



## AGP de CO<sub>2</sub>: Caracterización del espacio poroso de las areniscas de Utrillas

**Autor:** Icíar Barrios Virtus

**Institución:** Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT)

**Otros autores:** Rocío Campos Egea (CIEMAT); Javier Martínez Martínez (Universidad de Alicante); Ana María González Luján (CIEMAT); Nicoletta Fusi (Università degli studi di Milano Bicocca)

## Resumen

El estudio de la estructura y morfología del medio poroso y su reconstrucción tridimensional, aplicado al análisis petrofísico de las potenciales formaciones geológicas que actuarán como roca almacén de CO<sub>2</sub>, es actualmente un área de gran interés, debido a que este medio poroso es el que condiciona los mecanismos de atrapamiento tanto a corto como a medio y largo plazo que tienen lugar en la formación geológica inyectada.

El presente trabajo estudia la microestructura de la formación areniscas de Utrillas (Cretácico Inferior) en sus diferentes litofacies muestreadas en el sondeo SD-1 de Tejada (Burgos). La finalidad de este trabajo es demostrar las capacidades de la porosimetría por intrusión de mercurio (PIM) y la microtomografía computarizada (microTC) para la caracterización de la estructura porosa de la formación geológica y presentar un método de cuantificación y visualización en 3D de la disposición espacial de los poros que componen la roca.

La PIM y la microTC son técnicas que suministran información precisa sobre el espacio poroso de los materiales estudiados a diferentes escalas. Mientras que la PIM cubre un rango de diámetro de poro, entre 0,003 y 360µm, la microTC alcanza en este estudio una resolución de 9µm por pixel.

La microTC completa el estudio aportando información sobre la distribución espacial de los poros, su conectividad y la posible orientación preferencial de los poros. Estos tres parámetros resultan fundamentales en nuestro estudio, ya que son un indicador del comportamiento del flujo de un fluido en el medio. La reconstrucción tridimensional, a partir de las imágenes tomadas por el microtomógrafo, permite observar la distribución de la porosidad dentro de la muestra.

**Palabras claves:** almacenamiento de CO<sub>2</sub>, areniscas de Utrillas, porosimetría por intrusión de mercurio, microtomografía computarizada.

## 1. INTRODUCCIÓN

El aumento de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera se considera una de las principales causas del Calentamiento Global. Por este motivo, la reducción de emisiones de dicho gas se ha convertido en uno de los problemas ambientales más importantes.

Con el fin de controlar los niveles de CO<sub>2</sub> atmosférico y de limitar al mismo tiempo el impacto económico resultante de tal acción, se están estudiando diferentes opciones y entre éstas destaca, por su viabilidad, el almacenamiento geológico profundo de CO<sub>2</sub> en acuíferos salinos.

Son numerosos los estudios publicados sobre los distintos mecanismos de atrapamiento que tendrán lugar a lo largo del tiempo una vez se haya inyectado el CO<sub>2</sub> en la formación almacén (Bachu et al., 1994; Juanes et al., 2006; Pruess y García, 2002 y Ruiz et al., 2008), pero independientemente de la escala temporal a la que nos refiramos, la mayoría de los mecanismos de retención y/o transporte estarán controlados por las características del espacio poroso. Para ello la aplicación de técnicas como la microTC o la PIM constituyen herramientas esenciales.

## 2. EXPERIMENTACIÓN Y METODOLOGÍA

### 2.1. Porosimetría por intrusión de mercurio

La PIM se ha utilizado durante mucho tiempo para estudiar la porosidad de diferentes materiales geológicos. Es un técnica destructiva que permite estudiar la red porosa en un rango de diámetro de poro que oscila entre 0,003 y 360µm. La PIM se basa en el principio físico por el cual un líquido no reactivo y no humectante no penetrará de forma espontánea por el espacio poroso hasta que no se aplique una presión que será inversamente proporcional al diámetro de los conductos o poros por los que entra el mercurio. 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.

