

Influencia de la anisotropía en las propiedades hídras de rocas. Estudio de rocas dolomíticas brechoides de la Cordillera Bética (España)

Influence of anisotropy on rock hydrical properties. Analysis of brecciated dolostones from Betic Cordillera (Spain)

N. Cueto ^(1,2), D. Benavente ^(1,2) y M.A. García del Cura ^(1,3)

⁽¹⁾ Departamento de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente. Universidad de Alicante. Ap. 99. 03080 Alicante. nora.cueto@ua.es, david.benavente@ua.es

⁽²⁾ Laboratorio de Petrología Aplicada. Unidad Asociada CSIC-UA. Universidad de Alicante.

⁽³⁾ Instituto de Geología Económica. CSIC- UCM. Facultad de Ciencias Geológicas. Ciudad Universitaria. 28040 Madrid. angegcura@ua.es

ABSTRACT

The purpose of this study is to determine the influence of anisotropy on hydrical properties of brecciated dolostones (BD). The present investigation involving BD has revealed, on the one hand, at meso-scale, four types of fractures. On the other hand, mercury intrusion porosimetry (MIP) has delimited two main porous families: pores of rock matrix and micro-fracture systems. Capillary transport and permeability tests were performed on four types of BD in order to establish the correlation between these parameters and the porous-fracture systems. The results show strong anisotropy in capillary absorption measured on prismatic samples in their three orthogonal directions. At the same time, our study has demonstrated that permeability correlates with both capillary absorption, as well as fracture density. Finally, the porous system of BD can be described in two ways: as a tri-continuum medium that consists of pores belonging to the pore matrix, fractures and cavities or as a dual-porosity model embedding fractures and vein intercrystalline porosities.

Key words: permeability, capillarity, rock fabric, brecciated dolostone, multiporosity.

*Geogaceta, 40 (2006), 315-318
ISSN: 0213683X*

Introducción

La complejidad de las rocas dolomíticas brechoides, debido a la orientación y distribución espacial de sus clastos y de los sistemas porosos y de fracturas, influye en el comportamiento de sus propiedades petrofísicas. La presencia de diferentes tipos de familias de poros y la interacción entre ellas en una misma muestra, hacen muy difícil controlar dichas propiedades.

Dürrast y Siegesmund (1999) encontraron que la permeabilidad y la conductividad eléctrica están relacionadas con el tipo de poros de la roca. Cuando existen al menos dos tipos de poros diferentes, aumentan las dificultades para establecer las correlaciones con las propiedades físicas. Liu *et al.* (2003) consideraron a las rocas naturalmente fracturadas como medios multiporosos, en los cuales las fracturas y los poros constituyen el sistema de flujo. Para ello desarrollaron un modelo matemático en el que se consideran las rocas fracturadas como un medio tri-continuo, conformado por fracturas, huecos (*cavities*) y los poros de la matriz. También hicieron consideraciones especiales sobre medios bi-continuos (*dual-porosity model*), conjugando dos de los tipos de poros citados.

A partir de este estudio determinaron el comportamiento de la producción en reservorios carbonáticos y del transporte del agua y contaminantes en los mismos.

Las propiedades hídras de medios anisotrópicos han sido ampliamente estudiadas por el campo del petróleo y por el área de la ciencia de los materiales (V. gr. Dürrast y Siegesmund, 1999; Tsvilis *et al.*, 2003). Pocos estudios previos han abordado las propiedades petrofísicas de las rocas ornamentales heterogéneas para definir su calidad como material de construcción (V. gr. Sousa *et al.*, 2005), así como también son pocas las publicaciones que enfocan el tema del movimiento de fluidos en dichos materiales (V. gr. Mosquera *et al.*, 2000; Taylor *et al.*, 2000). El propósito del presente estudio es analizar las propiedades hídras en rocas brechoides dolomíticas, manufacturadas como mármoles comerciales y establecer una aproximación de su relación con los sistemas porosos y de fracturas que las caracterizan.

