

¿Qué significa el Almacenamiento Geológico de CO₂?

Un uso responsable
de los combustibles fósiles

Eliminar la principal
fuente de gases
de efecto invernadero

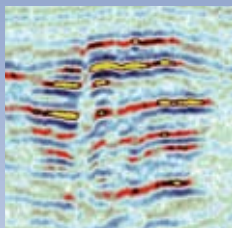
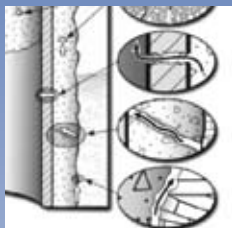
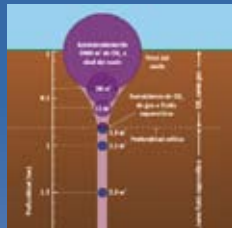
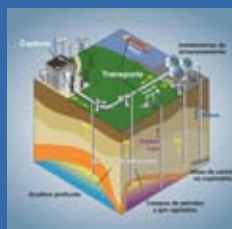
El retorno del CO₂
al subsuelo

Proporcionarnos el tiempo suficiente
para desarrollar fuentes de energía
respetuosas con el medio ambiente





Índice

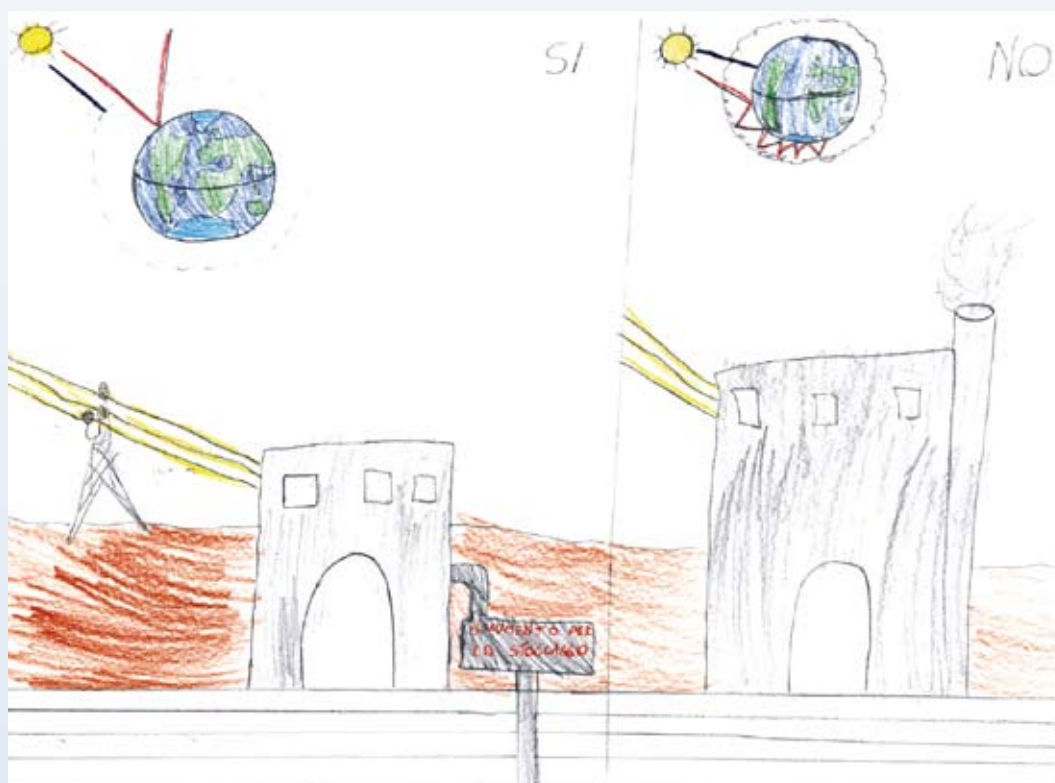


El cambio climático y la necesidad del almacenamiento geológico de CO₂	4
1. ¿Dónde y cuánto CO₂ podemos almacenar en el subsuelo?	6
2. ¿Cómo podemos transportar e inyectar grandes cantidades de CO₂?	8
3. ¿Qué sucede con el CO₂ una vez que está almacenado?	10
4. ¿Podría el CO₂ fugarse de su almacén y, si fuese así, cuáles serían las consecuencias?	12
5. ¿Cómo podemos monitorizar el almacén en profundidad y en superficie?	14
6. ¿Qué criterios de seguridad deben imponerse y respetarse?	16
Glosario	18
¿Qué puede hacer CO₂GeoNet por ti?	19