$$D = - 4 \gamma \cos \theta / P$$

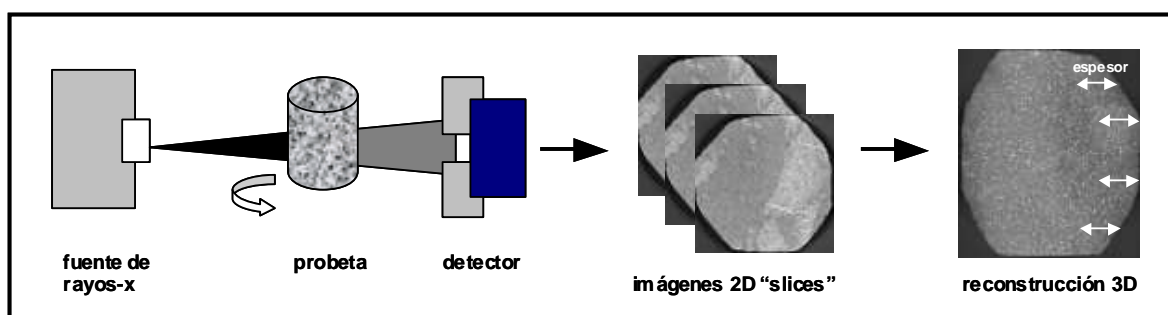
Donde (P) es la presión aplicada, (D) es el diámetro de poro, ( $\theta$ ) es el ángulo de contacto entre el sólido y el mercurio y ( $\gamma$ ) es la tensión superficial del fluido.

Esta técnica resulta de enorme interés por cubrir un amplio rango de tamaños de poros y proporcionar datos precisos del espacio poroso. Sin embargo, esta técnica, también presenta algunas limitaciones (a) no permite estudiar los poros aislados rodeados de sólido; (b) no es capaz de detectar los poros que tan sólo son accesibles a través de otros más pequeños hasta que el mercurio consigue intruir en ellos; (c) las presiones de inyección máximas y mínimas del equipo, limitan los diámetros mínimos y máximos detectables por la técnica (Romero y Simms, 2008).

## 2.2. Microtomografía computarizada

Mientras que la PIM es una técnica ampliamente utilizada en el estudio del espacio poroso de los materiales, la microTC sigue actualmente en desarrollo alcanzando cada vez resoluciones más altas. La microTC es una técnica que presenta grandes ventajas frente a la PIM ya que no es destructiva y puede proporcionar información cuantitativa de la estructura interna de las rocas en 3D. La desventaja es que con los equipos convencionales no se suele alcanzar una resolución menor de 5µm.

La microTC tiene como fundamento la exploración de la muestra con rayos X (Figura 1). Estos pasan a través de la muestra y el detector que hay tras ella recibirá la atenuación de la señal. La muestra gira 360° mientras que es escaneada y con cada ángulo del detector obtiene la señal correspondiente. Se generan una serie de imágenes en 2D llamadas “slices” que se corresponden a lo que se vería si el objeto se cortara a lo largo del plano escaneado. Finalmente, la reconstrucción de las imágenes se realiza por transformaciones matemáticas utilizando la señal recibida por el detector desde cada uno de los ángulos.



**Figura 1.** Esquema teórico de la tomografía computarizada (modificado de Mao, et al., 2012).

Para una determinada energía de rayos X, el coeficiente de atenuación (CT) es una función tanto de la densidad como del número atómico efectivo del material estudiado (Van Geet et al., 2001). El CT en unidades Hounsfield (1972) muestra la relación existente entre la atenuación de los rayos X al atravesar la muestra (m) y la atenuación en el agua (w), expresado en ‰.