El conocimiento del comportamiento hídrico de las rocas en cada una de las tres direcciones puede constituir una gran ayuda al momento de establecer los procesos de manufactura, permitiendo seleccionar

aquellas direcciones de corte más favorables para la explotación y manufactura de las rocas tanto respecto de las propiedades físicas como de la durabilidad de los productos obtenidos.

Materiales

Las variedades de rocas dolomíticas brechoides estudiadas son distribuidas como mármoles comerciales (rocas que admiten pulido sin adiciones químicas) con las denominaciones de: Beige Serpiente, Marrón Emperador y Amarillo Triana.

Beige Serpiente (BS)

Es una brecha constituida por clastos angulosos de dolomías (en general finamente cristalinas inequigranulares con mosaicos hipidiotópicos) de tamaños muy variados (tamaño promedio mínimo: 1 mm - tamaño promedio máximo: 5 mm), embebidos en una matriz de color rosa. Dicha matriz está compuesta por calcita y cristales de dolomita (de 0.04 a 0.08 mm). A microescala es posible observar la variación de la porosidad en los diferentes clastos y la alta porosidad de la matriz que les rodea. La presencia de fracturas es baja

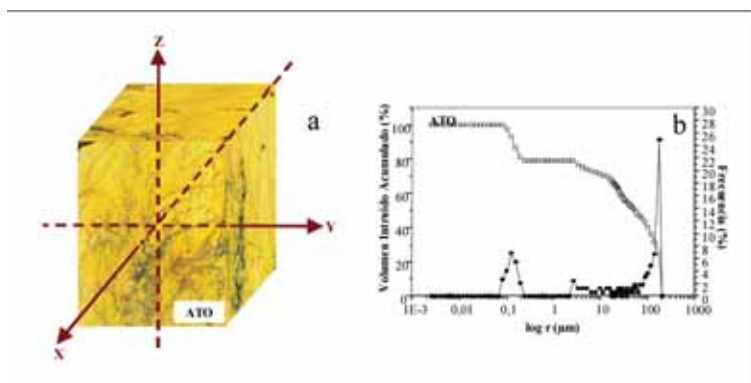


Fig. 1.- a) Ejes relativos definidos para la determinación de las propiedades petrofísicas: X (C1-C3); Y (C2-C4) y Z (C5-C6). b) Curva de distribución de tamaños de poros obtenida por MIP mostrando dos familias de poros: matriz y/o cemento (0.01 -1 µm) y fracturas (1-180 µm).

Fig. 1.- a) X (C1-C3); Y (C2-C4) and Z (C5-C6) axis established for petrophysical measurements. b) Pore radius distribution curves provided by MIP showing two main porous families: rock matrix (0.01 -1 µm) and micro-fracture systems (1-180 µm).

y son mayoritariamente intra-clastos, aunque ocasionalmente se aprecian fracturas inter-clastos. En general, se encuentran parcialmente cementadas por calcita-dolomita, siendo la proporción de calcita mucho mayor que la de cristales de dolomita.

Marrón Emperador (ME)

Al igual que la variedad BS, este material brechoide está formado por clastos de dolomías (en general dolomicrocristicas) de tamaños muy variados pudiendo llegar a alcanzar varios centímetros. No obstante, a diferencia de BS, el ME presenta alta densidad de fracturas, que dependiendo de la muestra estudiada, tienen diferente tipología, variando el predominio de los tres tipos observados: inter-clastos, trans-clastos e intra-clastos. Las fracturas no poseen orientación preferencial definida, están afectadas por fuertes procesos de disolución y se encuentran predominantemente rellenas de calcita con clastos dispersos de dolomía y cristales de dolomita, mostrando algunas fracturas parcialmente abiertas con aperturas (0.1 a 1.2 mm, intervalo de tam. predominante) que pueden llegar a alcanzar los 2 mm. La dolomita que constituye los clastos es micro y mesocristalina (García del Cura *et al.*, 1997).