Este folleto ha sido producido gracias a la contribución de:
Rob Arts, Stanley Beaubien, Tjirk Benedictus, Isabelle Czernichowski-Lauriol, Hubert Fabriol, Marie Gastine, Ozgur Gundogan, Gary Kirby, Salvatore Lombardi, Franz May, Jonathan Pearce, Sergio Persoglia, Gijs Remmelts, Nick Riley, Mehran Sohrabi, Rowena Stead, Samuela Vercelli, Olga Vizika-Kavvadias.

Una visión del futuro

No más chimeneas de humo
Una tubería transporta el CO₂ y lo mete en la tierra
Esto es bueno para la Tierra



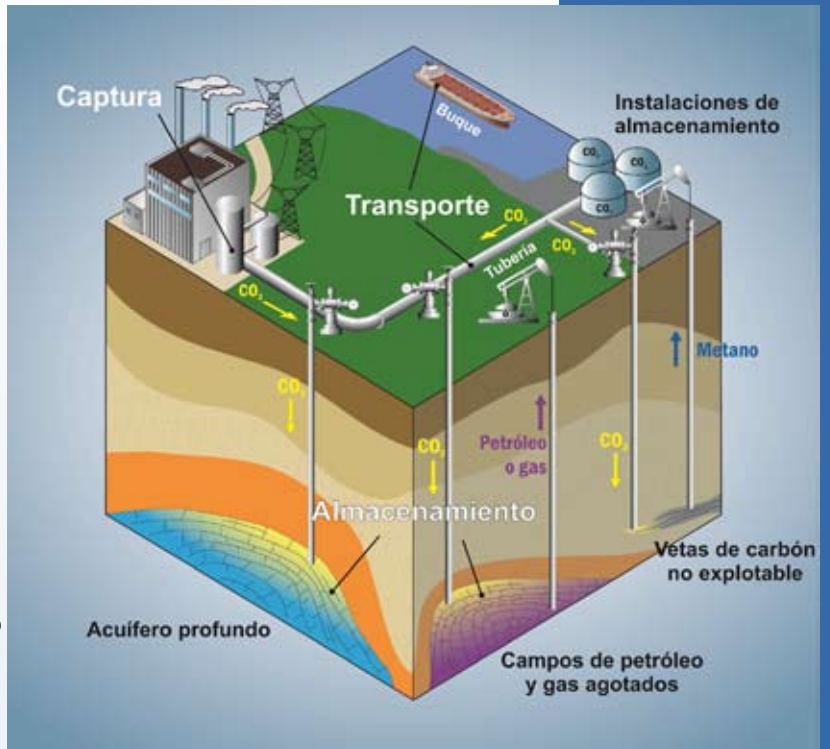
Massimo, 10 años, Roma - Italia

Para nuestros niños el almacenamiento geológico de CO₂ es algo bueno

Captura y almacenamiento de CO₂: un recurso prometedor

Entre las medidas que es necesario tomar urgentemente para mitigar el cambio climático y la acidificación de los océanos, la captura y almacenamiento de CO₂ (CAC*) puede jugar un papel decisivo, ya que podría contribuir al 33% de la reducción de CO₂ necesaria para 2050. La CAC implica capturar el CO₂ en las plantas de producción de energía de gas o carbón e instalaciones industriales (aceleradoras, cementeras, refineras, etc.), transportarlo vía gasoducto o barco hacia el lugar de almacenamiento e inyectarlo mediante un pozo* de inyección en una formación adecuada para su almacenamiento a largo plazo (Fig. 3). En vista del aumento de población mundial y el consecuente aumento de la demanda de energía en vías de desarrollo así como la falta actual de alternativas adecuadas para la producción a gran escala de energía, la utilización de los combustibles fósiles resulta inevitable a corto plazo. La CAC, sin embargo, ofrece la posibilidad de progresar y abrir puertas a un mundo basado en la producción de energía renovable.

