

Evaluación petrofísica de areniscas fluviales. El ejemplo del Triásico en el sector de Alcaraz (Albacete)

Petrophysical evaluation of fluvial sandstones. The Triassic example of the Alcaraz area (Albacete)

Saturnina Henares¹, César Viseras¹ y Giuseppe Cultrone²

¹ Departamento de Estratigrafía y Paleontología, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, Av/ Fuentenueva s/n 18071 Granada, España. shenares@ugr.es, viseras@ugr.es, jferdez@ugr.es

² Departamento de Mineralogía y Petrología, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, Av/ Fuentenueva s/n 18071 Granada, España. cultrone@ugr.es

ABSTRACT

The Triassic Red Beds of the Tabular Cover of the Iberian Meseta represent an outcropping analogue of fluvial hydrocarbon reservoirs such as the algerian TAGI (Trias Argilo-Greséux Inferieur). The example of Alcaraz (Albacete) is constituted by sandstone bodies embedded in fines, as consequence of the deposit in different sedimentary environments and subenvironments. An evaluation of the petrophysical properties of the sandy bodies of the sequence II and part of the IV has revealed the heterogeneities between the different architectural elements, as well as within the same body. Thereby, different values of open porosity, permeability and anisotropy coefficient were obtained, as function of the sequence and the environment of deposit. In addition, hydric tests have shown the relation between some petrophysical parameters values and the properties of viscosity and density of the fluid that interact with the rock.

Key-words: Petrophysics, sandstones, red beds, Triassic, Tabular Cover.

RESUMEN

El conjunto de capas rojas triásicas de la Cobertera Tabular de la Meseta Ibérica constituye un análogo aflorante de reservorios de hidrocarburos de origen fluvial, como el TAGI argelino (Trias Argilo-Greséux Inferieur). El ejemplo de Alcaraz (Albacete) está constituido por cuerpos de arenisca embebidos en sedimentos finos que son el resultado del depósito en diferentes ambientes y subambientes sedimentarios. Una primera evaluación de las propiedades petrofísicas de los cuerpos areniscos de la denominada secuencia II y parte de la IV, ha puesto de manifiesto las heterogeneidades existentes entre los diferentes elementos arquitectónicos, así como dentro de los propios cuerpos. Así, se han obtenido diferentes valores de porosidad abierta, permeabilidad y coeficiente de anisotropía en función de la secuencia y del ambiente depósito. Además, ensayos hidricos han mostrado la dependencia del valor de ciertos parámetros petrofísicos de las propiedades de viscosidad y densidad del fluido con el que interacciona la roca.

Palabras clave: Petrofísica, areniscas, capas rojas, Triásico, Cobertera Tabular.

Geogaceta, 52 (2012), 89-92.
ISSN 2173-6545

Fecha de recepción: 12 de febrero de 2012
Fecha de revisión: 26 de abril de 2012
Fecha de aceptación: 25 de mayo de 2012

Introducción

La modelización de almacenes de hidrocarburos correspondientes a conjuntos de origen aluvial resulta, a menudo, compleja. Esto se debe tanto al diferente grado de conectividad entre los elementos arquitectónicos arenosos presentes, como a la frecuente heterogeneidad que éstos presentan en sus características petrofísicas, a consecuencia de las diferentes condiciones de depósito entre los distintos subambientes sedimentarios. Así pues, tras el conocimiento a macro- y mesoescala de las características deposicionales de estos cuerpos, se hace necesario su estudio a microescala, para determinar los patrones de variación

(y sus factores de control) de propiedades como la porosidad y la permeabilidad de los materiales.

