

Control diagenético sobre la porosidad y permeabilidad en areniscas-almacén cretácicas (área Salam, Western Desert, Egipto)

Diagenetic control on porosity and permeability in Cretaceous reservoir sandstones (Salam area, Western Desert, Egypt)

C. Rossi (*), R. Marfil (*) y A. Permanyer (**)

(*) Dpt. de Petrología y Geoquímica, U.C.M. 28040 Madrid.

(**) Dpt. de Geoquímica, Petrología y Prospección Geológica, Zona Univ. Pedralbes, 08028 Barcelona.

ABSTRACT

Petrographic analysis of core samples of reservoir sandstones from the Salam Field show that porosity and permeability are strongly influenced by diagenesis. The studied sandstones can be subdivided into two populations that reflect major differences in the origin of porosity and in the diagenetic evolution: (1) Sandstones with dominance of primary intergranular porosity, in which porosity reduction is mainly due to compaction and quartz overgrowths. This category includes the shallow marine glauconitic quartzarenites to subarkoses of the Bahariya Fm and of the upper part of Alam El Bueib Fm (unit 3A). Modal porosities range 10-17% and permeabilities do not exceed 300 md. Compactional porosity loss (usually around 20% of initial volume) increases with increasing ductile grain content and decreases with the presence of early siderite cement (which acts as a framework-strengthening agent). (2) Sandstones with dominance of intergranular secondary porosity generated after leaching of pore-filling/grain-replacing ferroan dolomite cement. This category includes the fluvial quartzarenites of the lower part of Alam El Bueib (units 5A and 3E) and of the middle part of Lower Bahariya. Reservoir quality is optimum in this group, as porosities are usually around 20% and permeabilities are commonly very high (over 1000 md).

Key words: reservoir quality, sandstone diagenesis, primary porosity, secondary porosity

Geogaceta, 20 (1) (1996), 172-175

ISSN: 0213683X

Introducción

La calidad como roca almacén de una arenisca depende de la interacción de una serie de variables, tanto deposicionales como diagenéticas. Identificar estas variables y establecer su importancia relativa es clave en los estudios de predicción de porosidad-permeabilidad. Estos estudios son básicos en exploración de hidrocarburos, donde la sobreestimación del factor almacén se considera como la causa directa de hasta un 40% de los pozos secos (Rose, 1987).

En el sector noroccidental del *Western Desert* egipcio, una serie de campos producen petróleo en distintos niveles de una potente serie jurásico-cretácica, rica en areniscas fluvio-deltaicas (El Shazly, 1977; Van Houten, 1980; May, 1991). La composición de estas areniscas es cuarzoarenítica y varía relativamente poco en la vertical, lo que facilita el análisis de los efectos de la diagénesis sobre la porosidad-permeabilidad en los distintos niveles productores. En este artículo se resumen los resultados preliminares de un análisis pe-



Fig. 1.- Localización del Campo Salam en el Western Desert egipcio.

Fig. 1.- Location of the Salam oil Field in Egypt's Western Desert.

trológico realizado sobre muestras de testigos procedentes del Campo Salam (Fig. 1). Este campo produce en la actualidad en torno a 6000 BODP a partir de areniscas de las Formaciones Alam El Bueib (Valanginiense a Barremiense) y Bahariya (Albiense superior a Cenomanense inferior) (Fig. 2). La Formación Alam El Bueib (AEB), con casi 1000 m de potencia, está formada por 6 unidades. Los almacenes principales están en las areniscas fluviales masivas de las unidades 3 y 5; las unidades 1, 4 y 6 son predominantemente lutíticas y la unidad 2 es carbonática. Los principales almacenes de la Formación Bahariya (BAH) son las areniscas glauconíticas, marinas someras, de la parte inferior de la formación.

