

La monitorización del CO₂ difuso superficial para evaluar la seguridad del almacenamiento de CO₂

The diffuse surficial CO₂ monitoring to assess the safety of a CO₂ deep geological storage

María del Carmen Clemente Jul¹, Julio Rodrigo Naharro², Luis Pérez del Villar³

¹ Académica Correspondiente. Real Academia de Doctores de España. carmen.clemente@upm.es

² Departamento de Medio Ambiente. CIEMAT. Madrid. julio.rodrigo@ciemat.es

³ Departamento de Medio Ambiente. CIEMAT. Madrid. l.pvillar@ciemat.es

An. Real. Acad. Doct. Vol 2, (2016) pp. 233-245.

RESUMEN	ABSTRACT
<p>En el marco de un proyecto de investigación sobre análogos naturales españoles de almacenamiento y escape de CO₂, se eligieron tres zonas de la cuenca terciaria de Gañuelas-Mazarrón (Murcia) para medir el flujo superficial difuso de CO₂, utilizando el método de la cámara de acumulo. La cuenca se caracteriza por la presencia de un acuífero profundo, termal (~ 47° C), salino, rico en CO₂, y atravesado por dos sondeos de exploración geotérmica. Los datos de flujo se trataron mediante un método gráfico-estadístico, Kriging y simulación Gaussiana secuencial. Los resultados sugieren que las margas de la cuenca actúan como un sello muy eficaz frente al CO₂ del acuífero, evitando su fuga a la superficie. Por tanto, el sistema estudiado puede considerarse un excelente ejemplo para garantizar, por analogía, la seguridad de un AGP-CO₂.</p>	<p>In the framework of a global investigation of the Spanish natural analogues of CO₂ storage and leakage, three selected sites from the Gañuelas-Mazarrón Tertiary Basin (Murcia) were studied for computing the diffuse soil CO₂ flux, using the accumulation chamber method. The Basin is characterised by the presence of a deep, thermal (~ 47°C), saline and CO₂-enriched aquifer that was intersected by two deep geothermal exploration wells. CO₂ flux data were processed by means of a graphical-statistical method, Kriging estimation and sequential Gaussian simulation methods. The results have allowed concluding that the Tertiary marly cap-rock of this aquifer acts as a very effective sealing, preventing any CO₂ leakage from this natural CO₂ storage, being therefore an excellent scenario to guarantee, by analogy, the safety of a CO₂-DGS.</p>
<p>Palabras clave: flujo difuso de CO₂; cámara de acúmulo; almacenamiento geológico profundo de CO₂; análogo natural; Cuenca Terciaria de Gañuelas-Mazarrón.</p>	<p>Keywords: diffuse CO₂; flux, accumulation chamber; CO₂ deep geological storage; natural analogue; Gañuelas-Mazarrón Tertiary Basin.</p>

1. INTRODUCCIÓN

El dióxido de carbono es un gas de efecto invernadero que existe naturalmente en la atmósfera. Las actividades antropogénicas, especialmente las relacionadas con la generación de energía a partir de combustibles fósiles, están aumentando la concentración de dicho gas en la atmósfera desde el inicio de la industrialización, a principios del siglo XIX (MACKENZIE *et al.*, 2001), hasta nuestros días. Una de las opciones más importantes para reducir las emisiones de CO₂ a la atmósfera, y por lo tanto amortiguar sus efectos sobre el cambio climático, es el desarrollo de las tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂ (CAC), que se han desarrollado principalmente para las grandes fuentes industriales de emisión, como son las centrales térmicas, cementeras, refinerías, industrias siderúrgicas y cerámicas, etc. El almacenamiento geológico profundo de CO₂ (AGP-CO₂) representa la última etapa de dichas tecnologías y, lo que es más importante, el método más aceptado internacionalmente para el secuestro del CO₂.

Entre las posibles formaciones para un AGP-CO₂, los acuíferos salinos profundos representan una de las opciones más adecuadas, especialmente en aquellos países en los que otras opciones de almacenamiento, como son los yacimientos de gas y/o petróleo agotados o casi agotados y/o las capas de carbón no explotables económicamente, no son viables. En España, la capacidad estimada para el AGP-CO₂ en acuíferos salinos profundos es de 45000 Mt, según datos del proyecto europeo *GeoCapacity* (ZAPATERO *et al.*, 2009).

Sin embargo, con el fin de predecir, lo más aproximadamente posible, el comportamiento a largo plazo de un AGP-CO₂ (> 1000 años), se requiere el estudio de los almacenamientos naturales de CO₂ o análogos naturales, ya que son herramientas útiles para entender el comportamiento del CO₂ a esa escala de tiempos y permiten obtener datos aplicables a un AGP-CO₂ en una formación geológica adecuada y predecir su evolución (PEARCE *et al.*, 2004).