© BRGM im@ge



El desarrollo mundial de la CAC está en expansión

Desde los años 90 se están desarrollando programas de investigación a gran escala en CAC en Europa, Estados Unidos, Canadá, Australia y Japón. Se ha adquirido un amplio conocimiento en las primeras instalaciones a gran escala del mundo en las que el CO₂ se ha inyectado en profundidad durante varios años: Sleipner, Noruega (aproximadamente 1 Mt/año desde 1996) (Fig. 4), Weyburn, Canadá (1,8 Mt/año desde 2000), e In Salah, Argelia (1 Mt/año desde 2004). La colaboración internacional en investigación en almacenamiento geológico de CO₂, facilitada por la IEA-GHG* y CSLF*, en estos y otros lugares ha sido particularmente importante a la hora de ampliar nuestro conocimiento y desarrollar una comunidad científica mundial que aborde este asunto. El informe especial del IPCC* sobre captura y almacenamiento de CO₂ (2005) que describe el estado actual de conocimiento y los obstáculos que deben superarse para permitir la difusión del desarrollo de esta tecnología, es un buen ejemplo. Ya existen conocimientos técnicos sólidos y el mundo está evolucionando hacia la fase de demostración. Además, el desarrollo de marcos técnicos, legislativos, regulatorios económicos y políticos están ya tomando forma y se están evaluando el apoyo y la percepción social. En Europa el objetivo es tener 12 proyectos de demostración a gran escala funcionando para 2015 que permitan un despliegue comercial en 2020. Con este propósito, en enero de 2008 la Comisión Europea publicó el "Paquete de medidas sobre cambio climático y energía limpia" que propone una directiva en almacenamiento geológico y otras medidas para promover el desarrollo y uso seguro de la CAC.

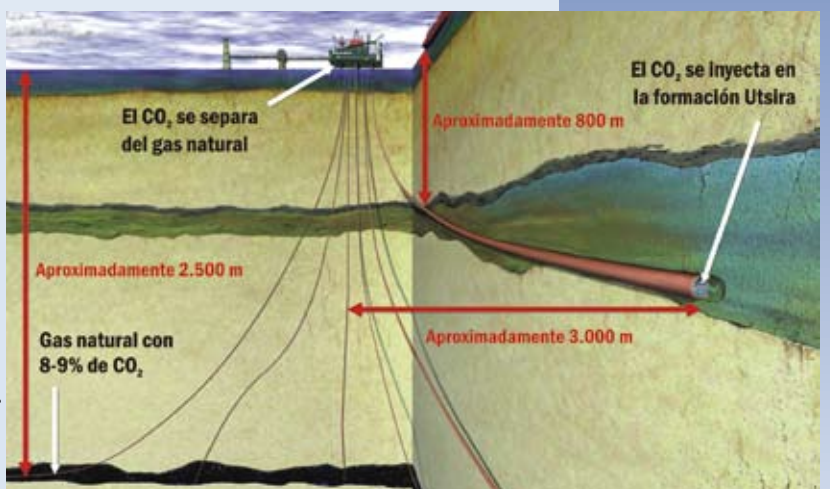
© StatoilHydro

Cuestiones clave en almacenamiento geológico de CO₂

La Red de Excelencia Europea CO₂GeoNet fue creada bajo el amparo de la Unión Europea como un grupo de instituciones de investigación capaces de mantener a Europa al frente de la investigación internacional a gran escala. Uno de los objetivos es la comunicación científica clara en aspectos técnicos de almacenamiento geológico. Para potenciar el diálogo en los aspectos esenciales de esta tecnología de vital importancia, los investigadores en tecnología de CO₂GeoNet han preparado respuestas básicas a varias preguntas frecuentes. En las siguientes páginas usted encontrará explicaciones sobre cómo puede llevarse a cabo el almacenamiento geológico de CO₂, bajo qué circunstancias es posible y qué criterios se utilizan para su aplicación segura.