El conjunto triásico de origen fluvial que forma parte de la Cobertera Tabular de la Meseta Ibérica (Fig. 1), TIBEM (*Triassic of the Iberian Meseta*; Viseras *et al.*, 2011; Henares *et al.*, 2011) ha despertado el interés como posible análogo de superficie de algunos almacenes en explotación como el denominado TAGI, ubicado en la cuenca de Berkine (Argelia) (Rossi *et al.*, 2002; Viseras y Fernández, 2010a). Se trata de una formación constituida por un conjunto de facies Buntsandstein y Keuper, de edad Anisiense-Noriense (López Garrido, 1971), Carniense Inferior-Medio (Arche *et al.*, 2002),

el cual, por correlación estratigráfica con facies marino someras coetáneas, ha sido subdividido, clásicamente, en 4 secuencias (I-IV) en las que se relaciona la arquitectura aluvial con la situación del nivel de base (Gil *et al.*, 1987; Fernández y Gil, 1989). No obstante, en otros trabajos dicha subdivisión responde a 3 unidades principales, de acuerdo a ciclos menores de regresión-transgresión, con estructuras sedimentarias predominantemente diferentes (Arche *et al.*, 2002).

El objetivo de este trabajo es llevar a cabo una primera evaluación de las propiedades petrofísicas de los cuerpos areniscos embebidos en sedimentos finos (limos y arcillas de las facies Buntsandstein y Keu-

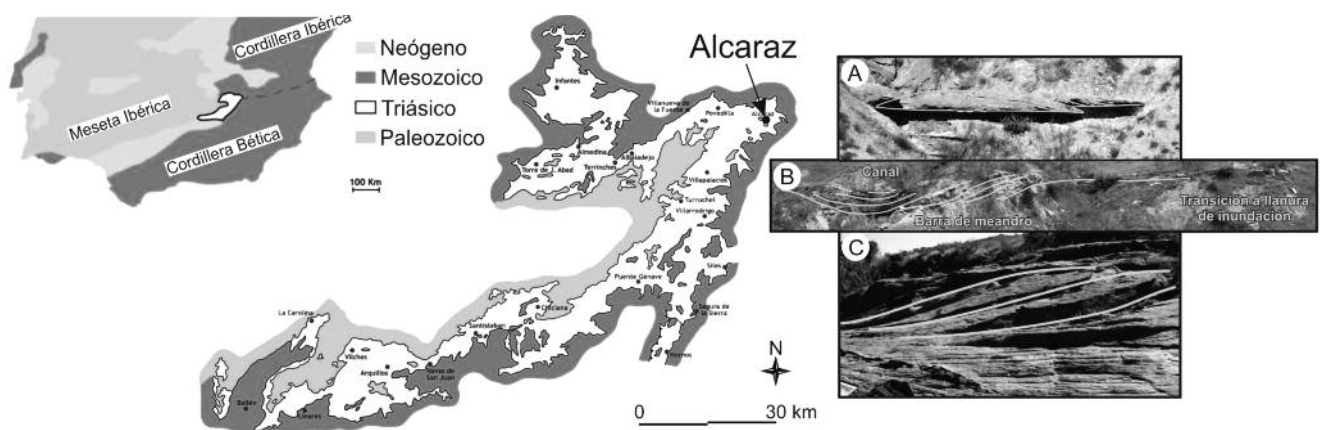


Fig. 1.- Mapa de localización de la Cobertera Tabular y, dentro de ella, del área de estudio (Alcaraz), junto con fotointerpretaciones de algunos de los cuerpos de arenisca muestreados. A) Lóbulo de derrame de la secuencia II. B) Canal meandriforme de la secuencia II. C) Sand flat tail de la secuencia IV.
 Fig. 1.-Location map of the Tabular Cover and the study area (Alcaraz), with photointerpretations of some of the sampled sandstone bodies. A) Crevasse splay lobe of the sequence II. B) Meandering channel of the sequence II. C) Sand flat tail of the sequence IV.

per) de esta formación, los cuales son el resultado del depósito en diferentes ambientes y subambientes, lo que les convierte en potenciales rocas almacén de fluidos. Para ello se ha realizado un muestreo en la sucesión triásica de Alcaraz (Albacete), de unos 160 m de espesor, la cual corresponde a la zona más distal de todo el conjunto aflorante y en donde están especialmente bien representadas las secuencias II y IV (Fig. 1) (Henares *et al.*, 2012).