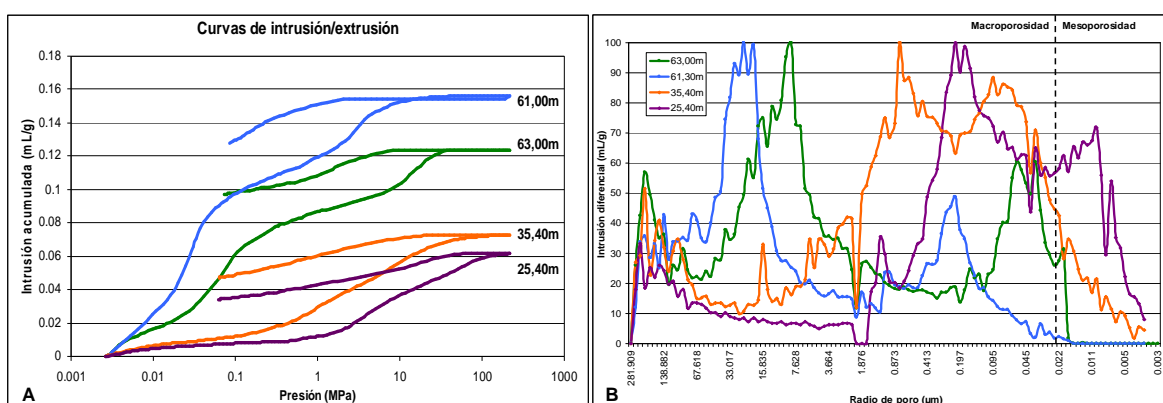
$$CT = 1000 (m-w) / w$$

La variación en los valores de los CT está representada en las imágenes en la escala de grises, correspondiendo los valores más oscuros con los menores CT y los más claros con los mayores CT.

El equipo de tomografía utilizado en este estudio ha sido el nanotomógrafo 3D de rayos X (Nanotom, Phoenix) del IMDEA-Materiales.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las diferentes facies de areniscas de Utrillas analizadas mediante PIM, muestran en sus curvas de intrusión-extrusión (Figura 2A), ligeras variaciones en el sistema poroso. El volumen de mercurio intruído en las muestras más alteradas (caolinizadas) es mayor que el de las muestras menos alteradas, lo que conlleva una mayor porosidad, 24,4 y 28,9% frente a un 15,9 y 13,8%. Por lo tanto, la caolinización tiene un papel fundamental en la generación de porosidad secundaria asociada a procesos de post-sedimentarios.

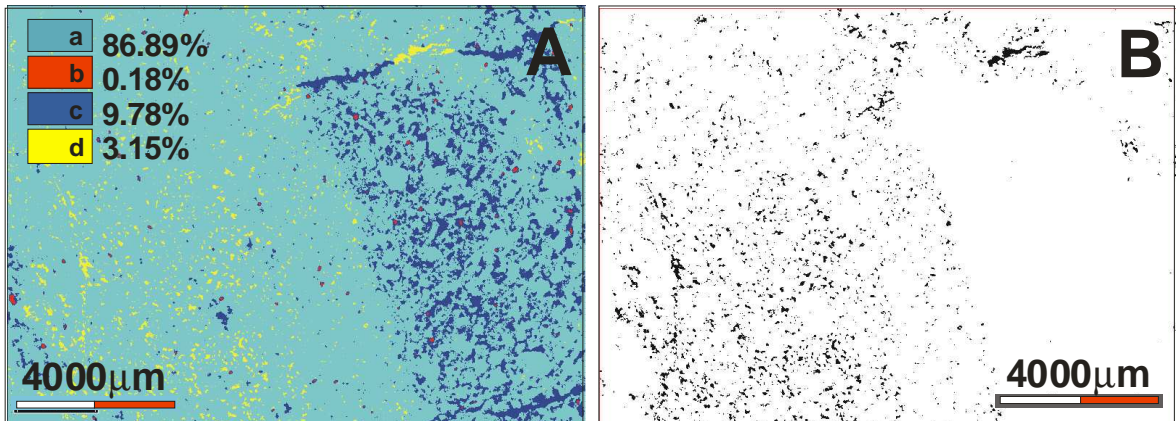


**Figura 2.** (A): Curvas de intrusión–extrusión de mercurio para las areniscas de Utrillas muestreadas a diferentes profundidades en el sondeo SD-1 (Tejada – Burgos). (B): Curvas de distribución de tamaños de poros para las mismas muestras. Se indica el tamaño de poro que según la clasificación de la IUPAC determina la separación entre macro y mesoporosidad.

La PIM también nos da información sobre la relación entre el área total de poros y el diámetro medio de éstos. En el caso de las muestras menos alteradas (25,40 y 35,40m) esta relación es mayor, lo que indica que el sistema poroso está formado por una red con un gran número de poros de pequeño tamaño.

En la figura 2B se muestra la distribución de tamaños de poros y de nuevo vemos claras diferencias entre las muestras caolinizadas y las menos alteradas. Según la clasificación de la IUPAC las cuatro son muestras macroporosas, pero vemos como las muestras más caolinizadas presentan un máximo de tamaño de radio de poro mayor. La única muestra con un porcentaje representativo de mesoporos es la de 25,40m.