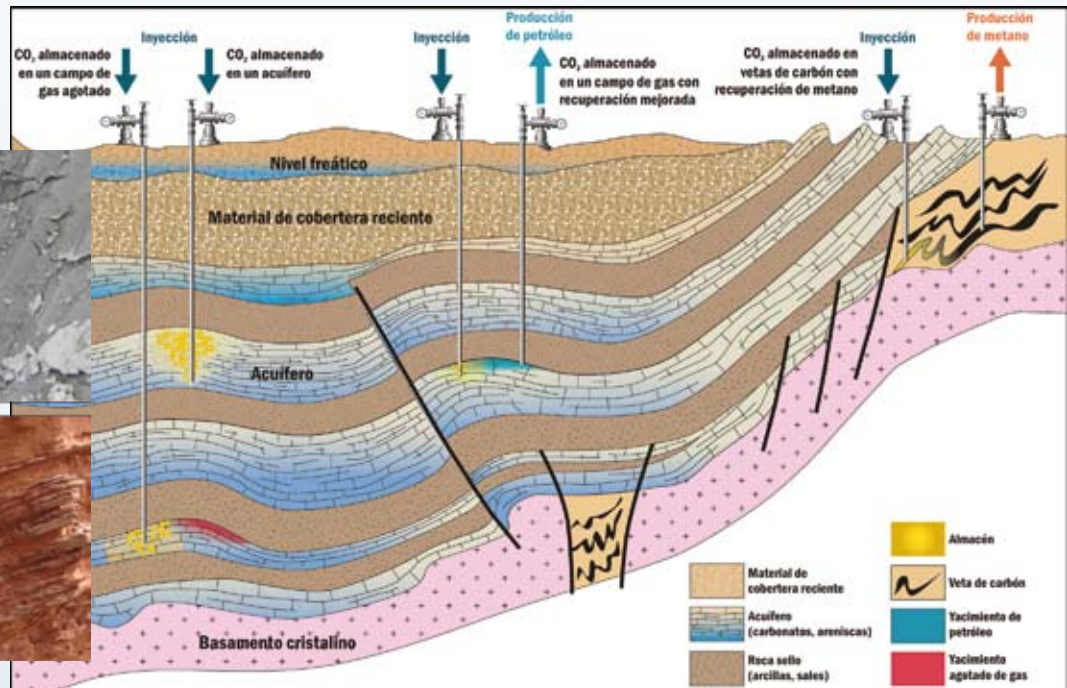
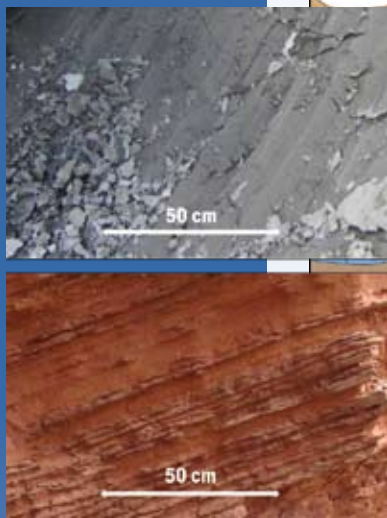
Figura 3
El CO₂ es capturado en las plantas de producción al separarlo del resto de gases. A continuación se comprime y se transporta por tuberías o buques al lugar de almacenamiento: acuíferos salinos profundos, yacimientos agotados de petróleo y gas, capas de carbón no explotables.

Figura 4
Sección vertical del emplazamiento de Sleipner, Noruega. El gas natural extraído a una profundidad de 2500 m, contiene un porcentaje de CO₂. En vez de liberarlo a la atmósfera, el CO₂ capturado se inyecta aproximadamente a 1000 m en el acuífero* arenoso de Utsira.



¿Dónde y cuánto CO₂ podemos almacenar en el subsuelo?

El CO₂ no puede inyectarse en cualquier sitio, primero hay que identificar las rocas almacén adecuadas. Existen emplazamientos potenciales para almacenamiento geológico de CO₂ en todo el mundo que ofrecen una capacidad suficiente para contribuir significativamente a mitigar el cambio climático ocasionado por el hombre.



© BRGM im@ggé

Figura 1
El CO₂ se inyecta en las capas geológicas profundas de rocas porosas y permeables (areniscas en posición inferior en la cuenca), cubierta por rocas impermeables (arcillas en posición superior) que evitan que el CO₂ se escape a la superficie. Las principales opciones de almacenaje incluyen: 1. Yacimientos agotados de gas/petróleo con posibilidad de recuperación. 2. Acuíferos profundos de agua salada no apta para el consumo humano. 3. Vetas profundas de carbón no explotables con posible recuperación de metano.