Amarillo Triana (AT)

De ésta variedad se reconocen dos tipos de rocas diferentes, una de color amarillo intenso con mayor índice de densidad de fracturas (ATO) y una de color amarillo más claro (ATC) con menor índice de densidad de fracturas. Lo que diferencia a éstas muestras no es solamente su índice de fracturas y su color, sino también la disposición espacial de sus sistemas de fracturas. En el ATO no se aprecian orientaciones preferenciales de las mismas, mientras que en el

ATC al menos dos familias de fracturas pueden ser reconocidas a mesoescala. Otro rasgo que les diferencia es la relación de los óxidos que se encuentran en los bordes de las fracturas, ya que en el ATO es más abundante el óxido de manganeso asociado a bario, mientras que en el ATC abunda la presencia de óxidos de hierro. El ATO estudiado es una dolomía brechificada mesocristalina inequigranular fundamentalmente xenotópica encontrándose en algunas zonas texturas hipidiotópicas, la brechificación aparece definida por vénulas de calcita meso y macrocristalina, en los puntos de confluencia de vénulas las masas calcíticas alcanzan dimensiones relativas considerables. El ATC muestra rasgos me-

tamórficos con texturas granoblásticas, ocasionalmente porfidoblásticas mesocristalinas y orientación de algunos cristales de dolomita y de silicatos (feldespatos y moscovitas) neoformados.

Metodología

El ensayo de capilaridad se realizó sobre dos prismas de 7x7x10 cm (BS y ME), y dos prismas de 7x10x10 cm (AT y CT) de cada una de las variedades mediante diferentes tipos de determinaciones petrofísicas. Sus caras C fueron numeradas sistemáticamente definiéndose tres ejes relativos: X (C1-C3); Y (C2-C4) y Z (C5-C6) (Fig. 1a). Una vez realizado el ensayo de capilaridad a las probetas, se procedió a extraer de cada una de ellas, dos testigos paralelos entre sí de 6 cm de longitud y 3 cm de diámetro. En cada testigo se determinó la densidad de fractura y posteriormente se realizaron ensayos de capilaridad, permeabilidad y porosidad total.

Caracterización de la fábrica

Sistemas de Fracturas: Densidad de fractura.

La densidad de fractura (D_F) es una medida de la superficie total del área (mm^2) de las fracturas por unidad de volumen (mm^3) de roca y refleja su deterioro *in situ* (Nicholson, 2001). Este parámetro es determinado a partir de la siguiente ecuación: $D_F = 2P_L$, donde P_L es el número de puntos de intersecciones de las fracturas por unidad de longitud de una cuadrícula (Underwood, 1970). En este estudio se utilizó la metodología propuesta por Nicholson (2001).