En los almacenes de la Formación Bahariya predomina la porosidad primaria asociada a permeabilidades moderadas, siendo la compactación y el cemento de cuarzo los factores principales de reducción de la porosidad. La influencia de la diagénesis en la porosidad-permeabilidad es más decisiva en las areniscas de la formación Alam El Bueib, que

constituyen buenos ejemplos de almacenes con porosidad intergranular secundaria (por disolución de cementos carbonáticos) y permeabilidad asociada muy alta. Aparte de su posible aplicación local en predicciones de calidad, el estudio de este tipo de almacenes es también de interés general, al ser aún objeto de polémica muchas cuestiones relacionadas con la porosidad secundaria intergranular: su origen, su influencia en la permeabilidad y porosidad total o su posible predicción (Schmidt y McDonald, 1979; Bjorlykke, 1984; Giles, 1987; Surdam *et al.*, 1989; Bloch, 1994).

Métodos

Este trabajo se basa en el estudio de muestras de testigos procedentes de cuatro pozos del Campo Salam, cuyos intervalos testificados combinados cubren la mayor parte de las unidades productoras. Después de eliminar el petróleo de la porosidad mediante disolventes orgánicos, las muestras se impregnaron al vacío con resina de poliéster coloreada. De cada muestra se obtuvieron varias láminas delgadas, tanto láminas estándar teñidas selectivamente para facilitar la distinción de carbonatos y feldespatos, como láminas con doble pulido sin teñir. Después de su estudio petrográfico, se realizaron contajes modales sobre un mínimo de dos láminas por muestra, obteniéndose así un mínimo de 600 puntos por muestra. El estudio de la morfología de los poros y sus relaciones con los cementos se complementó mediante la observación al microscopio electrónico de barrido. La composición mineralógica se confirmó mediante difracción de rayos X.

Areniscas de la Formación Bahariya

a) Areniscas glauconíticas con porosidad primaria

Gran parte de la producción actual del Campo Salam procede de las areniscas glauconíticas (barras submareales) de la parte inferior de la Formación Bahariya. Las muestras estudiadas son cuarzoarenitas algo subarcóicas de grano fino y muy bien seleccionadas. Son ricas en láminas arcillosas y en granos dúctiles de origen intracuencial: arcillosos (1-8%), glauconíticos (1-4%) y, en menor medida, fosfáticos y micríticos. La porosidad modal de estas areniscas varía entre el 10 y el 17%. El tipo de porosidad dominante es la primaria intergranular, con una pequeña contribución de porosidad secundaria (no más del 1%) generada por disolución de granos de feldespato y algo de dolomita. La interpretación de la porosidad intergranular como primaria está basada en la siguiente observación: los poros están bordeados o por cementos sintaxiales de cuarzo sin corroer o por cementos tempranos de siderita también sin co-

roer (Fig. 3a-b), no observándose ningún indicio de la presencia previa de un cemento carbonático extensivo. La permeabilidad no supera los 300 md, una cifra moderada si se compara con la de las areniscas de la formación AEB (ver más adelante). La causa de este "descenso relativo" en la permeabilidad está relacionado con la presencia de arcilla deposicional (granos y láminas) y con el estrechamiento de las uniones entre poros por la interferencia de los abundantes recrecimientos de cuarzo.

El principal factor diagenético de reducción de la porosidad en estas areniscas es la compactación mecánica, favorecida por la abundancia de granos dúctiles, que se deforman plásticamente para generar pseudomatriz. Los valores calculados de la reducción de porosidad por compactación (COPL) son relativamente altos (tabla 1), estando normalmente en torno al 20% del volumen inicial. Este parámetro aumenta al crecer el contenido en granos dúctiles y disminuye en presencia de cemento temprano de siderita.

