

Caracterización y modelización del espacio poroso de las areniscas de Utrillas: aplicación al almacenamiento geológico de CO₂

Characterization and modelling of Utrillas sandstones pore space: application to geological CO₂ storage

I. Barrios¹, R. Campos¹, A.M. González¹, R. Martínez² e I. Suárez²

1. Laboratorio de Caracterización Petrofísica. Unidad de Geología Ambiental Aplicada. Departamento de Medio Ambiente, CIEMAT. Avenida de la Complutense 40, 28040 Madrid. iciar.barrrios@ciemat.es; roocio.campos@ciemat.es; ana.lujan@ciemat.es

2. Área de investigación del subsuelo y almacenamientos geológicos, IGME. Calle Ríos Rosas 23, 28003 Madrid. ro.martinez@igme.es; i.suarez@igme.es

Resumen: El almacenamiento geológico de CO₂ en acuíferos salinos profundos está considerado como una de las opciones más prometedoras, a corto y medio plazo, para la mitigación del Calentamiento Global. En este estudio se ha aplicado la porosimetría por intrusión de mercurio a la caracterización de la microestructura porosa de la formación almacén areniscas de Utrillas y se ha realizado su modelización mediante la reconstrucción tridimensional del espacio de poros. Los resultados muestran como esta metodología es válida para evaluar la idoneidad de la formación geológica como potencial roca almacén de CO₂.

Palabras clave: Almacenamiento de CO₂, acuífero salino, areniscas de Utrillas, porosimetría por intrusión de mercurio.

Abstract: Carbon dioxide storage in saline aquifers is considered one of the most promising ways, in short and medium term, to mitigate Global Warming. In this study, we apply mercury intrusion porosimetry to characterize the porous microstructure of the Utrillas sandstone storage formation. In addition, we performed modelling the system using a three-dimensional reconstruction of the porous space. Our results show that this methodology is valid for assessing the suitability of the geological formation as a potential reservoir of CO₂.

Key words: CO₂ storage, saline aquifer, Utrillas sandstones, mercury intrusion porosimetry.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento económico que ha tenido lugar en nuestra sociedad desde principios del siglo pasado ha estado basado en un modelo energético fuertemente centrado en el uso de combustibles fósiles. Esto ha provocado graves problemas ambientales, entre los que destacan los derivados de la emisión de gases de efecto invernadero, principalmente de CO₂, causante del Calentamiento Global.

Bajo el término CCS -Carbon dioxide Capture and Storage- se han agrupado un prometedor grupo de tecnologías diseñadas para reducir las emisiones de CO₂ que se piensa que podrían contribuir entre un 15% y un 55% al esfuerzo acumulativo mundial de mitigación del Calentamiento Global hasta el 2100 (IPCC, 2005).

La alternativa que internacionalmente tiene mayor aceptación para reducir las emisiones de CO₂ es el Almacenamiento Geológico Profundo (AGP). Éste puede realizarse en yacimientos de petróleo y/o gas agotados, en capas de carbón no explotables o en formaciones salinas profundas, con agua no apta para la agricultura, ni para el consumo humano.

Esta última opción, el AGP de CO₂ en acuíferos salinos, está considerada una de las más viables. La evaluación y estudio de la seguridad de estos emplazamientos requerirá un cálculo preciso de su capacidad, que será el resultado de un amplio abanico de mecanismos físico-químicos que terminarán atrapando el CO₂ de diferentes formas. Así en el denominado *atrapamiento estratigráfico y/o estructural*, será un contraste de permeabilidad lo que impida la movilidad y/o ascenso del CO₂ (Ruiz et al., 2008) debido a la diferencia de densidad entre éste y el agua de la formación (Bachu et al., 1994). En el *atrapamiento capilar o residual* se producirá una desconexión de la fase CO₂ en una fracción inmóvil -atrapada- (Juanes et al., 2006). Con el *atrapamiento por disolución* el CO₂ se disolverá en el agua de la formación (Pruess y García, 2002) y finalmente, en el *atrapamiento mineral*, el CO₂ disuelto reaccionará con la roca almacén y con los iones del agua de formación y precipitará como minerales carbonatados (Gunter et al., 1997).