Metodología

Para la caracterización petrofísica de los distintos ambientes sedimentarios, se han muestreado los cuerpos de arenisca más representativos de las secuencias II y IV, correspondientes a depósitos de desbordamiento (lóbulo de derrame y *sheet flood*) (Fig. 1A) y ambientes canalizados (canales meandriforme y rectilíneo) (Fig. 1B), y a la llanura trenzada (subambiente de canal, de llanura arenosa y de *sand flat tail* o de transición entre ambos) (Fig. 1C), respectivamente.

Posteriormente, las muestras de arenisca han sido analizadas mediante diferentes técnicas analíticas. Los ultrasonidos han permitido determinar el coeficiente de anisotropía (ΔM) de las mismas, valor obtenido a partir de las medidas efectuadas sobre 3 probetas por tipo de facies. Mediante porosimetría de inyección de mercurio (PIM) se han obtenido los valores de porosidad abierta y de distribución de tamaño de los poros. Se han llevado a cabo 2 medidas por cada muestra. Además, se han realizado ensayos de permeabilidad al vapor de agua sobre 3 probetas por facies para

calcular el coeficiente de permeabilidad K_v (temperatura del agua de 20°C y humedad relativa del 3%). Finalmente, los ensayos hídricos de absorción y desorción han ayudado a entender el comportamiento de los fluidos (su circulación) en el interior del sistema poroso de los materiales. Para ello se han utilizado tres tipos de fluidos, de diferente viscosidad y densidad, el agua y dos tipos de crudo (Roncador y Sahara Blend) (temperatura de los líquidos entre 20-25°C y 3 medidas por facies).

Resultados

Los ultrasonidos han puesto de manifiesto la existencia de dos tipos de muestras con un coeficiente de anisotropía más elevado. Por un lado se sitúan aquellas con una estructura sedimentaria muy marcada, la cual da lugar a la existencia de anisotropía deposicional, que influye fuertemente en la orientación de los granos [muestra de un delta *foreset* en el *sand flat tail* de la secuencia IV (anisotropía total, $\Delta M=40\%$) y muestra del lóbulo de derrame de la secuencia II ($\Delta M=31\%$)]. Por otro lado, se encuentran aquellas muestras que presentan heterogeneidades postsedimentarias correspondientes a fracturas cementadas, las cuales son superficies diferencialmente más compactas que el material adyacente [muestra de una fractura en el *sand flat tail* de la secuencia IV ($\Delta M=35\%$)].

En base a los datos de PIM, en la secuencia II, los depósitos de desbordamiento muestran una distribución de tamaños de poro bimodal, con picos en torno a 0,1 y 1 μm (Fig. 2A), y una porosidad abierta menor del 16% en todos los casos. En los depósi-

tos canalizados, sin embargo, la distribución es, mayoritariamente, unimodal con un pico en torno a 10-20 μm (Fig. 2B), y los valores de porosidad varían, de manera considerable, entre el 16 y el 31%. Por último, en la llanura trenzada de la secuencia IV se ha observado como la distribución es claramente unimodal, con un pico próximo a 50 μm (Fig. 2C), y los valores de porosidad son más altos, comprendidos entre el 18 y el 32%. Cabe destacar que, en este grupo, las excepciones las constituyen aquellas muestras cementadas por carbonatos, en las que la porosidad desciende hasta el 3-5%, como son las muestras de fracturas cementadas. Esto las convierte en potenciales barreras para la migración lateral de fluidos, que pueden compartimentar el cuerpo afectando así a su calidad como almacén.

Mediante los ensayos de permeabilidad, no se ha establecido una diferencia clara, en base al valor del coeficiente de K_v entre los distintos ambientes. Así, en la secuencia II, en los depósitos canalizados los valores de K_v se encuentran comprendidos entre 1,227 y 2,800 $g/m^2 \cdot 24h$, mientras que en los depósitos de la secuencia IV, se sitúan entre 1,133 y 4,864 $g/m^2 \cdot 24h$. En todos los casos, este coeficiente presenta valores mínimos cuando las muestras se encuentran cementadas ya sea por carbonato o por yeso (0,684-0,723 $g/m^2 \cdot 24h$). De hecho, en el caso de los depósitos de desbordamiento de la secuencia II, la presencia de yeso ha imposibilitado determinar el valor de K_v debido a su hidratación, sufrida al comienzo del ensayo.