Existen 3 opciones principales de almacenamiento de CO₂ (Fig. 1):

1. Yacimientos agotados de petróleo y gas natural – bien conocidos debido a la exploración y explotación de hidrocarburos que ofrecen oportunidades inmediatas para el almacenamiento de CO₂.
2. Acuíferos salinos – ofrecen un gran potencial de almacenamiento pero no se conocen tan bien como los anteriores.
3. Capas de carbón no explotables – una opción para el futuro, una vez que se haya solucionado el problema de cómo inyectar grandes volúmenes de CO₂ en carbón de baja permeabilidad*.

Las rocas almacén

Una vez inyectado en el subsuelo en una roca almacén* adecuada, el CO₂ se acumula en los poros existentes entre los granos y en las fracturas, desplazando y reemplazando cualquier fluido existente, como gas, agua o petróleo. Las rocas almacén más adecuadas deben tener una alta porosidad* y permeabilidad. Estas formaciones rocosas, resultado de la acumulación de sedimentos en el pasado geológico, están normalmente localizadas en cuencas sedimentarias. En algunos casos, estas formaciones permeables alternan con rocas impermeables, las cuales pueden actuar como un sello estanco.

Las cuencas sedimentarias a menudo albergan yacimientos de hidrocarburos y yacimientos naturales de CO₂, lo cual prueba su habilidad para retener fluidos durante largos periodos de tiempo, como petróleo, gas e incluso CO₂ puro durante millones de años.

En las ilustraciones, el subsuelo se considera a menudo como una estructura simplificada en capas homogéneas donde se muestran las opciones geológicas para el almacenamiento de CO₂. En realidad, a pesar de estar compuesto por rocas desigualmente distribuidas y localmente fracturadas, las formaciones almacén y sello forman estructuras complejas y heterogéneas. Es necesario tener un conocimiento en profundidad del emplazamiento y experiencia geocientífica para evaluar si las estructuras propuestas para el almacenamiento a largo plazo son apropiadas o no. Los almacenes potenciales de CO₂ deben cumplir muchos criterios siendo los más esenciales:

- porosidad, permeabilidad y capacidad de almacenamiento suficientes;
- la presencia de roca impermeable en la parte superior – roca sello* (argillitas, margas, sal, etc.) que previenen la migración CO₂ hacia arriba;
- la presencia de estructuras de entrapamiento – como rocas sello con forma de domo que puedan controlar la expansión de la pluma de CO₂* en la formación almacén;

- emplazamiento a más de 800 metros de profundidad donde las presiones y temperaturas son lo suficientemente altas como para permitir el almacenamiento de CO₂ como una fase fluida comprimida y así maximizar la cantidad almacenada;
- ausencia de agua potable. El CO₂ no se inyectará en aguas aptas para el consumo o actividades humanas.

Dónde encontrar emplazamientos adecuados para el almacenamiento en Europa

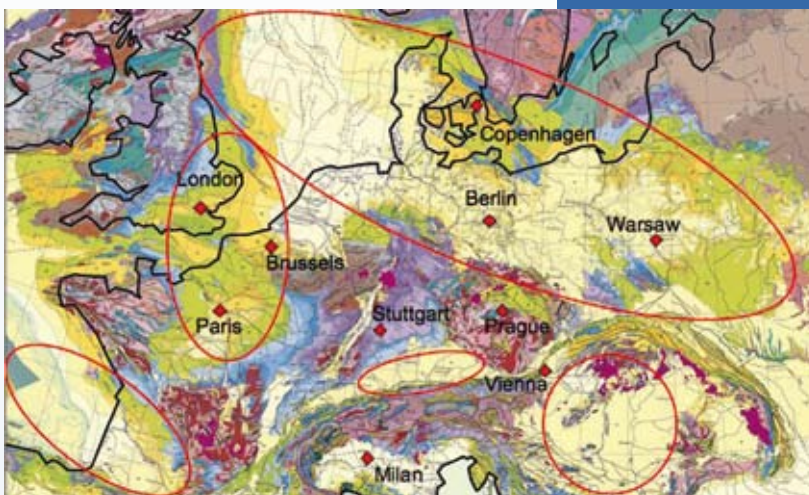
Hay cuencas sedimentarias distribuidas por toda Europa; submarinas, en el Mar del Norte o en tierra, en la cordillera Alpina (Fig. 2). Muchas de estas formaciones cumplen con los criterios necesarios para el almacenamiento geológico y están siendo cartografiadas y caracterizadas. Otras áreas europeas se componen de antiguas cortezas, como en Escandinavia, que no albergan rocas adecuadas para el almacenamiento geológico de CO₂.