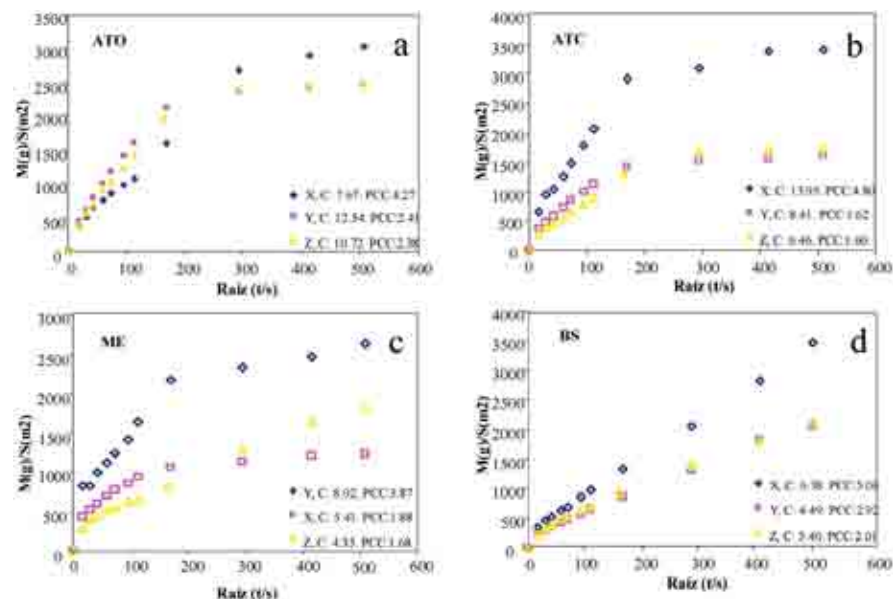


Fig. 2.- Absorción capilar como función de la raíz cuadrada del tiempo medida en las tres direcciones perpendiculares (X, Y y Z) en las rocas dolomíticas estudiadas.

Fig. 2.- Capillary absorption as a function depending on the square root of the time, considering three orthogonal directions (X, Y and Z) for each brecciated dolostone.

Sistema Poroso:

La caracterización del sistema poroso tanto de la roca en general, como de los clastos y el cemento que une los mismos, se ha realizado utilizando la técnica de la porosimetría de mercurio (MIP). El equipo empleado ha sido el Autopore IV 9500. A partir de este análisis se obtiene el radio medio (r), la densidad de conjunto (D_b) y la porosidad conectada ($PC(Hg)$).

La porosidad total (PT) ha sido calculada a partir de la siguiente ecuación: $PT = (1 - D_b/D_R) \cdot 100$, donde D_b es la densidad de conjunto, determinada como la relación entre la masa seca y el volumen de la probeta. D_R es la densidad real, obtenida a partir del ensayo de Picnometría de Helio.

Capilaridad

Este ensayo fue realizado siguiendo la Norma UNE-EN 1925. Los resultados se pueden expresar como la relación de la masa absorbida y el área de la base en contacto con el agua en función de la raíz cuadrada del tiempo. La representación gráfica consta de dos partes: la primera indica la absorción del agua, por tanto a partir de su pendiente se calcula el coeficiente de absorción por capilaridad (C) y la segunda señala la saturación. De este ensayo también se estima la porosidad capilar conectada (PCC) y se obtiene como la relación entre la masa saturada (M_s) y el volumen de la probeta (V) por la densidad del agua (D_a) en tanto por cien: $PCC = (M_s/V D_a) \cdot 100$. El ensayo fue realizado a los testigos, así como también a las probetas en sus tres direcciones perpendiculares definidas.

Permeabilidad

Las muestras se secaron a 70 °C de temperatura durante 48 horas. Luego se colocaron en una cámara de vacío a una presión de 20 ± 7 milibares, hasta completar tres ciclos de 24 horas cada uno. En el primero se elimina el aire contenido en el sistema de poros y de fracturas, en el segundo, se introduce lentamente agua desmineralizada hasta que los testigos estén cubiertos con una capa de ± 5 cm y en el último ciclo se reestablece la presión atmosférica.

Una célula triaxial ha sido utilizada para determinar la permeabilidad de las muestras. Para el caso del BS se utilizaron las siguientes presiones: confinamiento, 13 bares; interna, 7 y externa, 3 bar. El resto de las muestras fueron caracterizadas con rangos de presiones más bajos: presión de confinamiento de 5 y presiones externa e interna de 3 y 1 bar, respectivamente, con el propósito de evitar la compresión y cierre de las fracturas. El valor de la permeabilidad fue determinado cuando se alcanzó el estado estacionario, es decir, cuando la tasa de flujo de entrada era

igual a la tasa de flujo de salida. Actualmente no existe un método estandarizado para su medición, por lo que en el presente estudio se han establecido parámetros de presiones que permitan obtener el estado estacionario, sin modificar la estructura de los sistemas de poros y de fracturas y que al mismo tiempo pueda realizarse en un periodo de tiempo relativamente corto.

