

Cuantificación de la porosidad en Areniscas mediante análisis digital de imágenes

Quantification of the porosity on sandstone using Digital Image Analysis

O. Buj y J. Gisbert

Facultad de ciencias de la Tierra, Departamento de Petrología y Geoquímica. C/ Pedro Cerbuna s/n C.P. 50.009 Zaragoza. oscarbuj@unizar.es; gisbert@unizar.es.

ABSTRACT

The aim of this research was the characterization of the porous system and pore size distribution by both polarisation optical microscopy and scanning electron microscopy using digital image processing. The three stones studies belong to the Miocene age and are found in the Ebro basin: Ayerbe, Uncastillo and Alcañiz sandstones. These sandstones have an historical importance in the architectural heritage of Aragon. The results obtained from digital image analysis have been crosschecked with the results obtain by hydric tests. The results have demonstrated that image analysis is an important and objective tool for textural studies of natural stone. In addition, pore spectra can be used to estimate physical parameters. Porosity governs strength physical-mechanical characteristics, chemical behaviour and hydraulic conductivity. Therefore, the study of both geometry and pore size distribution are indispensable for understanding the future behaviour of natural stone.

Key words: digital image analysis, sandstone, petrophysics, durability, petrography.

*Geogaceta, 41 (2007), 35-38
ISSN: 0213683X*

Introducción

La porosidad es un parámetro de gran importancia en la caracterización de materiales pétreos empleados como elementos de usos constructivos debido a que gobierna su dureza, deformabilidad, propiedades hídricas, conductividad hidráulica y durabilidad (Franklin y Dusseault, 1991), por lo que es necesario caracterizar el volumen, geometría y distribución de los poros presentes en el material.

La razón de realizar este estudio de tamaños de poro se deriva de las limitaciones que presenta el valor absoluto de porosidad total de una roca, si el objetivo es establecer el comportamiento hídrico dada la heterogeneidad de los materiales pétreos.

La ventaja de utilizar técnicas microscópicas, para el estudio del sistema poroso, es la obtención de datos objetivos tanto de tamaño como de geometría de los poros. Por el contrario, esta técnica cuenta con la desventaja del gran número de mediciones necesarias para tener datos representativos, así como la limitación en la resolución de la imagen de partida. Por ello, su combinación con la microscopía electrónica de barrido es útil para el estudio de materiales pétreos con una elevada microporosidad.

Las areniscas investigadas en este trabajo son de edad Miocena y se localizan en el borde exterior del sector central de la cuenca Terciaria del Ebro, donde las facies detríticas del Terciario medio-superior están interpretadas como sedimentos fluviales de sistemas aluviales con regímenes variados.

Las areniscas de Uncastillo y Ayerbe pertenecen a la Fm Uncastillo, de edad: Mioceno inferior (Aquitaniense – Burdigaliense) (Puigdefábregas, 1975), que se encuadra en el norte de la depresión del Ebro y en contacto con las sierras exteriores. La arenisca de Uncastillo se explota en la cantera Martínez mientras que la arenisca de Ayerbe se explota en la cantera San Julián. La arenisca de Alcañiz pertenece a la Fm Caspe (Edad Aquitaniense) y se explota en la cantera El Cielo.

El análisis digital de imagen (ADI) se puede definir como el procesado al que se somete una imagen para generar otra, que conserva ciertas características de la original (Davis, 1983). Esta técnica permite transformar la imagen de partida en una final, de la cual podemos extraer datos reales del objeto del estudio, en este caso porcentaje de porosidad, tamaño y geometría de los poros. El análisis digital de imágenes es una herramienta importante para caracterizar el comportamiento de

materiales cuando es necesaria información morfológica (Coster y Chermant 2001).

Metodología:

La caracterización de la porosidad de estos materiales se ha realizado mediante métodos hídricos y mediante análisis digital de imágenes.

A) Métodos hídricos

La porosidad se ha determinado según la norma UNE-EN 1936 (1999) Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total.

B) Análisis digital de imagen (ADI) aplicado tanto a Microscopía óptica de luz polarizada como a Microscopía electrónica de barrido.