Una de las zonas potencialmente aptas es la Cuenca Pérmica del Sur, que se extiende desde Inglaterra a Polonia (representada en la figura 2 por la elipse de mayor tamaño). Los sedimentos han sido afectados por procesos geológicos que dejan parte del espacio poroso relleno de agua salina, petróleo o gas natural. Las capas de arcilla compactas que existen entre las formaciones de areniscas porosas forman estratos de baja permeabilidad que impiden el ascenso del fluido. Muchas de las formaciones de areniscas están ubicadas entre 1 y 4 km de profundidad, donde la presión es lo suficientemente alta para almacenar el CO₂ como una fase densa. A esa profundidad, el contenido en sal en las aguas de la formación va desde unos 100 g/l hasta 400 g/l, mucho mayor que el del agua marina (35 g/l). Los movimientos en la cuenca han causado deformación plástica de la sal creando estructuras en domo que han atrapado el gas natural. Estas trampas están siendo estudiadas como posibles lugares de almacenamiento y proyectos piloto.

Capacidad de Almacenamiento

Las autoridades legislativas y políticas deben conocer la capacidad de almacenamiento de CO₂. Las estimaciones normalmente son bastante precisas y están basadas en la escala considerada. A escala nacional suelen ser más groseras, mientras que a escala de la cuenca o del almacén son más precisas.

Capacidad volumétrica: las capacidades de almacenamiento nacionales publicadas, se basan normalmente en cálculos del volumen de poro de las formaciones. En teoría, la capacidad de una formación puede calcularse multiplicando su área por su espesor, su porosidad media y la densidad media de CO₂ a las condiciones del almacén, sin embargo, debido a que el espacio poroso está ya ocupado por agua, sólo una pequeña parte puede



utilizarse para el almacenamiento y por lo general se asume que es de un 1 a un 3%. Este coeficiente de capacidad se aplica para evaluar la capacidad volumétrica.

Capacidad real: se pueden realizar cálculos más realistas en los lugares de almacenamiento mediante investigaciones más detalladas, ya que las propiedades del reservorio pueden variar a corta distancia. El conocimiento del tamaño, forma y propiedades geológicas de las estructuras permite reducir las incógnitas en los cálculos de volumen. Basándose en esta información, las simulaciones por ordenador pueden usarse para predecir el comportamiento de la inyección de CO₂ y su movimiento con el fin de estimar una capacidad de almacenamiento realista.

Capacidad viable: en los cálculos de capacidad deben tenerse también en cuenta los factores socioeconómicos. Transportar el CO₂ desde la fuente al almacén va a estar condicionado por unos costes de transporte. La capacidad va a depender también de la pureza del CO₂, ya que la presencia de otros gases reducirá el volumen disponible para el CO₂. Finalmente, las decisiones políticas y la aceptación pública tendrán la última palabra, así como la explotación o no de la capacidad disponible.

En conclusión, se sabe que la capacidad para almacenamiento geológico de CO₂ en Europa, es alta, aunque existen incertidumbres relacionadas con la heterogeneidad de los almacenes y los factores socioeconómicos. El proyecto de la UE, GESTCO* estimó la capacidad de almacenamiento geológico en yacimientos de hidrocarburos en el Mar del Norte y alrededores en 37 Gt, lo cual permitiría a grandes instalaciones en esta región inyectar CO₂ en esta zona durante varias décadas. La puesta al día y la posterior cartografía de capacidades de almacenamiento en Europa será materia para futuras investigaciones en cada uno de los estados miembros y, a través del proyecto UE Geocapacity*, para Europa a largo plazo.

Figura 2
Mapa Geológico de Europa mostrando la localización de las principales cuencas sedimentarias (elipses rojas) con potenciales almacenes de CO₂ (basado en el Mapa Geológico de Europa 1:5.000.000)





¿Cómo podemos transportar e inyectar grandes cantidades de CO₂?

Tras su captura en las instalaciones industriales, el CO₂ se comprime, transporta e inyecta en la formación almacén a través de uno o varios pozos. La cadena global debe ser optimizada para permitir el almacenamiento de varios millones de toneladas de CO₂ al año.

