

Comportamiento hidráulico de la roca matriz en el acuífero costero del área calcárea de Campos (Mallorca).

Hydraulic behaviour of the rock matrix at the calcareous Campos site coastal aquifer (Majorca, Spain).

F. J. Mateos y M. Montoto

Universidad de Oviedo. Depto. de Geología. Grupo de Petrofísica. c/ Jesús Arias de Velasco s/n. 33005 Oviedo (Asturias).

ABSTRACT

In the framework of a wider European study of saline intrusions in coastal environments, the hydraulic behaviour of the rock matrix at the calcareous Campos site coastal aquifer (Majorca) has been characterized. This characterization is performed on rock cores in laboratory; its main objective is the relation between the hydraulic properties of the rock matrix and the rock forming components of petrophysical significance, specially the pore space structure. The anisotropy and heterogeneity is previously analyzed. The real and apparent density, effective and non-effective porosity, range of pore throat size, free and forced water absorption, water desorption, coefficient of capillarity and water vapour permeability have been evaluated. Seven different types of porosity according textural considerations have been established.

Key words: rock matrix, petrophysical characterization, limestone, hydraulic properties, physical properties, rock forming components, anisotropy, heterogeneity, porosity.

Geogaceta, 36 (2004), 127-130
ISSN:0213683X

Introducción

Las intrusiones salinas en los acuíferos costeros, tanto de origen natural como antrópico, constituyen una de las causas más extendidas en la contaminación de acuíferos de regiones semiáridas costeras. La mitigación de los efectos que ocasionan tales intrusiones requiere, previamente, la caracterización hidrogeológica multi-escalar de las estructuras presentes (Bear *et al.*, 1999). Con este fin, el proyecto europeo ALIANCE "Advanced Logging Investigation of Aquifer In Coastal Environments, with application to salt intrusion processes" está desarrollando una estrategia para la descripción cuantitativa de los flujos y almacenamientos de agua en el subsuelo. El proyecto persigue desarrollar una nueva línea de herramientas geofísicas e hidrodinámicas, que permitan caracterizar entre otras, la transmisividad y dispersividad en el subsuelo de una manera rápida, efectiva y económica.

Inicialmente se han seleccionado tres escenarios geológicos diferentes para el desarrollo del proyecto: el área de Ploemeur (Bretaña, Francia), y las áreas de Pollença y Lluçmajor (norte y sur de Mallorca respectivamente). El acuífero presente en el área de Ploemeur, está constituido por rocas cristalinas (granitos y esquistos) con diferentes grados de al-

teración, donde la circulación de aguas se produce esencialmente a través de la red fractográfica del macizo rocoso. En Mallorca, ambos acuíferos están constituidos por rocas carbonatadas. En el norte (área de Pollença) las vías de migración de agua están controladas principalmente por la intensa fracturación de las dolomías existentes, teniendo también especial interés la circulación a través de la porosidad secundaria generada en el proceso de dolomitización. En el sur (área de Lluçmajor), la elevada porosidad de las calizas arrecifales representan una importante vía para la circulación y almacenamiento de las aguas subterráneas del acuífero costero.

Este trabajo se centra en este último escenario geológico y, concretamente, en el sondeo MC-2 del campo de pruebas localizado en la zona de Campos. Geológicamente, la unidad arrecifal que constituye el acuífero principal, está representada por capas horizontales de calizas arrecifales y calcarenitas miocenas. En los distintos sondeos realizados se han atravesado, las facies típicas de plataforma, talud arrecifal, barrera arrecifal y lagoon hasta alcanzar, por debajo de esta unidad, un nivel de margas correspondientes al Tortoniense-Serravallense que constituye un límite impermeable. La serie tipo de esta unidad arrecifal, con una potencia máxi-

ma de 80 m, aparece en Cabo Blanco.