Resultados y discusión

En general, en los materiales estudiados, pueden describirse 4 tipos de fracturas muy bien diferenciadas con su correspondiente porosidad denominada porosidad de fractura según Choquette y Pray (1970). Estos tipos son: *fracturas que definen brechas* constituidas por clastos de dolomías embebidos en la calcita que le cementa. *Fracturas rellenas de opacos*; lineales, de apertura muy pequeña y sellada por óxidos de hierro y/u óxidos de manganeso. *Fracturas rellenas de cristales (vénulas)*; de apertura muy abierta y rellena de cristales de dolomita. Frecuentemente confluyen con otras fracturas de las mismas características y forman concentraciones o masas de material esparítico. *Fracturas con cristales en sus paredes*; generadas a partir de procesos de disolución de las fracturas descritas anteriormente. En general estas últimas fracturas poseen apertura variable, comenzando muy abiertas y posteriormente va disminuyendo su grosor hasta producirse su cierre. Los tres primeros tipos se pueden observar en los AT, mientras que el último es habitual encontrarlo en ME. En BS se distinguen los dos últimos tipos descritos.

Los resultados de la capilaridad medida en las tres direcciones perpendiculares de los prismas, revela la influencia de la anisotropía en esta propiedad. En la figura 2 pueden notarse fuertes contrastes tanto en los valores del coeficiente de absorción como en los de la porosidad. El grupo AT, tanto en su variedad clara como oscura, refleja los valores más altos de estos índices, seguido del ME, mientras que los más bajos se aprecian en el grupo de las muestras de BS. Es importante señalar que en este último grupo las rocas no alcanzaron el nivel de saturación, por tanto los datos de porosidad son parciales. En cuanto a la permeabilidad se refiere, éste parámetro se ha medido hasta el momento en un solo eje para cada probeta.

A partir de los datos obtenidos de MIP, en el presente estudio, se clasifican los poros menores de $1 \mu\text{m}$ como aquellos que representan al sistema poroso de la matriz y/o el cemento, mientras que los poros mayores de $1 \mu\text{m}$, incluyen a los sistemas de fracturas (Fig. 1b).

Según Winkler (1997) el mecanismo capilar se desarrolla en los poros de tamaño

0.1 a $1000 \mu\text{m}$. Los valores de absorción capilar más altos se aprecian en los grupos ATO y ATC, seguidos de BS y ME. Una buena relación se observa entre la porosidad capilar conectada y la porosidad total. El ME, ATO y BS en sus índices máximos reflejan que el 85.32%, 87.17% y 74% de sus espacios porosos, respectivamente, intervienen en el proceso capilar.

Sin embargo, atendiendo a la fuerte anisotropía que caracteriza a estos materiales, existen muestras dentro de la misma variedad petrológica, en las que el comportamiento de la capilaridad se manifiesta de manera diferente, por ello los valores mínimos indican que tan sólo el 15.75% y el 64.47% del espacio poroso de ME y ATO, respectivamente, interviene en dicho proceso, lo cual se debe a la presencia de fracturas en ME y de fracturas y cavidades generadas por los procesos de karstificación en ATO, de apertura $>1000 \mu\text{m}$.

Obviamente, el coeficiente de absorción capilar varía dependiendo del grado de interconexión entre sus poros, siendo mayor cuando el porcentaje de porosidad capilar conectada es mayor y viceversa (Tabla I). El ATC tiene un comportamiento más homogéneo entre sus propias muestras, oscilando entre 64 y 68% el total del espacio poroso que actúa en el movimiento del fluido por capilaridad.

En el proceso capilar de BS el movimiento del fluido se realiza a través de las fracturas y de la porosidad de los clastos y de la matriz, siendo más importante en ésta última, dado el bajo índice de densidad de fractura ($0.47 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$) de esta roca. En ATO el movimiento del fluido se efectúa a través de los sistemas de fracturas, la porosidad intercrystalina y los huecos. Generalmente suelen ser de mayor importancia los sistemas de fracturas, aunque dependiendo de la muestra analizada puede ocurrir que la porosidad intercrystalina desempeñe un papel principal como medio en el flujo del fluido. En el ME y ATC el movimiento se lleva a cabo principalmente en los sistemas de fracturas, ya que por su parte, en el ME la porosidad total de la pasta que une los clastos es tan baja (1.14%) que se puede despreciar y en ATC, la distribución de tamaño de poros en dos de sus muestras, no presenta poros inferiores a $1 \mu\text{m}$ (Tabla I).