La cuantificación de la porosidad se ha realizado sobre diferentes láminas delgadas y delgado pulidas elaboradas a partir de las probetas sobre las que previamente se había calculado la porosidad mediante métodos hídricos. Estas láminas fueron impregnadas al vacío con una resina fluorescente (resina Epoxy SP-115 y colorante Epodye) con un doble objetivo, conseguir un mayor contraste al microscopio entre las zonas porosas y las zonas

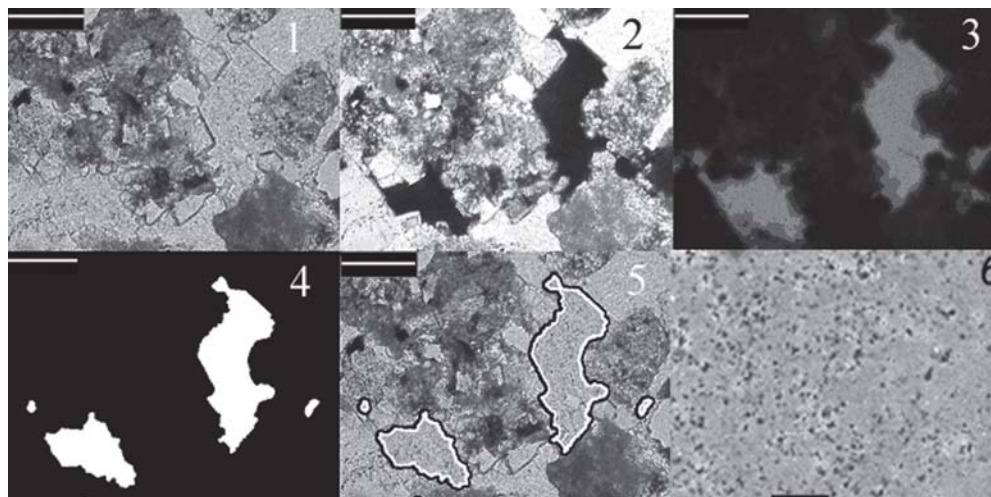


Fig. 1.- (1-5) Escala 100 mm x20, (6) escala 20 mm x1050. 1 Imagen Nícoles paralelos. 2 Imagen nícoles cruzados. 3 Imagen tomada con fluorescencia. 4 Imagen binarizada. 5 Imagen acoplada. 6 Imagen microscopio electrónico. Poros en negro

Fig. 1. - Scale 100 mm x20 (1-5). Scale 20 mm x 1050 (6). 1 parallel nicols. 2 Crossed nicols. 3 fluorescence image. 4. Binary image 5 combined image. 6 Electron microscopy image.

minerales y por otro lado para discriminar los poros reales de los generados durante la realización de las mismas.

Los equipos utilizados para la toma de imágenes fueron el microscopio petrográfico Leica modelo DMRX, equipado con un sistema automático de fotografía, equipo fluorescencia Ebq 100, cámara Sony modelo dxc-950p y el microscopio electrónico de barrido Zeiss, modelo DSM 942 equipado con un espectrómetro de dispersión de energía de rayos X Link, modelo Pentafet y un detector de electrones retrodispersados Oxford, modelo Tetra Link. El tratamiento digital de imagen se ha realizado mediante el programa informático Image pro plus versión 4.5 the proven solution.

Para cada sección la rutina de trabajo seguida consistió (Fig. 1):

1. Adquisición de la imagen mediante la cámara acoplada al microscopio bajo las condiciones de luz transmitida, con nícoles paralelos y cruzados (Fig. 1-fotos 1,2).
2. Adquisición de la imagen con nícoles paralelos, fluorescencia y luz reflejada (Fig. 1-foto 3).
3. Realce de la imagen y binarización de la misma (Fig. 1-foto 4).
4. Imagen acoplada (Fig. 1-foto 5).