La fase inicial del proyecto, llevada a cabo por el ETH (Swiss Federal Institute of Technology) y el ISTEEM (Institut des Sciences de la Terre, de l'Eau et de l'Espace de Montpellier, Francia), ha consistido en la elaboración de perfiles geofísicos, hidrodinámicos e hidrogeoquímicos, obtenidos mediante ensayos asociados a sondeos. Otra fase, presentada sintéticamente a lo largo de este trabajo, incluye la caracterización petrofísica de la roca matriz (a la escala mm-cm) en laboratorio. Ésta permitirá por un lado, relacionar los datos de porosidad determinados en el laboratorio con los obtenidos mediante "logging", y por otro, comprender y modelizar de manera glo-

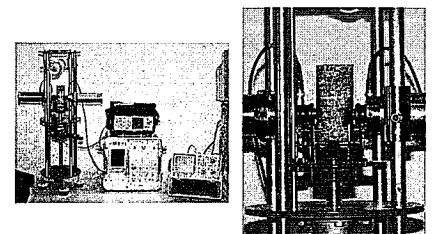


Fig. 1.- Detalle de los equipos de ultrasonidos y del soporte utilizado para la realización de perfiles ultrasónicos a lo largo de los testigos de sondeo.

Fig. 1.-Ultrasonic facilities used for obtaining ultrasonic profiles along rock cores.

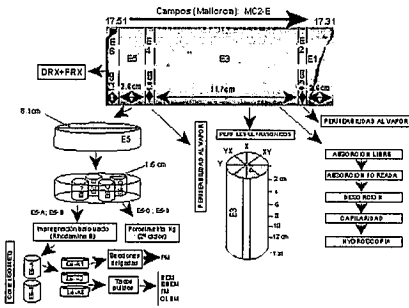


Fig. 2.- Ejemplo de documentación de preparación de probetas a partir de cada testigo de sondeo estudiado.

Fig. 2.- Documentation of the specimen preparation strategy for each studied rock core.

bal, el comportamiento del agua y la capacidad de almacenamiento en el acuífero a largo plazo.

Estudios realizados

Se han seleccionado las zonas del sondeo con mayor potencial como vías de migración y almacenamiento de agua dentro del acuífero. La selección se ha centrado en 20 testigos de sondeo y su caracterización petrofísica contempla tres etapas:

• Determinación de anisotropías e in-homogeneidades.

• Identificación y cuantificación de los componentes petrográficos, con especial atención a la geometría del sistema poroso abierto.

• Determinación de las propiedades físicas elementales (porosidad, densidad, etc.) e hidráulicas (absorción y desorción de agua, capilaridad, permeabilidad al vapor de agua).

En los estudios petrofísicos, como etapa preliminar previa, se recomienda determinar mediante procedimientos no destructivos (ultrasonidos), la presencia de anisotropías e in-homogeneidades en cada una de las muestras seleccionadas; esto es lo que se ha realizado en cada uno de los 20 testigos de este trabajo. Se han aplicado técnicas de propagación de ondas P, método de transmisión directa. A fin de minimizar los errores durante los ensayos, se ha diseñado un soporte que optimiza la elaboración de perfiles de “tiempos de vuelo” y tiempos residuales, así como la detección de anisotropías e in-homogeneidades en los testigos de sondeo; estas últimas características se detectan inmediatamente (Fig. 1) y están fundamentalmente relacionadas con zo-

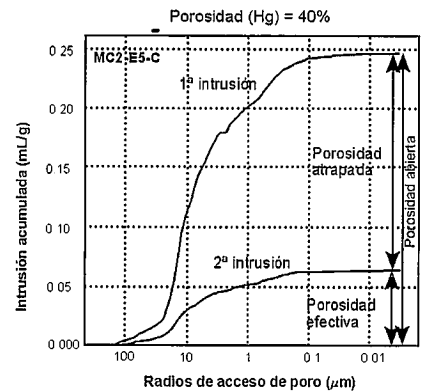


Fig. 3.- Curvas de intrusión y extrusión de mercurio obtenidas para uno de los ensayos realizados. La diferencia entre ambas curvas informa sobre la porosidad abierta atrapada, no efectiva, de la roca

Fig. 3.- Hg-intrusion and Hg-extrusion curves obtained for one of the tested specimens. The difference between both curves, evaluates the trapped open porosity, non-effective porosity, of the rock.

nas de alta/baja porosidad.