La comunidad científica ha aceptado, generalmente, que la predicción del comportamiento, a largo plazo y en términos de seguridad, de un AGP de residuos industriales tóxicos (residuos radiactivos de alta actividad, gases industriales y residuos mineros) no puede realizarse satisfactoriamente sobre la base de las investigaciones realizadas, a corto plazo, en los laboratorios (PETIT, 1992). Por lo tanto, los países afectados por estos problemas han desarrollado métodos de investigación que incluyen tanto pruebas realizadas en el laboratorio, donde las variables están controladas, como el estudio de análogos naturales e industriales.

Aunque las investigaciones realizadas en sistemas naturales donde existen acumulaciones de CO₂ no están aún lo suficientemente desarrolladas, algunos autores (CZERNICHOWSKI-LAURIOL *et al.*, 1996) han realizado un inventario de los reservorios naturales de CO₂ a nivel mundial, así como de las reacciones experimentales entre el CO₂ y las rocas susceptibles de almacenarlo (PEARCE, ROCHELLE, 1999). Por otra parte, durante la última década se han realizado varios estudios centrados en la evaluación de la seguridad de un AGP-CO₂ mediante la investigación de análogos naturales de almacenamiento y escape de CO₂ (PRADO-PÉREZ, PÉREZ DEL VILLAR, 2011).

A este respecto, uno de los aspectos más importantes relacionados con la evaluación del comportamiento de un AGP-CO₂ en un acuífero salino profundo es aumentar el conocimiento sobre la interacción entre el CO₂ y las formaciones almacén y sello, así como la resistencia físico-mecánica de esta última. Como consecuencia de esta interacción, las mediciones de las tasas de fuga de CO₂ superficial constituyen una herramienta útil para evaluar: i) la eficiencia de dichos procesos de interacción; ii) la capacidad de la formación sello para retener el CO₂; y iii) los posibles efectos del CO₂ sobre el medio ambiente.

Por estas razones, este trabajo se ha enfocado en el estudio de la capacidad de retención de la formación sello, midiéndose para ello el flujo superficial difuso de CO₂ en una zona seleccionada por: i) la presencia de un acuífero salino profundo enriquecido en CO₂; ii) sus características geológico-estructurales; y iii) la naturaleza de la formación sello. Dicha zona es la cuenca terciaria de Gañuelas-Mazarrón, al sureste de la Península Ibérica, en las Zonas Internas de las Cordilleras Béticas (Figura 1).

El acuífero salino profundo enriquecido en CO₂ se aloja en los mármoles del Complejo Nevado-Filábride, situados en la base de la citada cuenca terciaria, y que fueron atravesados por dos sondeos realizados en la pasada década de los ochenta con fines geotérmicos, denominados El Alto de El Reventón y La Ermita de El Saladillo (RODRÍGUEZ-ESTRELLA, 2006). La formación sello está compuesta por margas miocenas (> 500 m de espesor), las cuales evitaron las fugas de CO₂ hasta que se perforaron pozos con fines agrícolas durante la pasada década de los sesenta y los citados sondeos geotérmicos. La sobreexplotación de los acuíferos más superficiales provocó su contaminación por el ascenso del CO₂ de origen profundo (CERÓN *et al.*, 1998).