Los mecanismos de atrapamiento dominantes a lo largo del tiempo dependerán del tipo de roca almacén, del comportamiento dinámico del CO₂ y de la escala

temporal que se considere, pero independientemente de la escala temporal, la mayoría de los mecanismos de retención del CO₂ estarán controlados por las características del espacio poroso. Así, el estudio que se presenta, se centra en la caracterización de la microestructura porosa de la formación almacén areniscas de Utrillas.

MARCO GEOLÓGICO

En los trabajos previos de selección y caracterización de potenciales almacenes geológicos de CO₂ en el entorno de la Cuenca del Duero y las Cordilleras Ibérica y Vasco-Cantábrica, se consideró interesante investigar en detalle la serie siliciclástica del Cretácico Inferior (facies Utrillas) como potencial roca almacén. Por este motivo, el IGME, en el marco del proyecto “Sondeos cortos de caracterización de almacenes geológicos de CO₂ en España” consideró relevante la perforación de un sondeo que permitiera el muestreo y la realización de diversos ensayos para caracterizar dicha formación. El sondeo se perforó a testigo continuo en el término municipal de Tejada en la provincia de Burgos (MTN nº 314). En la figura 1 se muestra la posición del sondeo SD-1 sobre la cartografía MAGNA modificada. En la figura 2, se muestra una fotografía de una de las cajas de testigos de sondeos muestreados.

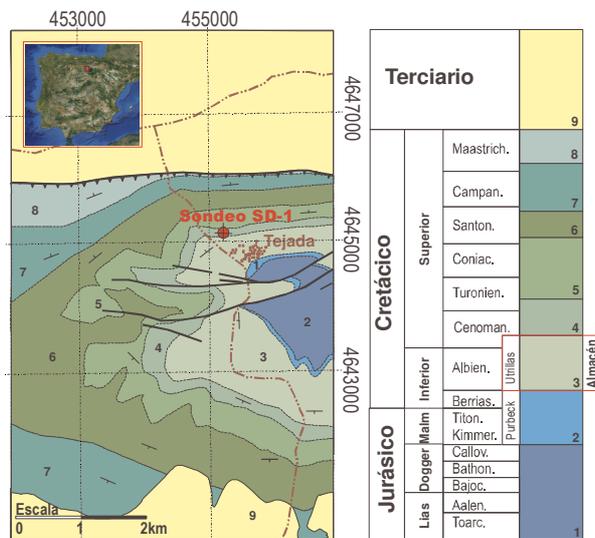


FIGURA 1. Localización del Sondeo SD-1, sobre la cartografía geológica (modificada) de la Hoja MAGNA 1:50.000, N°314 y columna estratigráfica simplificada.

Las areniscas de Utrillas corresponden a un depósito detrítico de ambiente aluvial, dividido en dos unidades, ambas de areniscas, más conglomeráticas hacia la base y más lutíticas hacia techo (Marfil y Gómez-Gras, 1992). Corresponden a arcosas o subarcosas con términos cuarzoareníticos. La importante presencia de feldespato potásico, así como de matriz caolinítica y cementos calcíticos-dolomíticos, serán importantes factores en la modificación de la estructura primaria de poros.

El muestreo de las areniscas se realizó a varias profundidades en el sondeo SD-1, cubriendo las variaciones de facies cortadas por la perforación. Se tomaron cuatro muestras, la primera y segunda a profundidades de 63,00m y 61,30m respectivamente, ambas corresponden a facies arcósicas muy caolinizadas. La tercera muestra fue tomada a 35,40m de profundidad, se trata de una subarcosa de grano fino, con presencia de cementos calcíticos-dolomíticos. Finalmente la cuarta muestra se tomó a 25,40m de profundidad, y corresponde a una facies de grano fino con presencia abundante de óxidos de Fe.



FIGURA 2. Sondeo SD-1 (Tejada - Burgos). Testigo de sondeo muestreado - Caja 24 - 55,15 - 59,85m de profundidad.

EXPERIMENTACIÓN Y METODOLOGÍA

En el presente estudio, el análisis de la porosidad de las areniscas de Utrillas se ha realizado utilizando la porosimetría por intrusión de mercurio (MIP), asociada a la simulación del espacio poroso con el software Pore-Cor, se ha completado este estudio mediante el análisis de imágenes de tomografía axial computarizada (TAC) (Campos et al., in press).