En general, estos trabajos de caracterización hidráulica de la roca matriz implican el estudio de las muestras seleccionadas bajo muy distintas técnicas microscópicas e instrumentales: microscopías ópticas y electrónicas, porosimetría de mercurio, absorción-desorción de agua, etc. Esto requiere preparar probetas con variadas dimensiones y formas según métodos específicos de preparación (impregnación con fluoresceína, corte con sierras de disco diamantado de baja deformación, etc.) lo cual exige laboriosas manipulaciones de corte y subdivisión de los nuevos fragmentos y establecer una estrategia de documentación de cada una de las etapas de preparación realizadas a partir de la muestra inicial y de los datos obtenidos para cada probeta (Fig.2). La metodología de estas investigaciones,

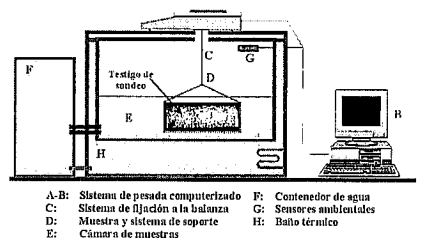


Fig. 4.- Esquema del sistema instrumental utilizado para la evaluación automatizada de las propiedades hidráulicas. Ejemplo para el ensayo de absorción libre de agua.

Fig. 4.- Sketch of the PC-based system used for the instrumental evaluation of the hydraulic properties. This example corresponds to the free water absorption test.

Parámetros		Técnicas	Unidades	Normas
Porosidad	Total	Al agua	Método hidrostático	%
	Abierta			
	Efectiva			
	Atrapada			
	Total	Al mercurio	Porosimetría de mercurio	ASTM D4404-84
	Abierta			
	Efectiva			
	Atrapada			
Radio de poro	Media	Microscopia cuantitativa	µm	No estandarizado
Mediana				
Radio de acceso de poro	Media	Porosimetría de mercurio	µm	ASTM D4404-84
	Mediana			
Superficie específica			m ² /g	
Densidad	Densidad real	Al agua	Método hidrostático	UNE-EN 1936
		Al mercurio	Porosimetría de mercurio	ASTM D4404-84
	Densidad aparente	Al agua	Método del picnómetro	UNE-EN 1936
		Al mercurio	Porosimetría de mercurio	ASTM D4404-84
Absorción libre de agua	Contenido en agua	24 h	Autosorc Equipo automatizado de medición	%
		48 h		
		168 h		
	Grado de saturación	24 h		
		48 h		
		168 h		
Absorción forzada de agua		Campana de vacío	UNE-EN 1936	
Evaporación libre de agua	Contenido en agua	24 h	Autosorc Equipo automatizado de medición	%
		48 h		
		168 h		
	Grado de saturación	24 h		
		48 h		
		168 h		
Capilaridad	Coeficiente de capilaridad		Kg /m ² * h ^{1/2}	
Permeabilidad al vapor de agua	Coeficiente de permeabilidad		g/m ² * 24h	
Anisotropía	Coeficientes de anisotropía		m/s	ASTM D2845-00
Inhomogeneidad	Veloc. propagación de ondas P		-----	

Tabla I.- Parámetros petrofísicos, técnicas, unidades y normas de ensayo utilizados en este estudio.

Table I.- Petrophysical parameters, techniques, units and standardized tests used in this study.

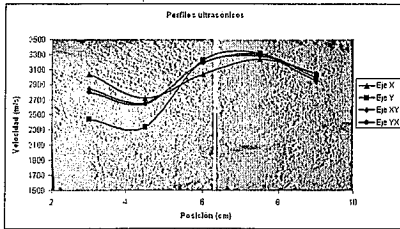


Fig. 5.- Testigo de sondeo cortado longitudinalmente según el eje Y (ver Fig. 2). Las zonas más porosas presentan menor velocidad de propagación de las ondas P y viceversa.