El primer paso es la adquisición de imágenes que deben ser representativas

de la totalidad del material. Para ello, se realizaron tres láminas delgadas y delgado pulidas de cada arenisca, asumiendo las hipótesis de Delesse (1848) según las cuales se eliminan los posibles errores de corte en la elaboración de las láminas delgadas, y sobre cada una de ellas se estudiaron 20 secciones de 0,30 mm². Estas secciones se realizaron mediante una malla regular de 4X5. A partir de la imagen inicial y antes de la binarización de la misma, se realizaron una serie de realces visuales para conseguir un mejor contraste entre la zona porosa de color verde fluorescente debido a la fluoristerina y las zonas correspondientes a los minerales constituyentes de la roca. En este proceso, denominado segmentación (Prendes, 1992), se realiza la transformación de la imagen digital en una nueva imagen binaria mediante análisis multispectral RGB (Fig. 1-foto 4). Este proceso consiste en discriminar la fase a estudiar por procesos digitales, por el cual ciertos colores de una imagen pueden ser identificados visualmente y agrupados en clases. Sobre esta imagen binaria se aplican una serie de filtros consistentes en una serie de algoritmos para eliminar el ruido generado durante la segmentación y mejorar la calidad de la imagen.

Sobre esta imagen, y mediante los diferentes operadores del programa de

análisis se obtienen los parámetros objeto del estudio de los diferentes poros que son volcados directamente a hojas Excel. Con estos datos se han realizado histogramas de tamaño de poro y se ha calculado el índice de esfericidad de los mismos (medida de cuanto se aproxima la forma de un poro a una esfera) mediante la formula $I_e = d/D$ donde se relaciona el diámetro de una esfera de igual volumen que el poro (d) y el diámetro de la esfera mínima que circunscribe al poro (D) (Wadell 1932).

Una vez finalizado el tratamiento de la imagen mediante un operador del programa se han combinado imágenes individuales en una sola imagen compuesta, combinando la imagen original (foto 1) con la imagen binarizada (foto 4) obteniendo una imagen acoplada (Fig. 1-foto 5) con el objeto de comprobar gráficamente si realmente los elementos diferenciados por el tratamiento digital de imágenes como poros realmente lo son.

La principal limitación del tratamiento digital de imágenes es la resolución de la imagen de partida, por ello, esta técnica presenta problemas a la hora de caracterizar rocas con importante microporosidad o bien rocas como es el caso de estas areniscas y especialmente la de Alcañiz que presentan clastos carbonatados con un elevado índice de microporosidad (Fig. 1-foto 6). Para el estudio de estos clastos microporosos se trabajo con el MEB.

Resultados

Estas areniscas se clasifican según Pettijohn (1973) tabla I como litoarenitas de grano medio con textura granosostenida. El tamaño de grano, forma y selección son muy homogéneos, los clastos son subangulosos – subredondeados con tamaños medios de

	Uncastillo	Ayerbe	Alcañiz
Cemento calcáreo (%)	25,38	18,28	17,98
Líticos calcíticos (%)	33,89	19,75	31,5
Líticos dolomíticos (%)	0,82	1,70	10,05
Cuarzo (%)	13,70	30,59	31,18
Feldespato (%)	2,16	3,29	2,71
Micas (%)	0,95	0,54	0,30
Lit. no carbonatados (%)	21,59	22,20	2,06
Matriz y óxidos de hierro (%)	1,50	3,65	4,22
Relación carbonato/silicato	1,56	0,70	1,64
Relación calcita/cuarzo	4,33	1,24	1,60

Tabla I.- Composición mineralógica (%). Contaje de 500 puntos por lámina.

Table I.- Mineralogical composition (%). We have counted 500 points by thin section.