De las areniscas muestreadas del sondeo SD-1 se ha seleccionado la de 35,40m de profundidad debido a su representatividad geológica y cohesión para completar el estudio de la porosidad con las imágenes de la microTC.

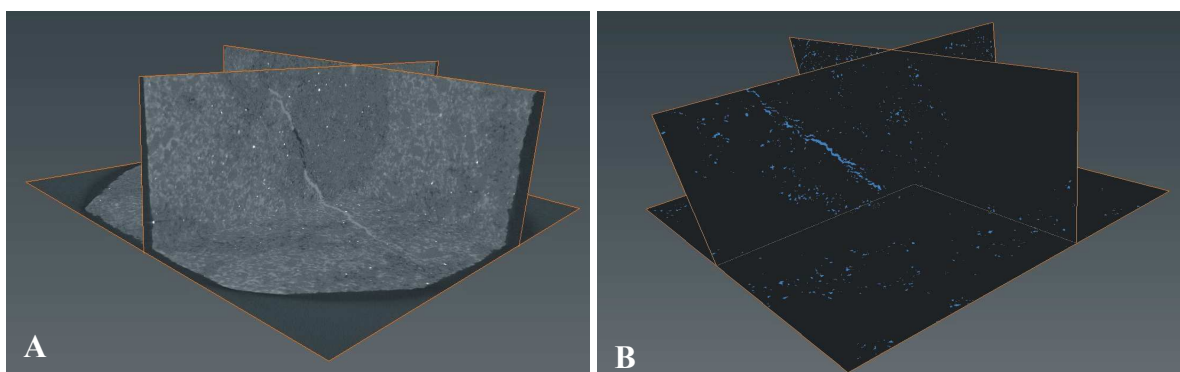


**Figura 3.** (A): Imagen segmentada mediante la aplicación de umbrales para la detección de fases. (B): Imagen binaria de los poros aislados.

Las imágenes de la microTC fueron optimizadas y filtradas con el software ImageJ y posteriormente fueron segmentadas para diferenciar las distintas fases que componen la muestra. En la figura 3A se muestra el resultado de la segmentación de una de las imágenes y vemos como se ha conseguido identificar cuatro fases distintas.

Los porcentajes asignados a cada fase mediante esta segmentación son: un 86,89% para la suma de cuarzo y feldespato potásico, un 0,18% para las micas, fragmentos de rocas metamórficas y otros minerales de alta densidad, un 9,78% para cementos calcícos-dolomíticos, como el que se observa relleno de las fisuras, y finalmente un 3,15% para los poros o huecos.

La segmentación se extendió a las 639 imágenes y posteriormente se realizó el apilamiento de estas 639 imágenes con el software Avizo Fire. Como resultado se han obtenido los volúmenes que se presentan en la figura 4A y 4B.



**Figura 4.** Reconstrucción 3D a partir de las 639 imágenes obtenidas en la microTC. (A) Volumen en escala de grises y (B) volumen binarizado tras el proceso de la segmentación.

Gracias a la reconstrucción tridimensional podemos observar una distribución heterogénea de la porosidad dentro de la muestra. Esta variación en la porosidad probablemente está asociada a la presencia de cementos carbonáticos los que en principio, reducen significativamente la porosidad. Se han definido dos áreas de porosidad máxima y mínima. La porosidad calculada para cada zona es de 6,67% y de 0,37%, respectivamente. El valor de porosidad total media determinada a partir de la reconstrucción 3D es de 3,31% mientras que la obtenida en el análisis 2D era de 3,15%.

Del estudio realizado sobre la conectividad del sistema poroso se deduce que la porosidad conectada tridimensionalmente de la zona más porosa es del 4,73%, lo que constituye el 61,52% de la porosidad total de dicha zona.

#### **4. CONCLUSIONES**

Los datos aportados por la microTC unidos a los obtenidos por otras técnicas de exploración tradicional, como la PIM, son de gran valor para el estudio de la microestructura de distintos materiales geológicos y en este caso en particular, para la evaluación de estas facies como potencial roca almacén de CO<sub>2</sub>.