La reducción de la porosidad por cementación, especialmente por cuarzo, representa entre el 10 y el 17%. Una generación de cemento sintaxial de feldespato potásico aparece de forma esporádica. Localmente se desarrollan envueltas circumgranulares de cemento de siderita (fig. 3a-b), de desarrollo preferente sobre granos de glauconita, arcillosos y micríticos. El cemento de siderita es previo a la compactación, y suele estar englobado por cemento de cuarzo posterior. La presencia del cemento siderítico ejerce una influencia positiva sobre la porosidad, ya que aumenta muy pronto la resistencia mecánica de la arenisca, lo suficiente como para inhibir la deformación plástica de los granos dúctiles. Tanto el cemento de feldespato como el de siderita son muy tempranos, originados probablemente a partir del agua del mar. Los cementos sintaxiales de cuarzo representan entre el 5 y el 12%, siendo por tanto un factor esencial en la reducción de la porosidad. Su abundancia es inversamente proporcional a la cantidad de pseudomatriz. Una generación de dolomita ferrosa idiomórfica cementa esporádicamente y, sobre todo, reemplaza selectivamente granos de glauconita. Esta dolomita es posterior al cemento de cuarzo y tiene en general poca influencia sobre la porosidad, dada su escasa representación. Trazas de pirita y caolinita aparecen como cementos tardíos y como reemplazamientos de granos arcillosos y mica.

b) Cuarzoarenitas con porosidad secundaria

En la Formación Bahariya se han detectado también areniscas con porosidad secundaria, situadas estratigráficamente por debajo de las anteriores. Se trata de areniscas de composición cuarzoarenítica, sin apenas feldespatos ni intracuenciales; la alta porosidad intergranu-

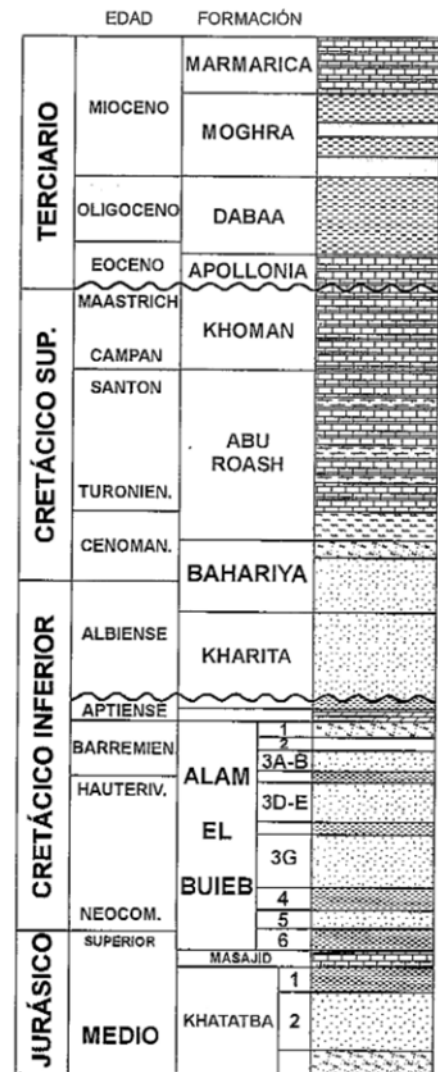


Fig. 2.- Estratigrafía sintética en el área del Campo Salam.

Fig. 2.- Salam area general stratigraphy.

lar no es primaria sino secundaria, originada por disolución de cementos mesodiagenéticos de dolomita y baritina, preservándose restos escasos de ambos minerales parcialmente disueltos. Una generación de cemento de caolinita ocupa hasta un 5% de la porosidad intergranular, pudiendo ser la causa de una cierta disminución en la permeabilidad.

Areniscas de la Formación Alam El Bueib

a) Subarcosas de la unidad 3A

Desde el punto de vista tanto petrofísico como de evolución diagenética, las areniscas de la unidad 3A pueden dividirse en dos grupos: (1) subarcosas con porosidad primaria y permeabilidades moderadas, y (2) subarcosas con porosidad secundaria y permeabilidades muy altas.