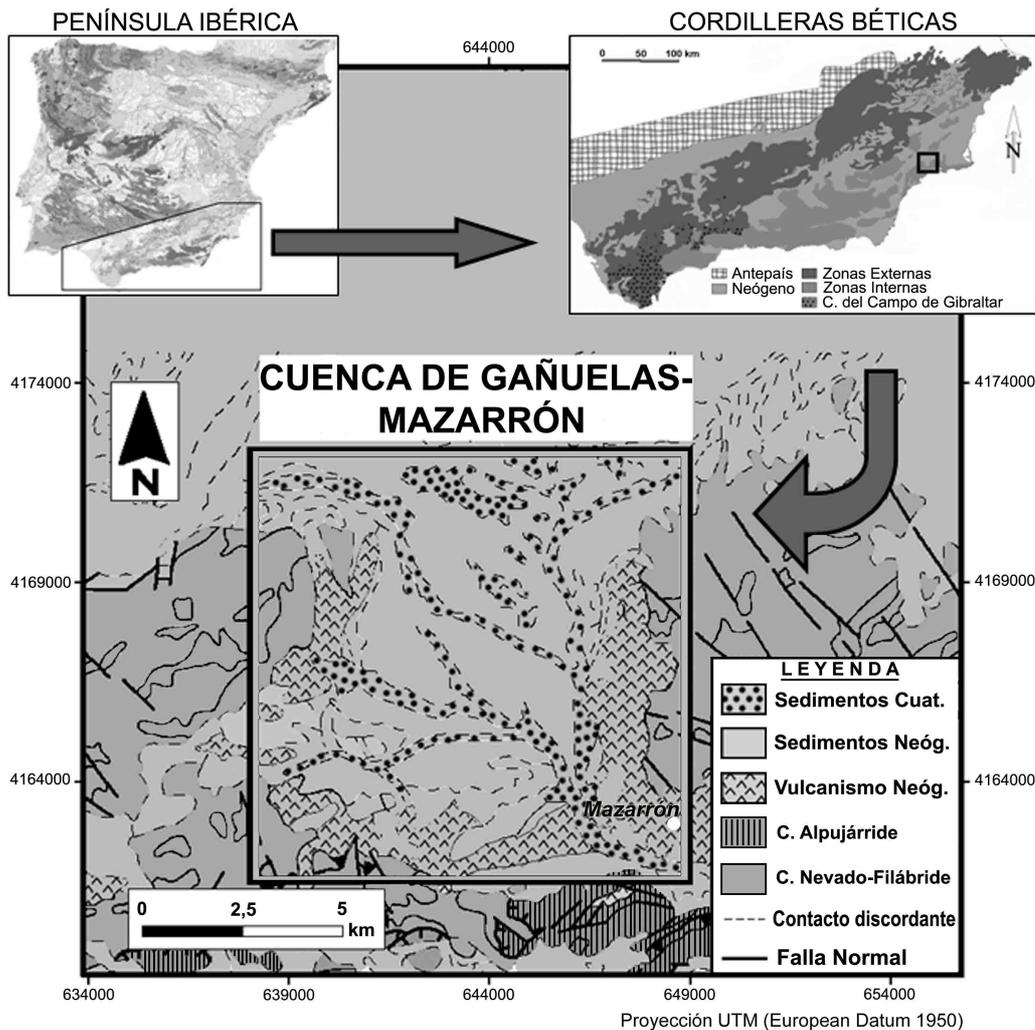


Figura 1. Mapa geológico esquemático de la cuenca terciaria de Gañuelas-Mazarrón.

Por lo tanto, aunque el CO_2 fue detectado después de la perforación de dichos sondeos, el objetivo principal de este trabajo ha sido detectar las posibles fugas difusas de CO_2 desde el acuífero salino profundo hasta la superficie, con el fin de: i) determinar si la formación margosa es capaz de actuar como un sello geológico de CO_2 de forma eficaz y eficiente; y ii) extrapolar los resultados, por analogía, para predecir, a largo plazo, el comportamiento de los materiales que forman el sello de un AGP- CO_2 .

2. MATERIAL Y MÉTODOS

El flujo difuso superficial de CO_2 se midió en sitios previamente seleccionados de acuerdo con sus características geológico-estructurales y, en particular, por su mayor densidad de intersecciones de lineamientos, ya que estos puntos actuarían, probablemente, como vías preferentes de escape del CO_2 profundo (PÉREZ DEL VILLAR, 2009). Para ello, se realizó un estudio previo de los lineamientos de la zona

(probables fracturas y/o fallas) sobre las ortofotografías del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) (Figura 2). El nombre de los sitios explorados, así como el número de medidas realizadas y la superficie explorada están recogidos en la Tabla 1. Todas las medidas se realizaron durante el mes de septiembre de 2009.

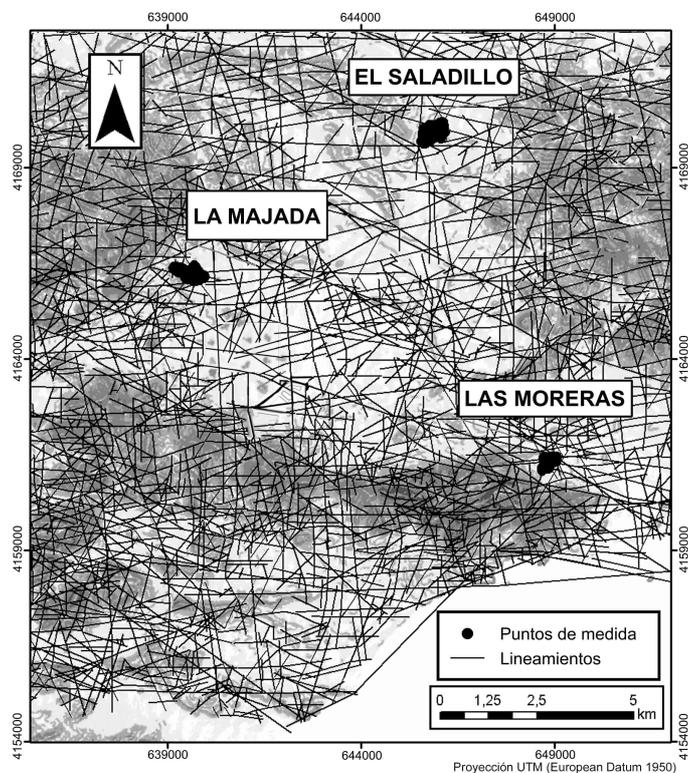


Figura 2. Localización de las áreas seleccionadas para la medida del flujo difuso superficial de CO₂. Nótese la alta densidad de intersecciones de lineamientos existente.