Los resultados obtenidos en los ensayos hídricos ponen de manifiesto que tanto el coeficiente de saturación (S) como el grado

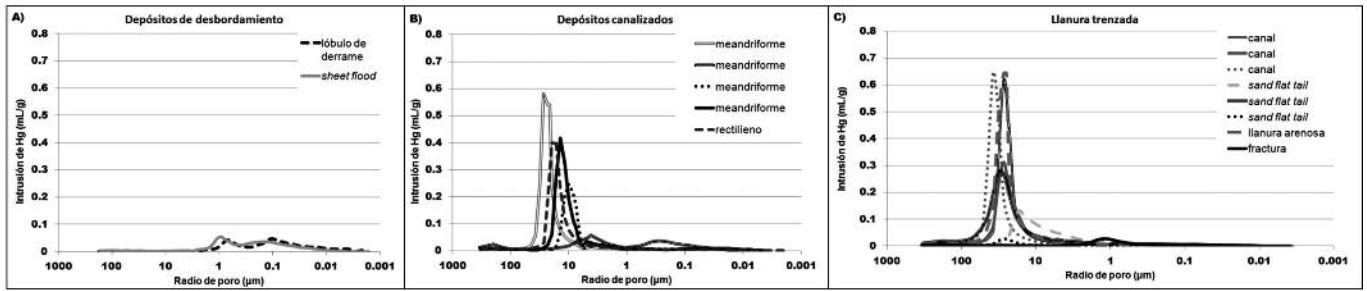


Fig. 2.- Curvas porométricas de: A) depósitos de desbordamiento (secuencia II), B) depósitos canalizados (secuencia II) y C) depósitos de llanura trezada (secuencia IV).

Fig. 2.- Pore-metric curves of: A) overbank deposits (sequence II), B) channelized deposits (sequence II) and C) braidplain deposits (sequence IV).

de interconexión entre los poros (A_x) son parámetros que varían principalmente en función de la densidad del fluido (Tabla I). Así pues, se ha observado como S disminuye conforme aumenta la densidad del líquido, y la interconexión A_x empeora en el mismo sentido, lo cual se traduce en un aumento de su valor. Sólo una muestra correspondiente a una fractura cementada por carbonato de la secuencia IV presenta un comportamiento anómalo, ya que muestra el mejor grado de interconexión para el crudo Roncador, que posee una densidad

intermedia pero la mayor viscosidad. Por su parte, el índice de desorción (D_i) de la mayor parte de las muestras seleccionadas tanto de la secuencia II como de la IV, también se ve afectado, principalmente, por la densidad del fluido (Tabla I), ya que éstas presentan mayor capacidad de evacuación, es decir, valor más bajo de D_i con el agua, que es el fluido de mayor densidad pero también el menos viscoso.

Por otra parte, la viscosidad influye, principalmente, en el coeficiente de absorción (C_a , Tabla I). Se observa como a mayor

viscosidad, menor C_a presentan las muestras. Las únicas excepciones son dos muestras del canal meandriforme de la secuencia II, las cuales presentan menor valor de C_a con Sahara Blend, que es el líquido de viscosidad intermedia y, sin embargo, el menos denso. Por su parte, el D_i de dos muestras, pertenecientes a ambas secuencias, también se ve afectado por la viscosidad (Tabla I). En este caso, cuanto mayor es la viscosidad del fluido, peor es la capacidad de evacuación del mismo por parte de los materiales.