La MIP es una técnica destructiva que permite estudiar la red porosa de los materiales en un rango de diámetro de poro entre 0,003 - 360µm. Está basada en el principio físico por el cual un líquido no reactivo y no humectante no penetrará por el espacio poroso hasta que no se aplique la presión suficiente para forzar su entrada. La relación entre la presión aplicada y el tamaño de poro por el cual podrá intruir el mercurio viene dada por la ecuación de Washburn (Washburn, 1921), y a partir de ella podemos calcular la porosidad conectada de la muestra.

Los análisis necesarios para este estudio han sido realizados con el equipo AutoPoreIV 9500 de Micromeritics en el Laboratorio de Caracterización Petrofísica del CIEMAT.

Como uno de los objetivos de este trabajo es entender los diferentes mecanismos de atrapamiento del CO₂ una vez inyectado en la roca almacén, se ha realizado una reconstrucción tridimensional del sistema

poroso utilizando el código informático Pore-Cor desarrollado por la Universidad de Plymouth (UK). Pore-Cor parte de los datos experimentales de la MIP, realiza la corrección de las curvas de intrusión y extrusión asociada a errores instrumentales, y simula el medio realizando una reconstrucción virtual que reproduce la porosidad conectada de la muestra.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del análisis mediante MIP permiten construir las curvas de intrusión - extrusión características de los materiales analizados (Fig. 3).

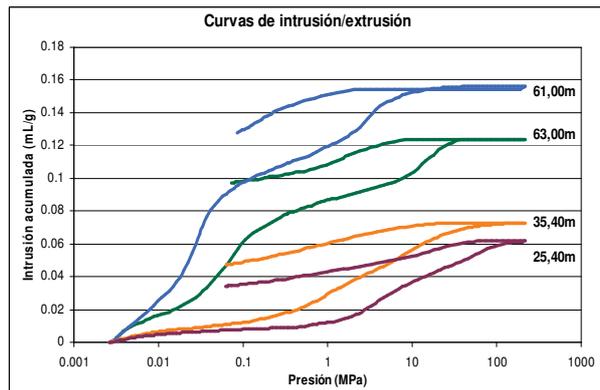


FIGURA 3. Curvas de intrusión - extrusión de mercurio para las areniscas de Utrillas muestreadas a diferentes profundidades en el sondeo SD-1.

La tendencia de estas curvas, aunque similar, varía en función de la muestra, lo que está indicando ligeras variaciones en el sistema de poros de las diferentes facies. Las facies más profundas, que corresponden a las muestras más caolinizadas, presentan un volumen de mercurio intruido (0,12 y 0,15mL/g - Tabla I) mayor que las muestras más superficiales (0,07 y 0,06mL/g). Esto se traduce en una mayor porosidad 24,38% y 28,90%, como observamos en la tabla I. El papel de la caolinización en la generación de porosidad secundaria, en estas facies de Utrillas, asociada a procesos post-sedimentarios es un área de trabajo muy interesante que se abre para futuros estudios.

UTRILLAS SD-1 (m)	63,00	61,30	35,40	25,40
Vol total intruido (mL/g)	0,12	0,15	0,07	0,06
Área total poros (m ² /g)	1,30	0,51	1,78	3,67
Media diám. poro (4V/A)	381,4	1218,2	163,1	67,1
Porosidad (%)	24,38	28,90	15,93	13,86
Long. característica (µm)	430,32	474,13	336,93	513,51
Tortuosidad	6,88	7,49	7,30	7,74
Presión umbral (MPa)	0,0043	0,0029	0,0034	0,0031
Densidad (g/mL)	2,67	2,69	2,72	2,76

TABLA I. Principales parámetros determinados mediante la MIP en las cuatro muestras de areniscas de Utrillas tomadas a diferentes profundidades en el Sondeo SD-1 (Tejada - Burgos)

Entre los parámetros obtenidos mediante MIP relativos a la descripción de la estructura porosa, destacar también el área total de poros y el diámetro medio de éstos. Las muestras a 35,40m y 25,40m -menos alteradas- presentan un área total de poros mayor, pese a que el diámetro es menor (Tabla I), lo

que indica que el sistema poroso estará formado por una red con un elevado número de poros, pero de pequeño tamaño. La tortuosidad y la longitud de poro característica para las cuatro muestras son muy similares y no son muy diferentes del diámetro medio, lo que indica una tendencia de los poros hacia formas esféricas.