Sitios	Medidas	Superficie explorada (m ²)
Las Moreras	128	52700
La Majada	277	72800
El Saladillo	187	136000

Desde el punto de vista geológico, Las Moreras y La Majada están aproximadamente situados en el contacto entre los materiales terciarios de la cuenca de Gañuelas-Mazarrón y los materiales triásicos que bordean la misma, mientras que El Saladillo se sitúa en el borde norte de dicha cuenca (ver Figura 2). En este último sitio se perforó un sondeo profundo (535 m) en 1985 para la

exploración geotérmica de la zona, el cual cortó al acuífero salino profundo a una profundidad aproximada de 450 m. Este acuífero representa la única fuente de CO₂ libre y disuelto en la mencionada cuenca terciaria.

Las medidas de flujo de CO₂ se realizaron utilizando la cámara de acumulo (PARKINSON, 1981; KANEMASAU *et al.*, 1974), la cual se caracteriza fundamentalmente por su sensibilidad, bajo coste y operatividad rápida y sencilla. Aunque este método se empezó a utilizar con fines agrícolas (KANEMASAU *et al.*, 1974), en los últimos veinte años se ha venido aplicando sistemáticamente para medir el CO₂ difuso en ambientes volcánicos y geotérmicos (CHIODINI *et al.*, 1998). Además, este método puede aplicarse también para medir las emanaciones de gases en vertederos de residuos sólidos urbanos (CARDELLINI *et al.*, 2003). El equipo utilizado, comercializado por la compañía *West Systems*®, incluye: i) una cámara cilíndrica, de dimensiones conocidas, abierta por la parte inferior, por la que se pone en contacto con la superficie del suelo, y equipada con una pequeña hélice para mezclar los gases procedentes del mismo; ii) un espectrofotómetro infrarrojo (IR) equipado con el sensor de CO₂ LICOR Li-820; iii) un conversor analógico-digital (AD) que transforma la señal de salida del detector IR; y iv) un ordenador de bolsillo (PDA), con conexión inalámbrica (Figura 3). Para evitar el deterioro de la bomba y el detector de CO₂ por la humedad del suelo, se colocó Mg(ClO₄)₂, como desecante, entre el conector de salida de la cámara de acumulo y la entrada al tubo que se conecta con la bomba. Las medidas fueron tomadas durante períodos en los que el tiempo era seco y estable para evitar la influencia, sobre la medida, de las lluvias y la consiguiente humedad del suelo. Ambos factores afectan de manera importante al comportamiento geoquímico del CO₂, ya que éste se disuelve fácilmente en agua y, por lo tanto, los valores adquiridos serían inferiores a los reales.

El método de medida consiste en colocar, sobre la superficie del suelo, la cámara cilíndrica del equipo, permitiéndose así la acumulación de los gases emitidos por el suelo. Dichos gases, después de bombearse hacia el detector IR de CO₂, con un caudal aproximado de 20 mL s⁻¹, vuelven a la cámara, cerrándose así el circuito y evitándose, por lo tanto, posibles contaminaciones. Por último, la señal emitida por el IR se transforma, mediante el conversor AD, en una señal digital que se transmite directamente a la PDA, donde se observa, en tiempo real, la [CO₂] frente al tiempo. Por lo tanto, el flujo se obtiene midiendo el incremento de la [CO₂] como una función del tiempo, expresado en ppm s⁻¹, en volumen. Al objeto de convertir la concentración volumétrica en unidades de masa (g m⁻² día⁻¹ o mol m⁻² día⁻¹), se ha de tener en cuenta el volumen de la cámara, así como la presión atmosférica y la temperatura, ambas variables medidas durante el trabajo de campo (MAZOT, TARAN, 2009).

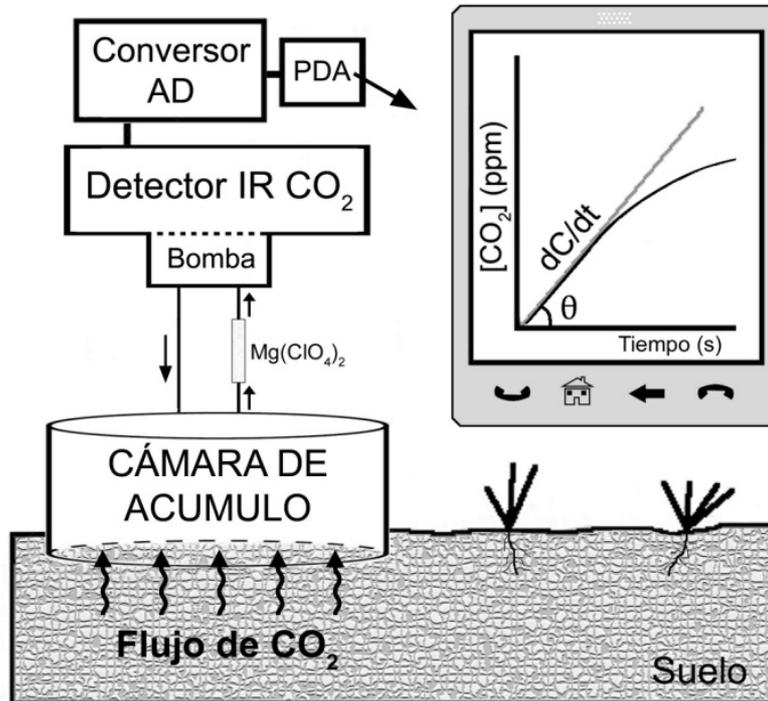


Figura 3. Representación esquemática del método de la cámara de acumulo utilizado para medir el flujo superficial difuso de CO₂.

