool applied to sedimentary rocks and minerals. *Precambrian Res.*, 18: 5-25.
- (1987): «Type of sampling and comparison between K/Ar and Rb/Sr isotopic dating of fine fractions from sediments in attempt to date young diagenetic events», *Chemical Geology (Isotope Geoscience Section)*, 65: 209-222.
- BOSTICK, N. H. (1979): «Microscopic measurement of the level of catagenesis of solid organic matter in sedimentary rocks to aid exploration for petroleum and to determine former burial temperatures: a review», *SEPM, Spec. Publ.*, 26: 17-43.
- CLAUER, N. (1976): «Géochimie isotopique du strontium des milieux sédimentaires. Application à la géochronologie de la couverture du craton ouest-africain», *Sci. Géol. Mém., Strasbourg*, 45: 236 pp.
- CLAUER, N.; SOMMER, F. & LIEWING, N. (1982): «Difficulties in Rb/Sr and K/Ar dating of oil reservoirs (abs.)», *Fifth International Conference on Geochronology, Cosmochronology and Isotope Geology*, Nikko National Park, Japan: p. 57.
- DE LA PEÑA, J. A.; ARIBAS, J.; DE LA CRUZ, B. & MARFIL, R. (1983): «Diagenetic model of Permo-Triassic continental and transitional sandstones (red beds) in the Iberian Range, Spain», *4th IAS. European Meeting, Split, Yugoslavia*, Abstr.: 137-139.
- ESLINGER, E. & PEVEAR, D. (1988): «Clay minerals for Petroleum Geologists and Engineers», *Society of Economic Palaeontologists and Mineralogists, Short course Notes*, 22: 363 pp.
- GLASMANN, J. R.; CLARK, R. A. & LATER, S. R. (1986): «Episodic diagenesis on the Bergen High: implications of illite/smectite K/Ar dates (abs.)», *Terra Cognita*, 6: p. 110.
- GLASMANN, J. R.; LUNDEGARD, P. D.; CLARK, R. A.; PENNY, B. K. & COLLINS, I. D. (1989): «Geochemical evidence for the history of diagenesis and fluid migrations: Brent Sandstone, Heather field, North Sea», *Clay Minerals*, 24: 255-284.
- GOVINDARAJU, K. (1987): «Compilation report on Aisla Craig granite AC-E with the participation of 128 CIT-IWG laboratories», *Geostandards Newsletters*, 11 (2): 203-255.
- HARLAND, W. B.; ARMSTRONG, R. L.; COX, A. V.; CRAIG, L. E.; SMITH, A. G. & SMITH, D. G. (1989): *A geological time scale 1989*. Cambridge University Press.