(1) Las subarcosas con porosidad primaria están situadas estratigráficamente en la par-

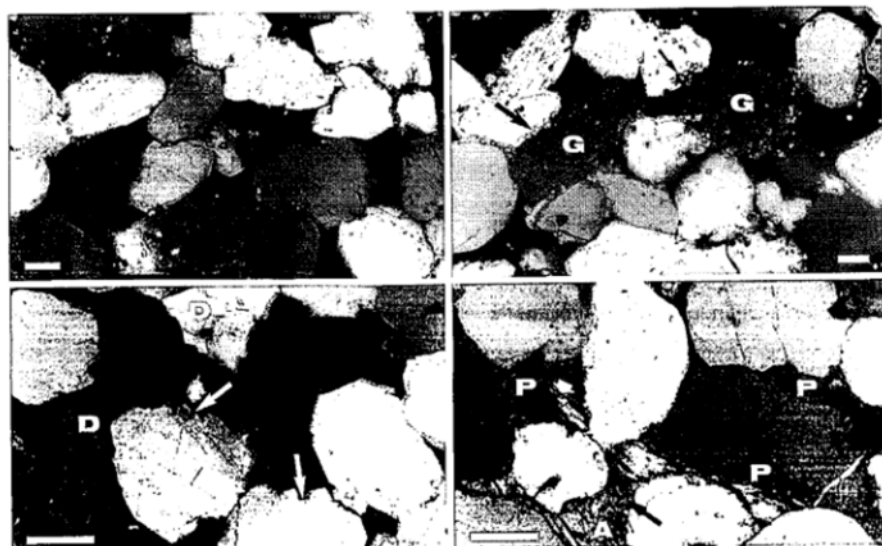


Fig. 3.- Petrografía de la porosidad primaria y secundaria. A-B: Cuarzoarenitas glauconíticas con porosidad primaria (en negro), bordeada por recrecimientos sintaxiales idiomorfos de cuarzo sin corroer o por siderita (flechas), ésta desarrollada preferentemente sobre granos de glauconita (G). Muestra 6163/4, nicoles cruzados. C: Porosidad intergranular secundaria (en negro) con prominentes bordes de corrosión (flechas) sobre los granos de cuarzo y sus recrecimientos. Restos de dolomita (D), parcialmente disueltos. Muestra 10131/4, nicoles cruzados. D: Porosidad intergranular secundaria (P), con bordes de corrosión y restos de cemento ankerítico (A) parcialmente disuelto (flechas). Escala: 0.1 mm.

Fig. 3.- Petrographic aspects of primary and secondary porosity.

el caso de la Formación Bahariya, las causas de que la permeabilidad sea moderada son la abundancia de cemento de cuarzo y la presencia de pseudomatrix y láminas arcillosas.

(2) Las subarcosas con porosidad secundaria están situadas en la parte inferior de la unidad 3A, en facies de areniscas masivas fluviales (*braided* de arenas). La porosidad es alta y secundaria por disolución generalizada de un cemento de dolomita. La permeabilidad es también muy alta, dado el predominio neto de macroporosidad muy bien conectada y la escasez de cementos arcillosos.

La composición de los dos tipos de areniscas sólo se diferencia en el mayor contenido en granos y láminas arcillosas que presentan las subarcosas con porosidad primaria. La verdadera diferencia es diagenética: mientras las subarcosas con porosidad primaria no desarrollaron cemento carbonático durante el enterramiento, en las areniscas del grupo (2) este cemento-reemplazamiento fue generalizado. Ambos tipos de areniscas sufrieron un lavado posterior: en las primeras sólo afectó a granos de feldespato, mientras que en las segundas supuso también la disolución del carbonato, traduciéndose en porosidades y permeabilidades elevadas. Tras el evento de disolución, la evolución diagenética es común: cemento minoritario de caolinita, migración del petróleo y cemento minoritario de piritita.

b) Cuarzoarenitas fluviales de las unidades 3E y 5

Las unidades 3E y 5 están formadas por areniscas fluviales masivas organizadas en cuerpos de varios metros de potencia con pocas intercalaciones arcillosas (depósitos de sistemas *braided* de arenas). Su composición es cuarzoarenítica pura y su calidad como almacenes es desde óptima (unidad 3E) a moderada (unidad 5)