El cálculo del flujo de salida de CO₂ se realizó mediante un análisis gráfico-estadístico (CHIODINI *et al.*, 1998), usando para ello los códigos SPSS y ORIGIN. Este método, ampliamente utilizado para el tratamiento de datos geoquímicos, consiste en la división de los valores de flujo de CO₂ en diferentes poblaciones log-normales, teniendo en cuenta los puntos de inflexión. En un gráfico logarítmico de probabilidad, una población log-normal está representada por una línea recta, mientras que una curva con un punto de inflexión describe la distribución teórica de dos poblaciones log-normales superpuestas. En general, la superposición de n poblaciones log-normales queda representada por una curva caracterizada por la existencia de $n-1$ puntos de inflexión (SINCLAIR, 1974). Por lo tanto, este método permite reconocer las diferentes poblaciones existentes en un conjunto de datos y, con ello, su proporción con respecto a su total. Los parámetros necesarios para calcular el flujo total de CO₂ de cada población fueron determinados mediante el método de Sichel (SICHEL, 1966). Estos parámetros incluyen los valores medios de flujo de las poblaciones y sus desviaciones típicas correspondientes. El flujo total de salida de CO₂ asociado a cada población se obtuvo multiplicando el área explorada de cada sitio, la proporción de cada población y el valor medio de flujo de CO₂. El valor del flujo de salida de CO₂ de cada área explorada se obtuvo sumando la contribución de cada población.

La representación gráfica de la distribución espacial del flujo de CO₂ se realizó utilizando los métodos geoestadísticos de estimación por Kriging y de simulación Gaussiana secuencial (sGs) (DEUTSCH, JOURNAL, 1998), utilizando los códigos ArcGIS y *Stanford Geostatistical Modeling Software* (SGeMS).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos obtenidos durante la campaña experimental fueron tratados, en primer lugar, por medio de un análisis estadístico a fin de obtener los estadísticos descriptivos básicos (Tabla 2). De dichos datos se infiere que flujos de CO₂ superiores a 1 mol m⁻² día⁻¹ sólo se midieron esporádicamente, siendo el paraje de La Majada donde se registraron los flujos más altos.

	Medidas	Media	Mínima	Máxima	Desviación típica
El Saladillo					
Flujo CO ₂ (mol m ⁻² día ⁻¹)	187	0,353	0,020	1,103	0,254
Flujo CO ₂ (g m ⁻² día ⁻¹)	187	15,53	0,887	48,541	11,188
Las Moreras					
Flujo CO ₂ (mol m ⁻² día ⁻¹)	128	0,261	0,008	0,929	0,195
Flujo CO ₂ (g m ⁻² día ⁻¹)	128	11,475	0,333	40,874	8,582
La Majada					
Flujo CO ₂ (mol m ⁻² día ⁻¹)	277	0,877	0,007	7,503	0,787
Flujo CO ₂ (g m ⁻² día ⁻¹)	277	38,584	0,322	330,149	34,635

Como los datos de flujo de CO₂ tienden a una distribución log-normal, los datos log-normales (ln) del flujo de CO₂ fueron tratados de acuerdo con el método de Sinclair (SINCLAIR, 1974). De esta manera, los gráficos logarítmicos de probabilidad permitieron identificar, mediante los puntos de inflexión, las diferentes poblaciones para cada área explorada. Así, para El Saladillo (Figura 4) y Las Moreras (Figura 5) se identificaron dos puntos de inflexión (-0,17 y -2,74; y -3,0 y -0,35, respectivamente), por lo que se reconocieron tres poblaciones en cada uno de los sitios. En cambio, en La Majada sólo se observó un punto de inflexión (-1,74) y, por lo tanto, dos poblaciones (Figura 6). Las poblaciones definidas por escasos datos, hecho observado en todas las áreas exploradas, se consideraron poco significativas en comparación con la población principal. Por consiguiente, la población con mayor número de datos se consideró como la principal, y su valor

medio como el flujo de fondo de CO₂ en cada área explorada. Los parámetros estadísticos de las poblaciones identificadas en cada área (Tabla 3) ha servido para calcular, mediante el estimador *t* de Sichel (M_i), el flujo total de CO₂ liberado hacia la atmósfera por esas áreas. Es decir, 2,017; 0,615; y 2,122 t de CO₂ día⁻¹ para El Saladillo, Las Moreras y La Majada, respectivamente.