Ensayo hídrico				
Muestra	C_a	S (%)	A_x (%)	D_i
Sec. II: canal meandriforme	0,13	72,26	8,89	0,91
	0,11	75,38	9,10	0,89
	0,11	74,47	11,76	0,91
Sec. IV: canal	0,09	70,20	15,94	0,92
	0,08	64,44	13,12	0,92
Sec. IV: fractura cementada	0,02	74,65	13,26	0,95
Ensayo con Roncador				
Muestra	C_a	S (%)	A_x (%)	D_i
Sec. II: canal meandriforme	0,09	82,58	4,07	0,95
	0,03	82,58	5,47	0,95
	0,10	84,74	3,54	0,95
Sec. IV: canal	0,04	71,3	12,08	0,96
	0,03	82,51	5,97	0,95
Sec. IV: fractura cementada	0,01	87,31	5,96	0,96
Ensayo con Sahara Blend				
Muestra	C_a	S (%)	A_x (%)	D_i
Sec. II: canal meandriforme	0,08	89,50	3,00	0,96
	0,08	91,57	2,17	0,96
	0,07	92,10	1,62	0,94
Sec. IV: canal	0,05	86,69	4,29	0,96
	0,06	89,89	1,18	0,94
Sec. IV: fractura cementada	0,02	88,98	9,69	0,97

Tabla I.- Datos obtenidos a partir de los ensayos de absorción y desorción realizados con agua, crudo Roncador y crudo Sahara Blend sobre algunas muestras seleccionadas. C_a : coeficiente de absorción; S : coeficiente de saturación; A_x : grado de interconexión entre los poros; D_i : índice de desorción.

Table I.- Data obtained from the absorption and drying tests using water, Roncador and Sahara Blend crudes from some selected samples. C_a : absorption coefficient; S : saturation coefficient; A_x : interconnection degree among pores; D_i : drying index.

Discusión y Conclusiones

En base a los resultados obtenidos, hemos comprobado que existe una correlación directa entre la porosidad y la permeabilidad de estos materiales, de modo que los factores que incrementan el valor de una, tienen el mismo efecto sobre la otra.

De esta manera, en la secuencia II, en los depósitos de desbordamiento, la pérdida de porosidad se debe, en primer lugar, a la compactación, visible por la existencia de contactos cóncavo-convexos, puntos triples, suturas y deformación de granos dúctiles, mecanismo que, según Lundegard (1992) y Milliken (2001), se ve favorecido por un mayor contenido en fragmentos de roca. En segundo lugar, la extensa presencia de cemento de yeso en estos depósitos (Henares *et al.*, 2012) disminuye considerablemente el volumen intergranular. Asimismo, la menor madurez textural que presentan, puesta de manifiesto por una peor grano-selección y un mayor contenido en matriz así como un menor tamaño de grano, favorece un empaquetamiento más efectivo de los mismos (Henares *et al.*, 2012). Esto es consistente con los procesos que dan lugar a estos cuerpos, en los que la corriente transporta una elevada cantidad de carga

en suspensión, la cual se decanta rápidamente al disminuir la velocidad del flujo por pérdida de confinamiento (Viseras y Fernández, 2010b).

Los depósitos canalizados de esta misma secuencia presentan características texturales y composicionales intermedias entre los anteriores y la llanura trezada. Así, también muestran evidencias de compactación pero en menor grado, aunque el contenido en fragmentos de roca es similar; no suelen contener ningún tipo de cemento, a excepción de cemento carbonático en el margen del canal meandriforme; presentan un tamaño de grano ligeramente superior a los depósitos de desbordamiento, pero inferior a los de la secuencia IV; y, texturalmente, contienen también abundante matriz, con lo que el volumen intergranular es bastante escaso (Henares *et al.*, 2012). Debe tenerse en cuenta que, en las zonas muestreadas de los depósitos, predominan mecanismos de acreción vertical (sobre todo en la llanura de inundación) y/o de transporte de carga tractiva (sobre todo en la base de los canales) (Viseras y Fernández, 2010b). Esto puede dar lugar a una disminución del contenido en componente intersticial así como del desarrollo de una fábrica sedimentaria bien definida.