La porosidad modal varía entre el 16-20% (unidad 3E) y el 12% (unidad 5). La única clase de porosidad presente es la intergranular secundaria por disolución de cementos/reemplazamientos dolomíticos. El origen secundario de la porosidad está apoyado por lo siguiente: (1) siempre se preservan restos de dolomita, parcial o casi totalmente disueltos (Fig. 3c-d); (2) la mayoría de los poros presenta bordes corroídos serrados (Fig. 3c), afectando esta corrosión tanto a cementos como a granos detríticos de cuarzo; (3) los poros presentan formas muy irregulares, estando presentes tanto auténticos poros agrandados como poros con bordes de corrosión situados en las zonas de contacto entre granos. La porosidad primaria de estas areniscas fluviales se redujo drásticamente durante el enterramiento, tanto por compactación como por cementación (de cuarzo y sobre todo de dolomita). Esta dolomita llegó a suponer el 20-25% de la roca, dependiendo de su carácter reemplazante sobre el cemento de cuarzo.

muestra Unidad	6141/4 BAHAR	6155/4 BAHAR	6163/4 BAHAR	6311/4 BAHAR	7571/26 KHARI	8290/4 AEB 3A	8319/4 AEB 3A	8709/4 AEB 3E	8732/4 AEB 3E	10131/4 AEB 5A
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Cuarzo detrítico	56.80	64.24	63.53	68.77	55.00	66.12	64.17	70.32	77.76	68.3
Feldespato detrítico	3.80	1.85	0.44	0.62	0.67	4.86	3.83	0.00	0.00	0.00
Granos dúctiles (1)	9.00	0.90	2.08	0.00	0.00	2.36	0.00	0.00	0.00	0.00
granos reempl. por dolom.	5.40	3.51	0.12	0.00	9.00	0.00	0.00	1.40	0.00	0.30
granos reempl. por piritita	2.00	1.75	0.08	0.00	0.17	3.44	1.00	0.00	0.50	0.00
volumen granular	77.00	72.67	66.77	70.73	65.67	77.60	70.50	71.72	78.17	68.6
volumen intergranular	23.00	27.33	33.23	29.27	34.33	22.40	29.50	28.28	21.83	31.40
Compactación (COPL) (2)	22.08	17.98	11.18	9.5	8.63	22.68	22.68	16.34	23.24	12.54
Volúmen de cementos	10.00	17.75	16.63	5.85	32.67	6.61	11.33	8.24	5.50	19.65
Volúmen de reemplazam.	7.40	5.26	0.20	0.00	9.17	3.44	1.00	1.40	0.50	0.30
Cemento de cuarzo	5.00	12.04	12.24	3.26	1.17	4.39	8.00	2.12	4.00	10.40
Cemento de dolomita-fe	4.40	4.06	0.44	0.39	31.00	0.00	0.00	5.84	0.33	8.50
Cemento de caolinita	0.20	0.30	0.16	1.97	0.00	0.07	0.50	0.12	0.00	0.20
Cemento de illita	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.20
Cemento de piritita	0.40	1.35	0.32	0.23	0.50	1.96	1.50	0.16	0.67	0.35
Cemento de siderita	0.00	0.00	3.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cemento de feldesp-K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00
Otros cementos	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	1.33	0.00	0.00	0.00
Macroporosidad	13.00	9.98	16.59	24.65	1.67	16.60	18.83	20.04	16.33	11.75
Porosidad primaria	13.00	8.62	16.59	0.00	1.67	15.79	0.00	0.00	0.00	0.00
Por. secundaria intergran.	0.00	0.96	0.00	24.65	0.00	0.00	18.16	20.04	16.33	11.75
Por. secundaria intragran.	0.00	0.40	0.00	0.00	0.00	0.81	0.67	0.00	0.00	0.00

Tabla 1: Síntesis de la composición modal de una decena de muestras representativas. (1) Incluye granos arcillosos y micas. (2) Pérdida de porosidad por compactación, referida al volumen inicial y asumiendo una porosidad inicial del 40%.