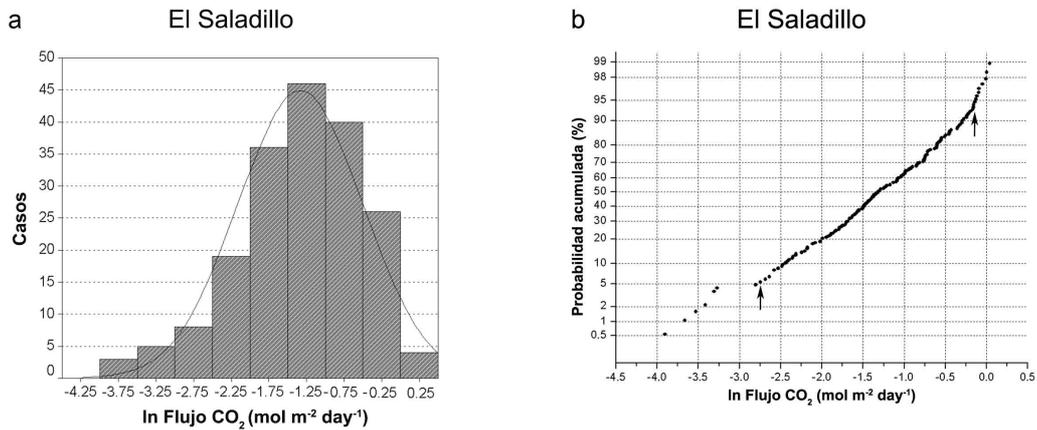


Figura 4. Histograma (a) y gráfico de probabilidad (b) del ln del flujo de CO₂, expresado en mol m⁻² día⁻¹, para el área de El Saladillo. Nótese la distribución Gaussiana de las medidas. Los puntos de inflexión se indican mediante flechas.

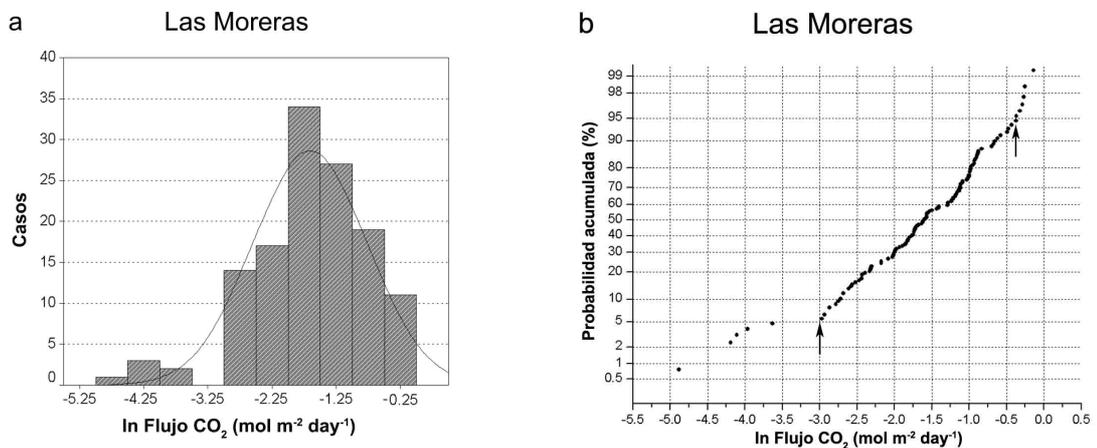


Figura 5. Histograma (a) y gráfico de probabilidad (b) del ln del flujo de CO₂, expresado en mol m⁻² día⁻¹, para el área de Las Moreras. Nótese la distribución Gaussiana de las medidas. Los puntos de inflexión se indican mediante flechas.