Por último, los depósitos de la llanura trezada son los que muestran menor compactación mecánica. Esto es coherente con un mayor contenido en cuarzo (Beard y Weyl, 1973; Mitra y Bear, 1980; Lundegard, 1992), y un mejor desarrollo de recrecimientos. Si bien en este ambiente la cementación carbonática es más importante, ésta suele estar ligada a fracturas postsedimentarias. Además, su mayor madurez textural y tamaño de grano favorecen un empaquetamiento menos denso. Estas características pueden deberse a que estos de-

pósitos se forman por cursos fluviales con una elevada tasa de divagación, por lo que, durante el proceso de migración, la corriente puede eliminar la fracción más fina de la llanura de inundación (Viseras y Fernández, 1994).

Además, hemos comprobado que las propiedades físicas del fluido con el que interacciona la roca, como la viscosidad y la densidad, son muy importantes a la hora de evaluar la calidad de ésta como potencial almacén ya sea de petróleo, agua o, incluso, gas. Así, la mayor parte de las relaciones propiedad-parámetro presentan un ajuste de tipo lineal (positivo o negativo), indicando una dependencia directa entre ambas variables. No obstante, también existen relaciones cuyo ajuste es de tipo más parabólico, lo cual se traduce en la dependencia de estos parámetros de otra/s variable/s, como pueden ser el tamaño de grano, la composición modal, el tipo y extensión de la cementación, el tamaño de poro, etc.

Este estudio pone de manifiesto el elevado grado de heterogeneidad petrofísica tanto entre los elementos arquitectónicos de los diferentes ambientes aluviales, como dentro de cada uno de los cuerpos areniscos. Así pues, el conocimiento en detalle de la distribución de dichas heterogeneidades y anisotropías es crucial a la hora de abordar labores como la recuperación de petróleo mejorada (*Enhanced Oil Recovery*, EOR) en almacenes fluviales.

Agradecimientos

Este estudio ha sido posible gracias a la financiación del proyecto BTE/CGL2009-07830 (MICINN-FEDER) y del grupo de investigación RNM369 (Junta de Andalucía), así como gracias a la cesión por parte de la empresa petrolera CEPSA de diferentes tipos de crudo con los que

realizar los ensayos. Agradecer también al revisor, J. Elorza, sus comentarios los cuales han ayudado a mejorar el presente manuscrito.

Referencias

- Arche, A., López-Gómez, J. y García-Hidalgo, J.F. (2002). *Journal of Iberian Geology*, 28, 13-30.
- Beard, D.C. y Weyl, P.K. (1973). *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 57, 349-369.
- Fernández, J. y Gil, A. (1989). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 2, 114-124.
- Gil, A., Fernández, J. y López-Garrido, A.C. (1987). *Cuadernos de Geología Ibérica*, 11, 403-420.
- Henares, S., Viseras, C., Fernández, J., Cultrone, G. y Caracciolo, L. (2012). *Geogaceta*, 52, 61-64.
- Henares, S., Viseras, C., Fernández, J., Pla-Pueyo y Cultrone, G. (2011). En: AAPG International Conference and Exhibition. Search and Discovery Article, #50541.
- López Garrido, A.C. (1971). *Geología de la Zona Prebética al NE de la Provincia de Jaén*. Tesis Doctoral, Univ. de Granada, 371 p.
- Lundegard, P.D. (1992). *Journal of Sedimentary Petrology*, 62, 250-260.
- Milliken, K.L. (2001). *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 85, 795-815.
- Mitra, S., y Bear, W.C., (1980). *Journal of Sedimentary Petrology*, 50, 1347-1360.
- Rossi, C., Kálin, O., Arribas, J. y Tortosa, A. (2002). *Marine and Petroleum Geology*, 19, 117-142.
- Viseras, C. y Fernández, J. (1994). *Sedimentary Geology*, 88, 201-217.
- Viseras, C. y Fernández, J. (2010a). En: 18th International Sedimentological Congress. Abstracts Volumen, 908.
- Viseras, C. y Fernández, J. (2010b). En: *Sedimentología: del proceso físico a la cuenca sedimentaria* (A. Arche, Ed.). Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 261-299.
- Viseras, C., Fernández, J., Henares, S. y Pla-Pueyo, S. (2011). En: 28th IAS Meeting of Sedimentology. Abstract Volume, 107.