Table 1: Modal composition of some representative samples.

te superior de la unidad, en facies de llanura deltaica ricas en intercalaciones lutíticas. La porosidad es en su mayoría intergranular primaria, con una pequeña contribución de intragranular secundaria por disolución de gra-

nos de feldespato. Al igual que en las areniscas glauconíticas de la Formación Bahariya, el principal factor reductor de la porosidad es la compactación, seguido por los cementos de cuarzo y en menor medida de piritita. Como en

El grado de disolución de la dolomita es muy alto en la unidad 3E, cuyas areniscas alcanzan porosidades en torno al 20%. En la unidad 5, la disolución es sólo parcial, por lo que las porosidades apenas superan el 10%.

El predominio neto de macroporosidad y la escasez de cementos arcillosos provocan que la permeabilidad de estas areniscas sea muy alta y que dependa directamente de la magnitud de la porosidad. Así, las areniscas más porosas (16-20%) de la unidad 3E presentan las permeabilidades más altas (por encima de 2000 md).

La cementación-decementación es sin duda el principal control sobre la porosidad. El cemento de cuarzo debió representar inicialmente en torno al 10% de la roca, aunque su proporción final depende de su grado de reemplazamiento posterior por carbonato (estando éste actualmente disuelto o no). Precisamente las muestras más porosas son las que presentan contenidos en cemento de cuarzo más bajos (2-6%), no por su ausencia inicial, sino por haber sido reemplazado posteriormente por dolomita (hoy disuelta). El cemento de dolomita ferrosa (ankerita) es claramente post-compactación y post-cemento de cuarzo, al que reemplaza parcialmente. El contenido actual en dolomita varía entre el 0,3 y el 9%, aunque previamente a su disolución debió representar en torno al 20-26%. Estas areniscas también desarrollan cementos tardíos de caolinita, illita y pirita, que precipitan por este orden en poros secundarios y representan un factor poco importante en la reducción de la porosidad.

La compactación tiene una influencia limitada sobre la porosidad. La pérdida de porosidad por compactación durante el enterramiento es moderada (12-23% del volumen inicial), traducéndose en volúmenes intergranulares relativamente altos (22 a 31%) fruto de la alta estabilidad mecánica del esqueleto.

La secuencia diagenética de estas cuarzoarenitas puede resumirse de esta forma: (1) La compactación y el cemento de cuarzo reducen la porosidad primaria en torno al 20%; (2) dolomita más o menos ferrosa cierra o reduce drásticamente la porosidad primaria; (3) disolución parcial del cemento carbonático, creando porosidad secundaria (hasta un 20%); (4) cemento minoritario de caolinita; (5) cemento minoritario de illita; (6) migración de los hidrocarburos; (7) cemento de pirita.

Discusión y conclusiones

Las areniscas estudiadas pueden dividirse en dos grandes grupos según su porosidad-permeabilidad: (1) areniscas con porosidad primaria y permeabilidades moderadas; (2) areniscas con porosidad secundaria y permeabilidades generalmente muy altas.

(1) Areniscas con porosidad primaria y permeabilidades moderadas: en este grupo se incluyen tanto las areniscas glauconíticas de la Formación Bahariya como las subarcosas de la parte superior de la unidad 3A de la Formación Alam el Bueib. Predomina la porosidad intergranular primaria (10-16%) complementada con una pequeña porción de porosidad secundaria intragranular por disolución de feldespato (no más del 1%). El principal factor de reducción de porosidad es la compactación, favorecida por la presencia de arcilla deposicional (granos y láminas). El segundo factor de reducción es la cementación por cuarzo y en menor medida por pirita. La permeabilidad es moderada en comparación con el grupo (2), debido a la presencia de pseudo-matriz y láminas arcillosas y a la abundancia de recrecimientos de cuarzo.