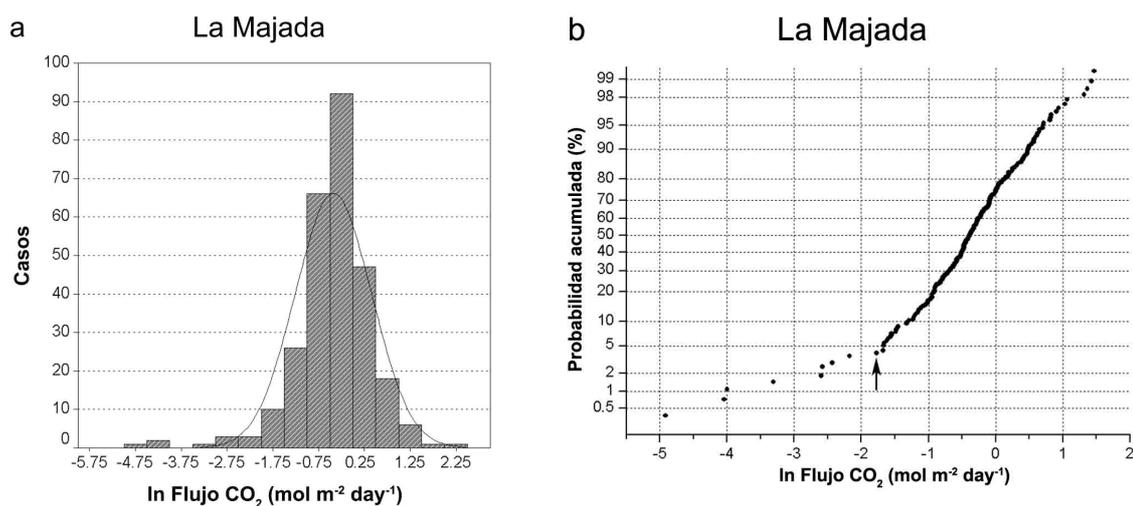


Figura 6. Histograma (a) y gráfico de probabilidad (b) del ln del flujo de CO₂, expresado en mol m⁻² día⁻¹, para el área de La Majada. Nótese la distribución Gaussiana de las medidas. Los puntos de inflexión se indican mediante flechas.

Tabla 3.
Parámetros estimados de las distintas poblaciones reconocidas en cada área y escape total de CO₂, de acuerdo con el método de Sinclair (SINCLAIR, 1974) y el estimador *t* de Sichel (SICHEL, 1966).

Área explorada (campaña)	Poblaciones de flujo de CO ₂	Medidas	Proporción (%)	Valor medio de flujo de CO ₂ (M_i) (mol m ⁻² día ⁻¹)	Flujo total de salida de CO ₂ (t día ⁻¹)	95% intervalo de confianza, desviación típica (t día ⁻¹)
El Saladillo (Sept. 2009)	1	10	5,3	0,036	0,012	0,029-0,007
	2	164	87,7	0,312	1,64	1,853-1,481
	3	13	7,0	0,876	0,365	0,373-0,361
	Total	187	100		2,017	2,255-1,849
Las Moreras (Sept. 2009)	1	6	4,7	0,017	0,002	0,003-0,001
	2	111	86,7	0,231	0,466	0,527-0,420
	3	11	8,6	0,737	0,147	0,161-0,139
	Total	128	100		0,615	0,691-0,560
La Majada (Sept. 2009)	1	9	3,2	0,011	0,001	0,006-0,001
	2	268	96,8	0,573	2,121	2,424-1,897
	Total	277	100		2,122	2,430-1,898

Al comparar estos datos con los de otros lugares de la Toscana (Italia), donde existen importantes respiraderos de CO₂, se puede señalar que el flujo de CO₂ en las

áreas exploradas es relativamente bajo y con unos valores similares a los que se detectan en suelos por su actividad biológica (PARKIN *et al.*, 1996), y que se han estimado en $\sim 5 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ para ambientes áridos (RAICH, SCHLESINGER, 1992). Sin embargo, el flujo menor de CO_2 estimado es el correspondiente al sitio de Las Moreras ($11,67 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), el cual es más del doble que el estimado para los suelos en zonas áridas. Esta diferencia puede explicarse teniendo en cuenta que la zona de estudio se encuentra bajo condiciones semiáridas y, por lo tanto, con desarrollo de cierta vegetación, así como con importante actividad agrícola.

4. CONCLUSIONES

La investigación realizada sobre el flujo superficial de CO_2 en determinados sitios de la cuenca terciaria de Gañuelas-Mazarrón sugiere que:

1. La formación margosa miocena parece actuar como un sello muy eficaz, ya que no permite el escape de CO_2 hacia la superficie. Es decir, en términos de flujo de CO_2 difuso, esta formación sedimentaria representaría una excelente barrera ante cualquier escape de CO_2 que se produjera desde un AGP- CO_2 emplazado en un medio geológico similar.

2. Los mapas generados a partir de la estimación por Kriging y/o de la simulación Gaussiana secuencial se pueden utilizar para representar la distribución espacial de flujo superficial de CO_2 , así como para cuantificar el CO_2 mediante la interpolación/extrapolación de los valores medidos. Esto es aplicable a cualquier cuenca sedimentaria que reúna unas características similares a las de Gañuelas-Mazarrón y, por lo tanto, susceptible de ser elegida para almacenar CO_2 de origen antropogénico.

3. Los sitios investigados presentan un fondo de CO_2 similar al registrado en zonas cultivadas. Sin embargo, algunas excepciones han sido detectadas, pero relacionadas con perturbaciones antropogénicas, como son los sondeos.

4. El acuífero salino profundo enriquecido en CO_2 , y cuyo sello estaría constituido por las margas miocenas, representa un excelente análogo natural del cual se pueden obtener datos válidos para predecir el comportamiento, a largo plazo, de un AGP- CO_2 , siempre y cuando el sitio elegido para inyectar CO_2 presente características geológicas similares y no se encuentre perturbado, como es el caso de la cuenca terciaria de Gañuelas-Mazarrón.

BIBLIOGRAFÍA

CARDELLINI, C.; CHIODINI, G.; FRONDINI, F.; GRANIERI, D.; LEWICKI, J. & PERUZZI, L. (2003). Accumulation chamber measurements of methane fluxes: application to volcanic-geothermal areas and landfills. *Appl. Geochem.*, 18, 45-54.