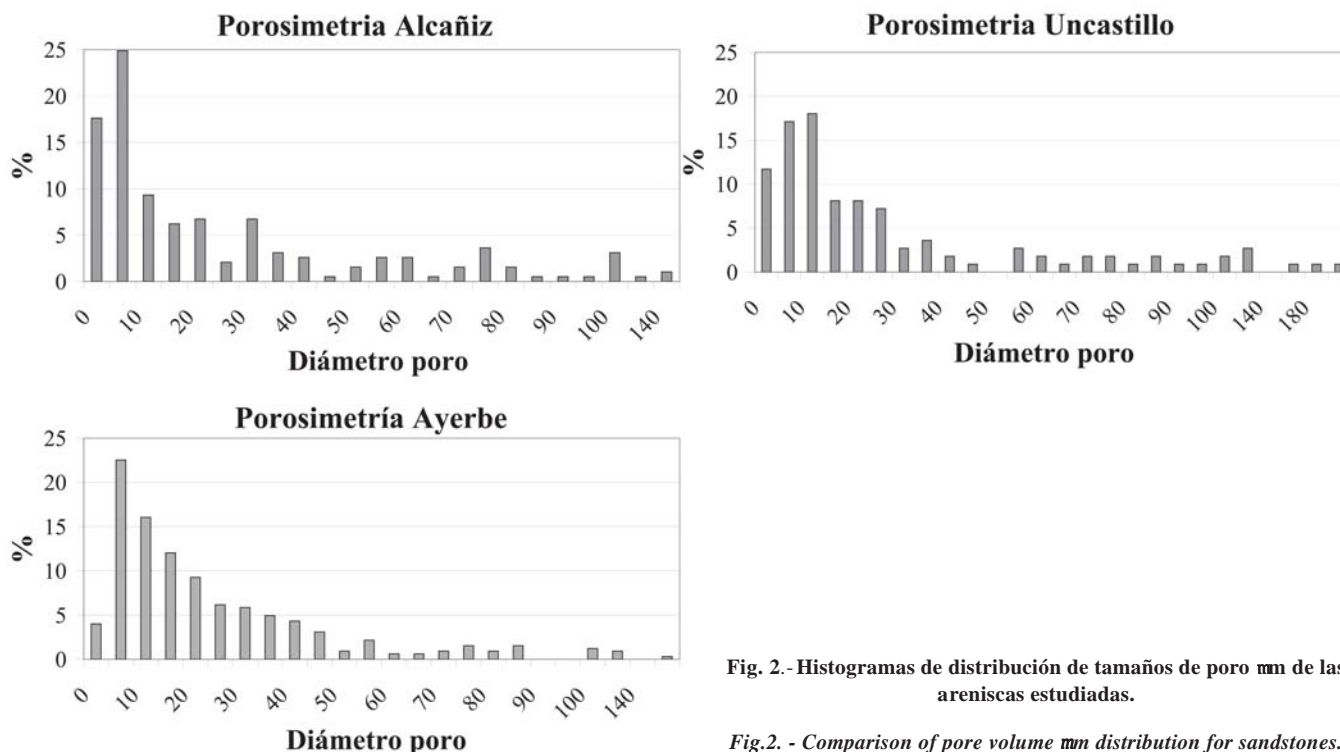


Fig. 2.- Histogramas de distribución de tamaños de poro mm de las areniscas estudiadas.

Fig.2. - Comparison of pore volume mm distribution for sandstones.

0,25 a 0,35 mm y máximos de 0,7 a 0,9 mm.

El esqueleto granosostenido de estas areniscas esta constituido por fragmentos de rocas carbonatadas tanto calcícticos como dolomíticos (policristalinos, monocristalinos y micríticos), fragmentos de rocas metamórficas y volcánicas, cuarzos (monocristalino y policristalino) y feldespatos. Como accesorios se encuentran zircón, esfena, turmalina, piroxeno, óxidos de hierro y moscovita. El cemento es carbonatado esparítico y sintaxial en un 90 -95% y de cuarzo sintaxial en un 5 -10 %. El cemento carbonatado esparítico es en ocasiones de calcita ferrosa.

Los resultados de los datos de porosidad calculados por métodos hídricos y ADI se han sintetizado en la tabla II. Los valores de porosidad obtenidos por el ADI y por métodos hídricos son muy homogéneos y presentan variaciones totales inferiores al 10%. En el caso de la arenisca de Alcañiz la porosidad obtenida mediante ADI es un 3,8% mayor que la obtenida por métodos hídricos debido a que esta técnica incluye tanto la porosidad abierta como cerrada (Andreola *et al.* 2000).