Fig. 5.- Longitudinal section of a rock core along the Y axis (see Fig. 2). Higher porosity zones show lower P-waves velocity and vice-versa.

técnicas implicadas, razones de los parámetros seleccionados así como su interés hidráulico y su lectura petrográfica, se describe en Montoto (2003).

Los parámetros petrofísicos analizados se detallan en la Tabla 1. Las técnicas microscópicas; polarización, fluorescencia, electrónica de barrido y láser confocal, proporcionan una información detallada del sistema poroso a distintas escalas. Además combinadas con procedimientos de microscopía cuantitativa, estereológicos y proceso digital de imagen, permiten evaluar algunos de los parámetros citados en dicha tabla. Adicionalmente y a fin de evitar artefactos en la porosidad, las técnicas de preparación utilizadas han permitido optimizar la información obtenida mediante secciones delgadas pulidas o tacos pulidos, impregnados bajo vacío con resinas fluorescentes (Rhodamina B).

Se ha utilizado porosimetría de inyección de mercurio para evaluar la porosi-

dad atrapada y su funcionalidad hidráulica a partir de la distribución de los diversos rangos de los radios de acceso a los poros, superficie específica, etc. (Fig. 3).

Como garantía de no introducción de errores durante las medidas de propiedades hidráulicas, las cuales implican una repetitiva y tediosa manipulación de la muestra, así como por la necesidad de ensayar muestras de dimensiones elevadas con un volumen más representativo (hasta 30 cm de longitud), se han utilizado equipos instrumentales computerizados (Martín et al., 2002) (Fig. 4). Estos equipos permiten la continua monitorización, bajo condiciones constantes de humedad y temperatura, de la evolución del peso de la muestra durante los ensayos hidráulicos. Además, dado que se pueden utilizar muestras de tamaño muy variable (y también de geometría variable), puede analizarse la influencia, en estas propiedades, de la presencia de fracturas verticales de macizo que muestran algunos testigos.

Resultados preliminares

En términos generales, se ha podido observar que la mayor parte de los testigos estudiados presentan una importante heterogeneidad, controlada fundamentalmente por la distribución irregular de la porosidad a lo largo del sondeo (Fig.5). La presencia de anisotropías no es muy importante, apareciendo solamente en algunos de los testigos de caliza, según el eje Z (eje del sondeo perpendicular a la estratificación), donde la presencia de niveles de acumulación de ostras y otros ti-

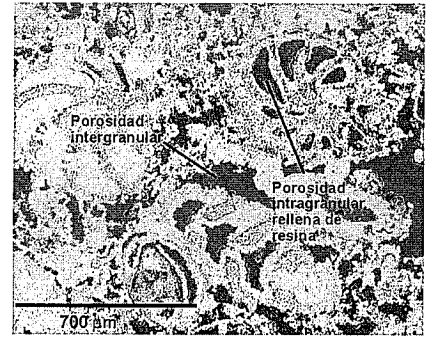


Fig. 6.- Aspecto al microscopio electrónico de barrido, electrones retrodispersados, BSEM, de una de las calizas fosilíferas típicas de la zona de Campos. La muestra se ha impregnado con una resina con fluoresceína. Se puede distinguir, dado el contraste de emisión, BSEM, entre la porosidad abierta rellena por la resina (gris oscuro) y la propia roca (gris claro).

Fig. 6.- Typical fossiliphera limestone from Campos as observed under scanning electron microscopy, backscattered electrons, BSEM. The specimen has been impregnated with a fluoresceine dye penetrant. The existing contrast of emission, BSEM, between the resin filled open porosity (dark grey) and the rock (soft grey), allows their easy discrimination.

pos de fósiles con morfologías planares, así como los huecos que se forman entre ellos, generan una mayor atenuación en la propagación de las ondas P que según otras direcciones.

Las técnicas de preparación de muestra utilizadas para los estudios de microscopía y que implican impregnación bajo vacío de resinas fluorescentes (Rhodamina B) facilitan la rápida distinción entre porosidad abierta y porosidad cerrada, aspecto fundamental por su diferente funcionalidad hidráulica; además, en algunas de las calizas oolíticas estudiadas esta porosidad cerrada puede alcanzar valores próximos al 25 % (Fig. 6).