CERÓN, J.C.; MARTÍN-VALLEJO, M.; GARCÍA-ROSSELL, L. (1998). Geoquímica de las aguas termales con CO₂ del SE de las Cordilleras Béticas. *Estudios Geol.*, 54, 199-207.

CHIODINI, G.; CIONI, R.; GUIDI, M.; RACO, B. & MARINI, L. (1998). Soil CO₂ flux measurements in volcanic and geothermal areas. *Appl. Geochem.* 13, 543-52.

CZERNICHOWSKI-LAURIOL, I.; SANJUAN, B.; ROCHELLE, C.; BATEMAN, K.; PEARCE, J. & BLACKWELL, P. (1996). The underground disposal of carbon dioxide. En: S. Holloway (ed.) *Inorganic Geochemistry*. Final report of Joule II project N CT 92-0031.

DEUTSCH, C.V. & JOURNEL, A.G. (1998). *GSLIB: Geostatistical Software Library and Users guide*. (2nd ed.) New York: Oxford Univ. Press.

KANEMASU, E.T.; POWER, W.L. & SII, J.W. (1974). Field chamber measurements of CO₂ flux from soil surface. *Soil Sci.*, 118, 233-37.

MACKENZIE, F.T.; LERMAN, A. & VER, L.M. (2001). Recent past and future of the global carbon cycle. En: L.C. Gerhard, W.E. Harrison & B.M. Hanson (eds.) *Geologic Perspectives of Global Climate Change*, 51-82.

MAZOT, A. & TARAN, Y. (2009). CO₂ flux from the volcanic lake of El Chichón (Mexico). *Geofísica Internacional*, 48, 73-83.

PARKIN, T.B., DORAN, J.W.; FRANCO-VIZCAINO, E. (1996). Field and laboratory tests of soil respiration. En: J.W. Doran & A.J. Jones (eds.) *Methods for assessing soil quality*, 231-245. Madison [WIS]: Soil Science Society of America.

PARKINSON, K. (1981). An improved method for measuring soil respiration in the field. *J. Appl. Ecol.*, 18, 221-228.

PEARCE, J.; CZERNICHOWSKI-LAURIOL, I.; LOMBARDI, S.; BRUNE, S.; NADOR, A.; BAKER, J.; PAUWELS, H.; HATZIYANNIS, G.; BEAUBIEN, S. & FABER, E. (2004). A review of natural CO₂ accumulations in Europe as analogues for geological sequestration. *Geol. Soc., London, Spec. Pub.*, 233, 29-41.

PEARCE, J.M. & ROCHELLE, C. (1999). CO₂ storage: mineral reactions and their influences on reservoir permeability. En: P. Riemer; B. Eliasson & A. Wokaun (eds.) *Greenhouse Gas Control Technologies*, 1087 pp. Amsterdam: Elsevier.

PÉREZ DEL VILLAR, L. (2009). *Memoria Científico-Técnica del periodo 2008-2009 del PSE-120000-2008-6 (PSS-120000-2008-31). Línea de Análogos Naturales: resultados preliminares del estudio de los análogos naturales estudiados en: la región de La Selva (Girona), Valle del Alto Guadalentín (Murcia-Almería), Alicún de las Torres (Granada), Alhama de Aragón-Jaraba (Zaragoza) y Castilla León*, 550 pp. Madrid.

PETIT, J.C. (1992). Reasoning by analogy: rational foundation of natural analogue studies. *Appl. Geochem.*, 7 (1), 9-12.

PRADO-PÉREZ A.J. & PÉREZ DEL VILLAR, L. (2011). Dedolomitization as an analogue process for assessing the long-term behaviour of a CO₂ deep geological storage: the Alicún de las Torres thermal system (Betic Cordillera, Spain). *Chem. Geol.*, 289, 98-113.

RAICH, J.W. & SCHLESINGER, W.H. (1992). The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*, 44B, 81-99.

RODRÍGUEZ-ESTRELLA, T. (2006). Hidrogeología de la Región de Murcia. En: C. Conesa (ed.) *El Medio físico de la Región de Murcia*, 81-143. Murcia: Universidad de Murcia.

SICHEL, H.S. (1966). The estimation of means and associated confidence limits for small samples from lognormal populations. En: *Symposium on mathematical statistics and computer applications in ore valuation. South African Institute of Mining and Metallurgy*, 106-122. Johannesburg: Associated Scientific and Technical Societies of South Africa.

SINCLAIR, A.J. (1974). Selection of threshold values in geochemical data using probability graphs. *J. Geochem. Expl.*, 3, 129-149.

ZAPATERO, M.A.; SUAREZ, I.; ARENILLAS, A.; MARINA, M.; CATALINA, R. & MARTINEZ, R. (2009). *Proyecto Europeo GeoCapacity: assessing european capacity for geological storage of carbon dioxide. Final report*. Disponible en: <http://www.geology.cz/geocapacity>. Fecha de consulta: 13/11/2015.