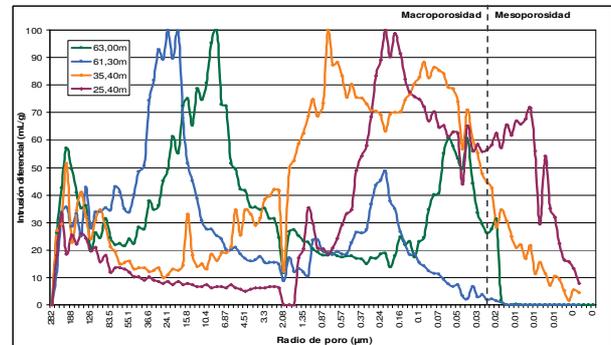


FIGURA 4. Curvas de distribución de tamaños de poros para las cuatro muestras tomadas a diferentes profundidades en el sondeo SD-1 (Tejada - Burgos). Se indica el tamaño de poro que según la clasificación de la IUPAC determina la separación entre macro y mesoporosidad.

Una última observación en las curvas de intrusión-extrusión es la no coincidencia entre ambas, lo que da lugar a una histéresis que indica que parte del mercurio no ha extruido, quedando irreversiblemente en la muestra, en lo que denominamos porosidad atrapada, la cual es debida a la presencia de poros con forma de cuello de botella que dificultan la extrusión. Este hecho queda patente en la simulación 3D realizada.

La figura 4 enfrenta radio de poro e intrusión diferencial y muestra la distribución de tamaños de poros. De nuevo encontramos claras diferencias entre las muestras caolinizadas y las menos alteradas. Pese a que las cuatro muestras son principalmente macroporosas -según la clasificación de la IUPAC-, las muestras más alteradas presentan un máximo de tamaño de radio de poro mayor. La única muestra con una presencia significativa de mesoporos es la tomada a 25,40m (Tabla II).

Utrillas SD-1	Macroporos >50nm		Mesoporos <50nm	
	(%)	Mediana(nm)	(%)	Mediana(nm)
63,00m	97,4	16924,2	2,6	39,48
61,00m	99,8	48122,0	0,2	43,83
35,40m	91,8	1568,1	8,2	48,65
25,40m	74,9	438,2	25,1	18,98

TABLA II. Porcentajes de macro y mesoporos en las cuatro muestras de areniscas de Utrillas tomadas a diferentes profundidades en el Sondeo SD-1 (Tejada - Burgos).

Finalmente se ha modelizado la arenisca de Utrillas de grano fino, con presencia de cemento carbonático, tomada a 35,40m de profundidad, ya que es la muestra menos alterada y que representa una facies muy común en la formación. Con esta facies además se están realizando otros ensayos de caracterización.

La modelización en el software Pore-Cor consiste en un proceso iterativo en que modificando la estructura y la disposición de poros, se intenta una aproximación cada vez mayor a los resultados experimentales. La reconstrucción del modelo se realiza en una celda cúbica unitaria de 1000 poros, considerando que cada poro puede estar interconectado con sus vecinos por dos o más caras, hasta un máximo de seis.

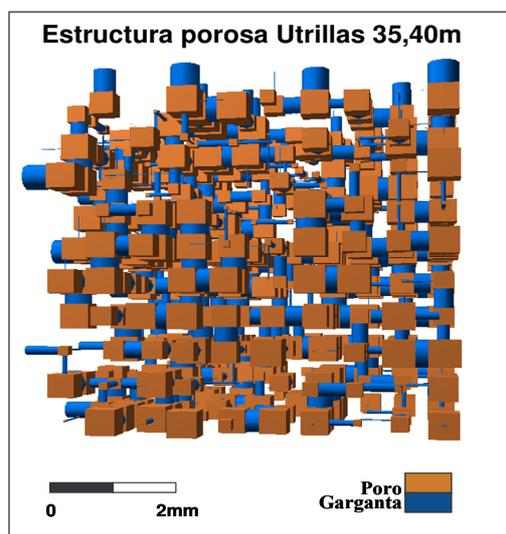


FIGURA 5. Estructura de poros simulada en Pore-Cor para la facies de grano fino de las areniscas de Utrillas muestreadas a 35,40m de profundidad en el sondeo SD-1 (Tejada – Burgos).