- HOWER, J.; ESLINGER, E. V. & PERRY, E. A. (1976): «Mechanism of burial metamorphism of argillaceous sediments», en *Mineralogical and Geochemical evidence. Geol. Soc. of Amer. Bull.*, 87: 725-737.
- LEE, M.; ARONSON, J. L. & SAVIN, S. M. (1989): «Timing and conditions of Permian Rotliegende sandstone diagenesis, Southern North Sea: K/Ar and oxygen isotopic data», *Bull. Amer. Assoc. Pet. Geol.*, 73: 195-215.
- LUNDERGARD, P. D. (1989): «Temporal reconstruction of sandstone diagenetic histories», en HUTVCHON, I. E. (ed.), *Short Course in Burial Diagenesis*. Mineralogical Association of Canada, 15: 161-200.
- MAHOOD, G. A. & DRAKE, R. E. (1982): «K/Ar dating young volcanic rocks, a case study of the Sierra La Primavera, Jalisco, Mexico», *Geol. Soc. Am. Bull.*, 93: 1232-1241.
- MARFIL, R. & BUENDÍA, E. (1980): «La evolución diagenética de los sedimentos detríticos del Pérmico y Triásico del sondeo de Sigüenza (Guadalajara)», *Revista del Inst. de Inv. Geológicas, Diputación Provincial, Univ. Barcelona*, 34: 59-74.
- MARFIL, R. & DE LA PEÑA, J. A. (1981): «Diagenetic aspects of Permian sandstones in Central Spain: Implication for graywacke genesis», *1th IAS European Meeting*, Bochum, Alemania, Abstr.: 158-160.
- MARFIL, R.; TURRERO, M.^a J. & SCHERER, M. (in litt.): «Diagenetic processes influencing porosity in an arkosic sandstone from the Triassic Buntsandstein facies of the Iberian Range», *Sedimentary Geology*, Spain.
- MITRA, S. & BEAR, W. C. (1980): «Theoretical models of porosity reduction by pressure solution for well-sorted sandstones», *Journal of Sedimentary Petrology*, 50: 1347-1360.
- MORAD, S.; MARFIL, R. & DE LA PEÑA, J. A. (1989): «Diagenetic K-feldspar pseudomorphs in the Triassic Buntsandstein of the Iberian Range, Spain», *Sedimentology*, 36: 635-650.
- MORAD, S.; AL-AASM, I. S.; RAMSEYER, K.; MARFIL, R. & ALDAHAN, A. A. (1990): «Diagenesis of carbonate cements in Permo-Triassic sandstones from the Iberian Range, Spain: evidence from chemical composition and stable isotopes», *Sedimentary Geology*, 67: 281-295.
- MOSSMANN, J. R.; CLAUER, N. & LIEWIG, N. (1992): «Dating thermal anomalies in sedimentary basins: the diagenetic history of clay minerals in the Triassic sandstones of the Paris Basin (France)», *Clay Minerals*, 27: 211-226.
- MOORE, D. M. & REYNOLDS, R. C. J. (1989): *X-Ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals*, Oxford Univ. Press.: 332 pp.
- NAGTEGAAL, P. J. C. (1980): «Diagenetic models for predicting elastic reservoir quality», *Revista del Inst. de Inv. Geológicas, Diputación Provincial, Univ. Barcelona*, 34: 5-19.
- ODIN, G. S. & ODIN, Ch. (1990): «Echelle numérique des temps géologiques», *Géochronique*, 35: «12-21.
- ORTI CABO, F. & VAQUER, R. (1980): «Volcanismo jurásico del sector valenciano de la Cordillera Ibérica. Distribución y trama estructural», *Acta Geol. Hisp.*, XV: 127-130.
- PERRY, E. A. & HOWER, J. (1970): «Burial diagenesis in Gulf. Coast pelitic sediments», *Clay and Clay Minerals*, 18: 165-177.
- RITTENHOUSE, G. (1971): «Mechanical compaction of sands containing different percentages of ductile grains: a theoretical approach», *Bull. Am. Assoc. Petrol. Geol.*, 55: 92-96.

- ROBINSON, A. G.; COLEMAN, M. L. & GLUYAS, J. G. (1993): «The age of illite cement growth, Village Fields Area, Southern North Sea: Evidence from K/AR ages and 18O/16O ratios», *Bull. Am. Assoc. Petrol. Geol.*, 77: 68-80.
- SALAS, R. & CASAS, A. (1993): «Mesozoic extensional tectonics, stratigraphy and crustal evolution during the Alpine cycle of the eastern Iberian basin», *Tectonophysics*, 228: 33-35.
- SCHMIDT, V. & McDONALD, D. A. (1979): «The role of secondary porosity in the course of sandstone diagenesis», *SEMP, Spec. Publ.*, 26: 175-207.
- SCHERER, M. (1987): «Parameters influencing porosity in sandstones: «A model for sandstone porosity prediction», *Bull. Am. Assoc. Petrol. Geol.*, 71: 485-491.
- SHELL-J. E. N. (1980): Informe sondeo Sigüenza 44-3.
- SOLÉ-VIÑAS, J.; DELALOYE, M. & ENRIQUE, P. (1991): «Géochimie et Géochronologie des granites du Mont Negre et de la Costa Brava. Granites Océaniques et continentaux, Séance spécialisée», *Soc. Géol. Fr. Paris*: 1 p.
- STEIGER, R. H. & JÄGER, E. (1977): «Subcommission on Geochronology: Convention on the use of decay constants in geo and cosmochronology», *Earth Planet. Sci. Lett.*, 36: 359-362.

Manuscrito recibido: 27 de junio 1994

Manuscrito aceptado: 14 marzo 1995