Partiendo de la descripción del sistema poroso detallado anteriormente, BS y ATO deben ser considerados como medios multiporosos en los que el concepto de medio tri-continuo y bi-continuo debe aplicarse. ME y ATC, deben ser tratados como un medio mono-continuo en el que sólo interviene los sistemas de fracturas, aunque es importante señalar nuevamente, que por la anisotropía de las rocas

	ME	BS	ATO	ATC	
C ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-0.5}$) max.	4.5	4.04	15.32	10.22	
C ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-0.5}$) min.	1.81	—	6.06	2.44	
C ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-0.5}$) prom.	3.38	—	12.31	5.71	
Cemento	r (Hg) (μm)	104.94	14.37	26.36	80.39
	PT (Hg) (%)	1.14	8.45	3.61	6.21
	(0.01-1 μm)	20.43	56.76	42.68	*11.07
	(1-180 μm)	79.57	43.24	57.32	88.93
Clasto	r (Hg) (micra)	58.08	21.95	—	—
	PT (Hg) (%)	8.36	2.09	—	—
	(0.01-1 μm)	0	38.24	—	—
	(1-180 μm)	100	61.76	—	—
K (mD)	0.08	0.02	0.23	0.13	
DF (mm^2/mm^3)	2.29	0.47	2.1	1.61	

Tabla II.- Indicadores petrofísicos de los testigos por variedad petrológica. C, Coeficiente de absorción capilar; r, Radio Medio; PT, porosidad total; K, permeabilidad; DF, Densidad de Fractura; Hg, parámetros estimados a partir de porosimetría de mercurio. *Este valor promedio se corresponde únicamente con los resultados de dos testigos, ya que en los otros dos están ausentes los poros de este intervalo.

Table II.- Petrophysical parameters of different petrological cylindrical samples. C, water absorption coefficient; r, mean radius; PT, total porosity; K, permeability; DF, fracture density; Hg, parameters estimated by MIP. *This mean value is obtained on the basis of only two cylindrical samples, as the other two samples lacked porous within the specified range.

dolomíticas brechoides, en el caso de ATC dependiendo de la muestra examinada, encontraremos medios bi-continuos, constituidos además de las fracturas por la porosidad intercrystalina.

Por otro lado, la permeabilidad se encuentra por debajo de 1 mD en todas las variedades ensayadas. Otros estudios de rocas carbonáticas presentan resultados similares (V. gr. Dürrast y Siegesmund, 1999). Al igual que en la capilaridad de los testigos, los valores de permeabilidad más altos se aprecian en los grupos ATO y ATC, mientras que los más bajos en ME y BS. El ME pese a tener mayor apertura y alta densidad de fractura, además de estar afectadas por procesos de disolución, presenta baja permeabilidad debido a la cementación parcial de dichas fracturas, así como también a la baja interconexión del sistema poroso en general (Tabla I). Contrariamente, el grupo de los AT presenta mayor porosidad conectada y en consecuencia, mayor permeabilidad. Finalmente, la permeabilidad de BS es muy baja debido a su bajo radio medio, pese a la alta porosidad conectada que posee (Benavente et al., 2002). Comparando el tipo de porosidad, se demuestra que los sistemas de fracturas interconectados contribuyen en el incremento de la permeabilidad, aún más que la porosidad intercrystalina de la roca.

Es evidente la relación existente entre la capilaridad y la permeabilidad. Estas variables son directamente proporcionales. Los índices de la tabla I muestran que cuanto mayor sea la absorción capilar, mayor será la permeabilidad. Esta relación ha sido establecida con anterioridad por Zimmerman y Bodvarsson (1991) en medios porosos, quie-

nes señalan que la raíz cuadrada de la permeabilidad es proporcional a la absorción capilar. Para los grupos de muestras estudiados en este trabajo, la relación de estos parámetros también debe ir acompañada del concepto de multiporosidad.