Los poros presentes en las areniscas se han subdivido en macroporos y microporos en función de sus dimensiones tabla III según (Riganti *et al.*, 1981). El diámetro medio de los poros de la arenisca de Uncastillo y Ayerbe es similar con unos valores de 16,61 µm y 17,89 µm

respectivamente y superior al de la arenisca de Alcañiz que presenta un tamaño medio de diámetro de poro de 14,28 µm.

En la figura 2 se han representado los histogramas de distribución de tamaños de poro. La arenisca de Ayerbe presenta la distribución mas continua de sus tamaños de poro, disminuyendo gradualmente el porcentaje de poros desde tamaños de 5-10 µm hasta tamaños de 60-65 µm. La arenisca de Uncastillo presenta una distribución de tamaños de poros similar a la de Ayerbe, presentando un mayor porcentaje de tamaños de poros mayores de 60 micras. La arenisca de Alcañiz presenta

una distribución mas heterogénea presentando en su distribución un mayor porcentaje de poros de pequeño tamaño con el 55,66% de los poros menores a 15 µm y con el 45% de sus poros menores a 10 µm. El estudio con el MEB de los líticos carbonatados en esta arenisca, da como resultado que el 8,10% de su superficie corresponde a microporos.

La curva de absorción en estas tres areniscas presenta una diferenciación en tres rectas con diferentes pendientes que pueden ser atribuidas a tres rangos de tamaño de poro preferentes. La recta inicial y de mayor pendiente indica una absor-

	Porosidad Método hídrico (%)	Porosidad Método ADI (%)	Variación respecto valor hídrico (%)
Alcañiz	3,8	7,6	97,4
Ayerbe	10,5	11,5	109,5
Uncastillo	16,6	17,6	106,0

Tabla II.- Valores de porosidad obtenidos por análisis digital de imágenes y por métodos hídricos.

Table II.- Porosity values obtained by both techniques: image analysis and hidryc test.

	Diámetro medio (µm)	D. Poro < 15 µm	D. Poro < 10 µm
Uncastillo	16,61	49,05%	28,82%
Ayerbe	17,89	42,13%	26,54%
Alcañiz	14,28	55,66%	42,87%

Tabla III.- Resultados obtenidos con el análisis digital de imágenes.

Table III. Results obtained with image digital analysis.

Indice de esfericidad	Perpendicular estratificación	Paralelo estratificación
Uncastillo	0,64	0,60
Ayerbe	0,61	0,62
Alcañiz	0,57	0,61

Tabla IV.- Índice de esfericidad.

Table IV.- Sphericity Index.

ción de agua más rápida, debida principalmente a los poros de mayor tamaño. La duración de esta etapa dependerá del contenido en macroporos y del grado de conectividad por accesos de menor radio (Añorbe 1997). En cambio, cuando la pendiente de la curva de absorción es casi nula, es debido a una absorción lenta por medio de los microporos.

La absorción inicial en la arenisca de Alcañiz es más rápida debido a la mejor conexión que presentan los macroporos absorbiendo el 75% del agua total en los primeros 5 minutos, la arenisca de Uncastillo absorbe el 65% en 12 minutos y la arenisca de Ayerbe el 70% en 25 minutos. A las 24 h del ensayo de absorción las tres areniscas presentan un valor similar de absorción (80% del total). La saturación total de las areniscas de Uncastillo y Ayerbe tiene lugar en tiempos similares e inferiores a los de la arenisca de Alcañiz, que necesita mas tiempo para saturarse como consecuencia de su mayor porcentaje de microporosidad.

Las areniscas de Uncastillo y de Ayerbe presentan valores mayores de retención de agua tras el secado a presión atmosférica que la arenisca de Alcañiz, este es un factor muy a tener en cuenta ya que una mayor retención de agua significará un aumento en la alterabilidad potencial de los materiales pétreos. Esta menor retención de agua 3,18% frente al 22,35% de Uncastillo y al 25,78% de Ayerbe es consecuencia de la mayor conectividad que presentan los microporos de la arenisca de Alcañiz.

El índice de esfericidad de Wadell indica que los poros de estas areniscas presentan una esfericidad media (tabla IV). La representación gráfica de estos resultados indica un alargamiento del sistema poroso en la dirección perpendicular a la estratificación, mientras que en la dirección paralela presenta una distribución normal.