El conocimiento obtenido sobre la geometría del sistema poroso a escala mm-cm y la cuantificación de sus principales parámetros (porosidad total, porosidad abierta y cerrada, porosidad efectiva y atrapada, superficie específica, radio medio de poro, distribución de los radios medios de acceso de poro, etc.) permite una interpretación global muy real sobre la capacidad de movimiento del agua por el seno de la roca matriz así como sobre la funcionalidad hidráulica de sus vías de circulación, es decir, la mayor o menor facilidad del agua para moverse a través de dichas vías.

El análisis detallado de la configuración del sistema poroso de los más de 20 testigos de sondeo estudiados, ha puesto

Parámetros	Unidades	Profundidad de las muestras estudiadas						
		17.35	19.24	34.30	60.77	88.43		
Porosidad	Abierta	%	17.46	19.43	34.50	60.88	88.54	
			40.45	36.22	18.84	35.78	41.47	
			24.98	20.83	5.09	18.14	14.74	
	Efectiva	%	15.47	15.39	13.74	17.64	27.00	
			---	---	---	---	---	
	Radio de poro	Media	µm	75	55	195	240	125
				0.63	0.09	0.12	0.06	1.38
		Mediana	8.36	4.18	1.65	2.94	0.89	
			0.79	4.17	1.39	5.89	0.34	
	Radio de acceso	Media	µm	1442	1586	2218	1715	1629
1645				1806	2235	1886	1761	
Superficie específica	m ² /g	---	---	---	---	---		
		---	---	---	---	---		
Densidad	Densidad real	Kg/m ³	H ₂ O	---	---	---	---	
			Hg	2763	2832	2754	2937	2996
	Densidad aparente	H ₂ O	14.31	9.36	1.92	8.14	11.82	
		Hg	14.72	11.25	1.98	8.72	---	
Absorción libre de agua	Contenido en agua	%	15.60	12.50	2.09	9.75	---	
			45.25	37.85	26.99	37.58	55.62	
			46.57	42.36	27.84	40.27	---	
	Grado de saturación	48 h	49.35	50.00	29.41	44.90	---	
		168 h	31.61	25.00	7.14	21.66	20.30	
		28.57	20.31	3.31	16.97	16.82		
Evaporación libre de agua	Contenido en agua	%	25.30	15.91	1.28	12.19	12.26	
			2.05	0.33	0.63	0.38	0.42	
			90.36	81.26	46.37	88.38	82.84	
	Grado de saturación	48 h	80.02	63.65	17.99	56.29	60.38	
		168 h	6.48	1.35	8.94	1.79	2.05	
		---	---	---	---	---		
Capilaridad	Coefficiente de capilaridad	Kg/m ² * h ^{1/2}	35.23	21.78	1.38	14.33	13.54	
Permeabilidad al vapor de agua	Coefficiente de permeabilidad	g/m ² * 24h	349	309	167	254	291	

Tabla II.- Ejemplo de valores obtenidos en testigos de sondeo a diferentes profundidades, para los parámetros mencionados.

Table II.- Example of obtained data for the specified parameters in rock cores at different depths.

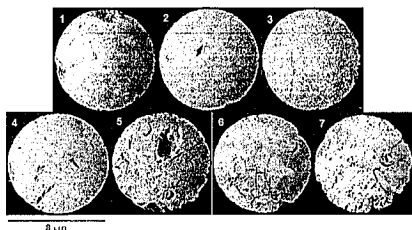


Fig. 7.- Aspecto macroscópico de los siete tipos de porosidad establecidos inicialmente en estas rocas en función de la estructura de sus sistemas porosos.

Fig. 7.- Macroscopic aspect of the seven porosity types established in these rocks according to the structure of their pore space.

de manifiesto la gran variabilidad existente en todos y cada uno de los parámetros evaluados (Tabla 2). No obstante, y de manera preliminar, en esta zona del acuífero se pueden establecer siete categorías de acuerdo con las características de la estructura de dicho sistema poroso. En la figura 7 se presenta el aspecto de las mismas y en la Tabla 3 se describen muy someramente sus principales características.