Por otra parte, la densidad de fractura está directamente relacionada con la raíz cuadrada de la permeabilidad (coef. de correlación: 0.68).

Conclusiones

El comportamiento de las propiedades hídricas en rocas dolomíticas brechoides obedece a la heterogeneidad que las caracteriza. Los resultados del proceso capilar medidos en tres direcciones perpendiculares muestran diferentes valores de coeficiente de absorción para cada eje en una determinada probeta.

Las rocas estudiadas poseen fábricas diferentes, constituidas por medios multiporosos: tri-continuo en BS y ATO, bi-continuo en ATC y mono-continuo en ME y en algunos casos de ATC. La permeabilidad va a depender de la importancia relativa de los distintos sistemas porosos dentro de la roca, de las características de cada sistema y del grado de interconexión entre ellos. Así, cuando la fábrica está definida esencialmente por la matriz, como en BS, la permeabilidad es mucho más baja que cuando la fábrica está caracterizada fundamentalmente por los sistemas de fracturas, como en ME y ATC. Finalmente, hemos comprobado que la permeabilidad se relaciona directamente con la capilaridad y con la densidad de fractura. Esto permitirá en trabajos

futuros determinar la permeabilidad conociendo estos dos parámetros, así como ayudar a predecir la calidad/durabilidad de estos materiales como rocas ornamentales. No obstante, es necesario desarrollar más investigaciones en las que se incluya el concepto de multiporosidad, puesto que las correlaciones de las propiedades hídricas con medios multiporosos no son tan directas como en los medios homogéneos.

Agradecimientos

Este trabajo forma parte del Proyecto financiado por el MCYT: MAT 2003-01823. N. Cueto cuenta con una beca predoctoral del MEC, correspondiente a dicho Proyecto.

Referencias

- Benavente, D., Lock, P., García del Cura, M. A. y Ordóñez, S. (2002). *Transport in Porous Media*, 49, 59-76.
- Choquette, P. y Pray, L. (1970). *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 54, 2, 207-250.
- Dürrast, H. y Siegesmund, S. (1999). *International Journal of Earth Sciences*, 88, 392-408.
- García del Cura, M.A., Rodríguez, M.A., Pina, J.A., Cañaveras, J.C., Baltuille, J.M. y Ordóñez, S. (1997). *Boletín Geológico y Minero de España*, 110-1, 67-76.
- Liu, J., Bodvarsson, G. y Wu, Y. (2003). *Journal of Contaminant Hydrology*, 62-63, 189-211.
- Mosquera, M., Rivas, T., Prieto, B. y Silva, B. (2000). *Journal of Colloid and Interface Science*, 222, 41-45.
- Nicholson, D. (2001). *Earth Surface Processes and Landforms*, 26, 819-838.
- Sousa, L., Suárez del Río, L., Calleja, L., Ruiz de Argandoña, V. y Rodríguez, A. (2005). *Engineering Geology*, 77, 153-168.
- Taylor, S., Hall, C., Hoff, W. y Wilson, M. (2000). *Journal of Colloid and Interface Science*, 224, 351-357.
- Tsivilis, S., Tsantilas, J., Kakali, G., Chaniotakis, E. y Sakellariou, A. (2003). *Cement and Concrete Research*, 33, 1465-1471.
- Underwood, E. (1970). *Quantitative Stereology*, Addison-Wesley Publishing Co, Reading, Massachusetts, 274 p.
- UNE-EN 1925. (1999). *Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad*, Comité Europeo de Normalización, 13 p.
- Winkler, E. (1997). *Stone in Architecture: Properties, Durability*. Springer-Verlag, 309 p.
- Zimmerman, R. W. y Bodvarsson, G. (1991). *Transport in Porous Media*, 6, 195-205.