Los valores de porosidad obtenidos en este trabajo han sido correlacionados con otros parámetros de tipo petrofísico en un trabajo precedente (Buj y Gisbert, 2006).

Conclusiones

Se han obtenidos resultados satisfactorios en el cálculo de porosidad mediante análisis digital de imágenes quedando demostrado que se trata de una herramienta eficaz para la cuantificación de elementos texturales en materiales pétreos. La diferencia existente entre los datos hídricos y microscópicos se debe a la limitación en la resolución de la imagen de partida que no permite la caracterización de poros inferiores a 1,5 mm.

La interpretación de las gráficas de absorción y desorción confirman el mayor porcentaje de microporosidad en la arenisca de Alcañiz y la mayor conectividad tanto de los macroporos como de los microporos en la misma.

El análisis de los datos del índice de esfericidad indica un alargamiento del sistema poroso en la dirección perpendicular a la estratificación.

Las ventajas de trabajar con análisis digital de imágenes son:

- La obtención de datos texturales directos y objetivos gracias a los cuales es posible establecer correlaciones con otros parámetros de tipo petrofísico así como con parámetros relacionados con la durabilidad de los materiales pétreos.
- La menor cantidad de muestra necesaria para realizar el estudio si lo comparamos con otras técnicas.

Los mayores problemas de esta técnica son:

- La representatividad de las secciones estudiadas con respecto al total de la muestra.
- La resolución de la imagen de partida.

El primer problema se ha solventado mediante el estudio de diferentes secciones distribuidas de forma regular en las láminas estudiadas y mediante el tratamiento estadístico de los valores obtenidos. Para conocer el error de esta técnica estamos complementando el estudio con porosimetrías de Mercurio y Helio.

Agradecimientos

Al Gobierno de Aragón por la concesión de una beca predoctoral al primero de los autores (O.B.) ref. B044, 2004 gracias a la cual se ha realizado parte de este trabajo y al Dr. Jesús Soriano Carrillo y al Laboratorio central de estructuras y materiales del (CEDEX) por facilitar la realización de una estancia de investigación y utilización de sus equipos de microscopía y análisis de imagen.

Referencias

- Andreola F., Leonelli C., Romagnoli M. (2000). *The American Ceramic Society Bulletin*, 79, 7, 49-52.
- Añorbe, M. (1997). *Valoración del deterioro y conservación en la piedra monumental*. Monografías CEDEX M-56 269pp
- Buj, O., Gisbert, J. (2006). *Heritage, Weathering and Conservation*. 2, 741-747.
- Coster, M., Chermant, J.L. (2001). *Cement and Concrete Composites*, 23, 133-151.
- Davis, E. (1983). *Thinning algorithms: A critique and new methodology*. Pattern Recognition. 14, 53-63.
- Delesse, A. (1848). Procédé mécanique pour déterminer la composition des roches. *Annal. des Mines, fourth series* 1, 379-388.
- Franklin, J.A., Dusseault, M.B. (1991). *Rock Engineering Applications McGraw-Hill*, New York. 600pp
- Norma UNE-EN 1936 (1999). *Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total*.
- Pettijohn F.J., Potter P.E. y Siever, R. (1973). *Sand and sandstone*. Springer Verlag. New Cork. 553 pp.
- Prendes, N. (1992). *Aplicaciones del análisis digital de imágenes*. Monografías centro de estudios y experimentación de obras públicas (CEDEX). M-27 154pp.
- Puigdefábregas, T. (1975). *La sedimentación molásica en la cuenca de Jaca*. Monografías del Instituto de Estudios Pirenaicos num. 104.
- Riganti, V., Perotti, A., Fiumara, A., Veniale, F and Zezza, U. (1981). *Applicazione di tecniche strumentali al controllo del degrado delle pietre nei monumenti: il caso Della Basilica de S.Michele in Pavia*. Tai soc. Italiana Sci. Nat. Museo Civico Storia Naturale Milano, 122, 109-138.
- Wadell, H. (1932). *The journal of geology*, 40, 443-451.