De los datos de la Tabla 2 y de otros no incluidos en ella cabe destacar fundamentalmente varios aspectos:

Los valores de porosidad abierta, en los más de 20 testigos analizados, llegan a oscilar entre el 8 y el 45 %. A su vez y dentro de la porosidad abierta, la relación entre porosidad efectiva y atrapada es muy variable, llegando a existir muestras en las que las porosidades atrapadas son superiores a las efectivas.

El comportamiento de estos materiales frente al agua es también muy variable, tanto en los valores obtenidos como en la cinética de los procesos, si bien, cabe resaltar que para tiempos máximos de una semana, ninguna de las muestras llega a alcanzar valores en el grado de saturación libre superiores al 60 % respecto

Tipo de sistema poroso	Tipo de roca	Porosidad (%)	Tipos de porosidad predominante			Radios máximos de poro	Otras características
			Alta (>50%)	Media (50-25%)	Baja (<25%)		
1	Caliza oolítica bien cementada	8	Intragranular (oolitos)	Intergranular	-----	< 2 mm.	Elevada porosidad cerrada
2	Caliza micrítica	37	Intergranular	-----	Intragranular	< 0.6 mm.	-----
3	Caliza fosilífera	40	Intragranular (fósiles)	Intergranular	-----	< 5 mm.	-----
4	Caliza fosilífera	8	Intragranular (fósiles)	-----	Intergranular	< 2 cm.	-----
5	Caliza fosilífera (Lumaquela)	30	Intragranular (fósiles)	Intergranular	-----	< 4-5 cm.	Elevada porosidad cerrada
6	Brecha calcárea bien cementada	16	Intergranular	Intragranular	-----	< 2 cm.	-----
7	Caliza coralina bien cementada	20	Intergranular	Intragranular	-----	< 2 cm.	-----

Tabla III.- Características más importantes de los siete tipos de sistema de poroso inicialmente establecidos.

Tabla III.- Most relevant characteristics of the initially established seven porosity types.

al contenido máximo de agua en saturación bajo vacío. Esto confirma que la tortuosidad en el sistema poroso de estas calizas es elevada, tal como evidencian los valores de porosidad atrapada obtenidos en los ensayos de inyección de mercurio.

Agradecimientos

A la European Commission que ha financiado esta investigación; proyecto EC EVK1-2001-00039, ALIANCE "Advanced Logging Investigation of Aquifer In Coastal Environments, with application to salt intrusion processes". A la "Conselleria de Medi Ambient" del Gobierno Balear por sus constantes atenciones, facilidades e informaciones durante la realización de los trabajos de campo

Referencias:

ASTM - D 2845-00. (2000). Standard test method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rock. ASTM International. Standard on Disc. Section Four: Construction. Volume 04.08. Soil and Rock

(I).

ASTM - D 4404-84. (1998). Standard test method for determination of pore volume and pore volume distribution of soil and rock by mercury intrusion porosimetry. ASTM International. Standard on Disc. Section Four: Construction. Volume 04.08. Soil and Rock (I).
 Bear, J., A.H.D., Sorek, S., Ouazar, D. and Herrera, I. (1999). Seawater Intrusion in Coastal Aquifers. Concept, Methods and Practices, Kluewr Academic Publishers, London.
 EN-1936 (1999). Determination of a real density and apparent density, and of total and open porosity. European Committee for Standardization (CEN).
 Martín, J., Navas, J., Alcántara, R. (2002). An instrumental system for continuous measuring of the sorption properties in porous materials. Protection and Conservation of Cultural Heritage of Mediterranean Cities. Galán, E., Zezza, F. (ed). A.A. Balkema Publishers, pp. 327-330.
 Montoto, M. (2003). "Petrophysics at the rock matrix scale: hydraulic properties and petrographic interpretation". Publicación Técnica 11/2003, 300p., ENRESA (Madrid).