De acuerdo a los datos obtenidos por PIM se ha comprobado que tanto la facies más caolinizada, como la de grano fino, con porosidades comprendidas entre 28,90% y 13,86%, presentan una estructura de poros muy favorable para la inyección y retención de CO<sub>2</sub>, por su media-alta porosidad. El alto porcentaje de macroporosidad será fundamentalmente en el proceso de inyección ya que facilitará la movilidad del CO<sub>2</sub>. Por otra parte, la geometría de los poros con forma de cuello de botella facilitará el atrapamiento del gas en estado supercrítico dentro de la formación almacén.

Las imágenes 2D de la microTC han servido junto con la microscopía óptica para establecer los umbrales en el proceso de segmentación de las imágenes que representan los CT. Como objetivo principal de este estudio, se han segmentado los poros del resto de la fase sólida, por sus bajos o nulos CT. Se deduce en el estudio en 2D una porosidad del 3,15% y se muestra su alta correlación con los resultados obtenidos mediante PIM, teniendo en cuenta el rango de solape entre ambas técnicas (9 - 360µm). La contribución de los poros mayores de 9µm a la porosidad PIM es sólo del 3,01%, lo que se correlaciona totalmente con el 3,15% obtenido mediante la técnica microTC.

La ventaja que presenta la microTC frente otras técnicas como la PIM, es la posibilidad de visualizar la distribución espacial de los poros, su conectividad y orientación que son parámetros indicadores del comportamiento del flujo de un fluido en el medio poroso y además imprescindibles para la evaluación de la formación almacén. Estos parámetros se han abordado en el análisis 3D.

La conectividad máxima de poros, en la zona de mayor porosidad es de un 61,52%, con poros con clara tendencia esférica. No se ha constatado orientaciones preferentes de poros, aunque si ha sido posible identificar una fractura, parcialmente cementada, que atraviesa el sólido. Identificar y determinar las características de fisuras o discontinuidades puntuales en la roca, se abordará en próximos trabajos, ya que son estas características las que van a condicionar en gran medida el flujo de fluidos.

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

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido realizado al amparo del Proyecto de I+D+i (CGL2011-24768) del Plan Nacional del Ministerio de Competitividad y Economía. Al Dr. Sket del IMDEA-Materiales su colaboración en la determinación y reconstrucción de las imágenes de la microTC.

## BIBLIOGRAFÍA

- Avizo Fire. 3D Analysis Software for Materials Science. Visualization Sciences Group. Disponible en: <http://vsg3d.com/avizo/fire>.
- Bachu, S., Gunther, W.D. y Perkins, E.H. (1994): Aquifer disposal of CO<sub>2</sub>: Hydrodynamic and mineral trapping. *Energy Conv. Manag.*, 35 (4): 269-279.
- Hounsfield, GN. (1972): A method of and apparatus for examination of a body by radiation such as X or Gamma Radiation. British Patent N°1.283.915, London.
- Juanes, R., Spiteri, E.J., Orr, F.M. Jr. y Blunt, M.J. (2006): Impact of relative permeability hysteresis on geological CO<sub>2</sub> storage. *Water Resour. Res.*, 42:W12418.
- Mao, L., Shi, P., Tu, H., An, L., Ju, Y. y Hao, N. (2012): Porosity analysis base don CT images of coal under uniaxial loading. *Advances in computed tomography* 1, 5-10.
- Pruess, K. y García, J. (2002): Multiphase flow dynamics during CO<sub>2</sub> disposal into saline aquifers. *Environ. Geol.*, 42 (2-3): 282-295.
- Rasband, W.S., ImageJ, U. S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA. Disponible en: <http://imagej.nih.gov/ij/>, 1997-2012.
- Romero, E. y Simms, P.H. (2008): Microstructure Investigation in Unsaturated Soils: A Review with Special Attention to Contribution of Mercury Intrusion Porosimetry and Environmental Scanning Electron Microscopy. *Geotechnical and Geological Engineering* 26 (6).
- 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<sub>2</sub>: Criterios de selección de emplazamientos. En: *CONAMA 2008*.
- Van Geet, M., Swennen, R., y Wevers, M. (2001): Towards 3D petrography: application of microfocuss computer tomography in geological science. *Computer & Geosciences*, 27, 1091-1099.
- Washburn, E.W. (1921): The dynamics of capillary flow. *Phys. Rev.*, 17: 273–283.