Los resultados de la simulación en Pore-Cor se muestran en la figura 5 y en la tabla III. Se ha conseguido un buen ajuste entre los resultados experimentales y el modelo simulado, lo que ha permitido reproducir una porosidad simulada de un 15,31%, marcando una diferencia de solo el 0,62% con respecto a la porosidad experimental (15,93%). Queda patente la estructura del sistema de poros en cuellos de botella, responsable de la histéresis en las curvas de extrusión.

Porosidad experimental (%)	15,93
Distancia entre sim. y exp.	1,436
Diám. mín. garganta (μm)	0,0074
Diám. máx. garganta (μm)	558,00
Porosidad simulada (%)	15,31
Conectividad	3,39
Umbral de percolación (KPa)	858,12

TABLA III. Parámetros morfológicos determinados en la simulación del espacio de poros en la muestra de arenisca de grano fino tomada a 35,40m de profundidad en el Sondeo SD-1 (Tejada – Burgos).

CONCLUSIONES

Dentro de las iniciativas encaminadas a la mitigación del Calentamiento Global, se ha seleccionado la serie siliciclástica del Cretácico Inferior (areniscas de Utrillas), como formación favorable para el AGP de CO_2 . Se ha estudiado y modelizado la

porosidad de la formación almacén, comprobando que tanto la facies arcósica muy caolinizada, como las subarcosas de grano fino, con porosidades comprendidas entre 28,90% y 13,86%, presentan una estructura de poros muy favorable para la inyección/retención de CO_2 , por su media-alta porosidad, por ser ésta fundamentalmente macroporosidad, que facilitará el proceso de inyección y por su geometría en forma de cuellos de botella que facilitaría el atrapamiento del CO_2 en estado supercrítico.

Este trabajo representa el inicio de una serie de estudios encaminados a evaluar la viabilidad de la formación Utrillas como roca almacén.

AGRADECIMIENTOS

Proyecto CGL2011-24768 financiado por la Secretaría de Estado Investigación Desarrollo e Innovación del MEC.

REFERENCIAS

- Bachu, S., Gunther, W.D. y Perkins, E.H. (1994): Aquifer disposal of CO_2 : Hydrodynamic and mineral trapping. *Energy Conv. Manag.*, 35 (4): 269-279.
- Campos, R., Martínez-Martínez, J., Barrios, I. y Fusi, N. (in press): Morfología del espacio de poros de las Areniscas de Utrillas a partir de imágenes de micro-tomografía axial computada de RX. En: *Geo-Temas. CGE 2012 – Oviedo*.
- Gunter, W.D., Wiwchar, B. y Perkins, E.H. (1997): Aquifer disposal of CO_2 -rich greenhouse gases: extension of the time scale of experiment for CO_2 -sequestration reactions by geochemical modelling. *Miner. Pet.*, 59 (1-2): 121-140.
- IPCC (2005): Special report on carbon dioxide capture and storage. Cambridge University Press.
- Juanes, R., Spiteri, E.J., Orr, F.M. Jr. y Blunt, M.J. (2006): Impact of relative permeability hysteresis on geological CO_2 storage. *Water Resour. Res.*, 42:W12418.
- Marfil, R. y Gómez-Gras, D (1992): Procedencia y modelo diagenético de las areniscas de las facies Utrillas en la Cordillera Ibérica (Umbral de Ateca) y la Meseta Norcastellana. *Rev.Soc.Geol. España*, 5 (3-4).
- Pruess, K. y García, J. (2002): Multiphase flow dynamics during CO_2 disposal into saline aquifers. *Environ. Geol.*, 42 (2-3): 282-295.
- Ruiz, C; Prado, P. J; Campos, R; Hurtado, A., Pelayo, M; de la Losa, A; Martínez, R; Ortiz, G; Sastre, J; Pérez del Villar, L; Eguilior, S; Lomba, L. y Recreo, F. (2008): Almacenamiento geológico de CO_2 : Criterios de selección de emplazamientos. En: *CONAMA 2008*.
- Washburn, E.W. (1921): The dynamics of capillary flow. *Phys. Rev.*, 17: 273–283.