(2) Areniscas con porosidad secundaria y permeabilidades generalmente muy altas: En este grupo se incluyen la mayoría de las areniscas de la de la Formación Alam el Bueib (parte inferior de la unidad 3A, y unidades 3E y 5), además de algunas areniscas de la parte inferior de la Formación Bahariya. La calidad como almacenes de este tipo de areniscas es óptima. En todas hay un predominio neto de porosidad intergranular secundaria por disolución de cementos/reemplazamientos de dolomita ferrosa. Este carbonato reemplazó parcialmente tanto a los recrecimientos sintaxiales como a los propios granos detríticos; por consiguiente, los poros dejados tras la disolución del carbonato son más grandes y mejor conectados que en el caso de que el cuarzo (granos o cemento) hubiese sido respetado. Esta es la causa de que en estas areniscas las porosidades (normalmente en torno al 20%) y sobre todo las permeabilidades (normalmente por encima de 1000 md) sean tan altas, dependiendo en última instancia del grado de disolución del carbonato. Estas areniscas constituyen pues un caso en el que el predominio de porosidad secundaria intergranular supone no sólo un aumento de la porosidad total, sino también y, sobre todo, un aumento drástico de la permeabilidad.

Las diferencias composicionales entre ambos grupos de areniscas son poco importantes, aunque las del grupo (1) tienden a ser algo más ricas en feldespatos y granos arcillosos, reflejando probablemente un control de facies deposicionales (marinas o costeras en (1) y fluviales en (2)). Las primeras etapas de la diagénesis tampoco son radicalmente distintas, ya que ambos grupos sufren reducciones de porosidad importantes durante el enterramiento: por compactación (10-20% del volumen inicial) y por cemento de cuarzo (en torno al 10%). Donde reside la diferencia esencial entre ambos grupos de areniscas es en el desarrollo de un cemento-reemplazamiento mesodiagenético de dolomita ferrosa,

que mientras en las del grupo (2) fue extensivo, en las del grupo (1) estuvo prácticamente ausente. Con o sin cemento dolomítico, en todas las areniscas de ambos grupos hay indicios de una disolución posterior, especialmente intensa en las de la Formación Alam el Bueib. En las areniscas del grupo (1) esta disolución es más débil y afecta sólo a los granos de feldespato, casi los únicos componentes solubles, aumentando levemente la porosidad pero no la permeabilidad. En las areniscas del grupo (2), la disolución crea porosidad por eliminación del carbonato que la cerraba y aumenta espectacularmente la permeabilidad.

La circulación regional de aguas meteóricas asociada a alguna discontinuidad parece el único mecanismo capaz de producir un lavado tan generalizado y efectivo (Bloch, 1994), especialmente en el caso de las areniscas de la formación Alam el Bueib. Dos discontinuidades regionales (fig. 2) parecen lo bastante importantes como para provocar la infiltración generalizada de aguas meteóricas: la Barremiense-Albiense y la post-Maastrichtiense pre-Eocena.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias a Repsol Investigaciones Petrolíferas S.A. y Khalda Petroleum Co., que facilitaron tanto el muestreo en *Salam Base* como la consulta de datos geológicos básicos en El Cairo. En este sentido agradecemos especialmente la ayuda y cordialidad de P. Cámara, F. Martínez Fresneda, R. Ferrando y J. Suárez en El Cairo. D. Pérez y A. Morsi prestaron una valiosa ayuda durante los muestreos. Este trabajo ha sido financiado parcialmente por el proyecto DGI-CYT PB92-0724.

Referencias

- Bjorlykke, K. (1984). *AAPG Memoir*, 37, 277-286.
- Bloch, S. (1994). *SEPM Short Course*, 30, p. 137-159.
- Giles, M.R. (1987). *Marine and Petroleum Geology*, 4, 188-204.
- El Shazly, (1977). En Nairn, Kanes y Stehli (eds): *The Ocean Basins and Margins*, v. 4a: New York, Plenum Pub. Corp., p. 379-444.
- May, P.R. (1991). *AAPG Bull.*, 75, 1215-1232.
- McBride (1989). *Earth-Science Reviews*, 26, p. 69-112.
- Rose, P.R. (1987). *AAPG Bull.*, 71, 1-16.
- Schmidt, V. y McDonald, D.A. (1979). *AAPG Education Course Note Series*, 12, 125p.
- Surdam, R.C., Crossey, L.J., Hagen, E.S. y Haesler, H.P. (1989). *AAPG Bull.*, 73, 1-23.
- Van Houten, F.B. (1980). *AAPG Bull.* 64, 857-867.