Compresión

Una vez separado el CO₂ del resto de gases de combustión de la chimenea en una planta energética o una instalación industrial, éste se comprime hasta un estado de fluido denso que ocupa mucho menos espacio que un gas. El CO₂ resultante, altamente concentrado, se deshidrata y se comprime haciendo el transporte y el almacenamiento más eficiente (**Fig. 1**). La deshidratación es necesaria para evitar la corrosión del equipo y la infraestructura y la formación de hidratos a alta presión (cristales sólidos similares al hielo que pueden obstruir el equipo y las tuberías). La compresión se lleva a cabo junto con la deshidratación mediante un proceso multi-etapa: ciclos repetidos de compresión, enfriamiento y separación de agua. La presión, temperatura y contenido en agua, son parámetros que deben ser adaptados al modo de transporte y a los requerimientos de presión en el lugar de almacenamiento. Los factores clave para el diseño de la instalación de compresión son la tasa de flujo de gas, la presión de succión y descarga, la capacidad calorífica del gas y la eficiencia del compresor. La tecnología para la compresión está disponible y actualmente se utiliza ampliamente en muchos campos industriales.

Transporte

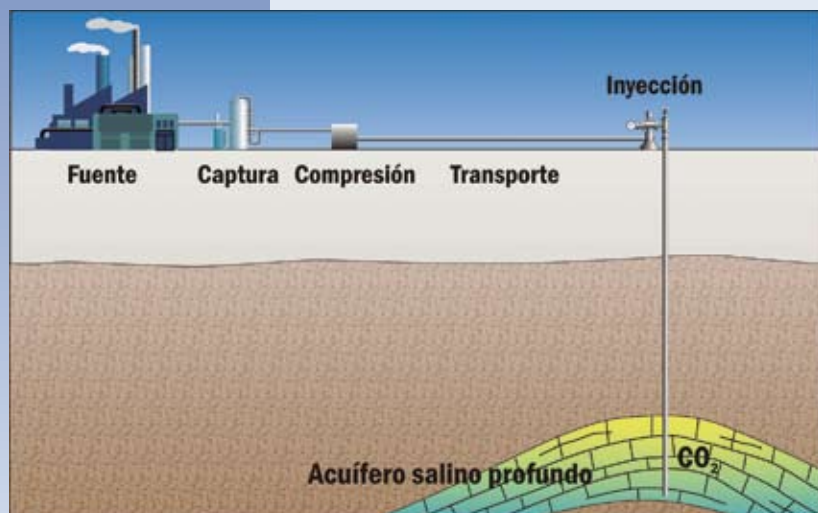
El CO₂ puede transportarse tanto por barco como por tubería. El transporte por barco solo se utiliza actualmente a escalas muy pequeñas (de 10.000 a 15.000 m³) para usos industriales, pero podría

convertirse en una opción de futuro atractiva en proyectos donde una fuente cercana a la costa está muy alejada del lugar de almacenamiento. Los navíos utilizados para el transporte de gas natural (LPG) son válidos para el transporte de CO₂, en concreto, los sistemas semi-refrigerados están presurizados y enfriados y así el CO₂ puede transportarse en fase líquida. Los nuevos barcos de LPG tienen una capacidad de hasta 200.000 m³ y son capaces de transportar 230.000 t de CO₂. Sin embargo, el transporte por barco no permite un flujo continuo entre la fuente y el almacén y se necesitan instalaciones de almacenamiento intermedio en los puertos para abordar la carga de CO₂. El transporte por tubería se emplea actualmente para grandes cantidades de CO₂ por compañías petroleras en EOR* (aproximadamente 3.000 km de tuberías de CO₂ en el mundo, la mayoría en EEUU). El transporte por tuberías es más rentable económicamente que por barco y además ofrece la ventaja de permitir un flujo continuo desde la planta de captura a la de almacenamiento. Las tuberías de CO₂ existentes operan a altas presiones bajo condiciones supercríticas en las que el CO₂ se comporta como un gas pero tiene la densidad de un líquido. Existen tres importantes factores que determinan la cantidad que una tubería puede transportar; su diámetro, la presión a lo largo de su longitud y, por consiguiente, el grosor de su pared.

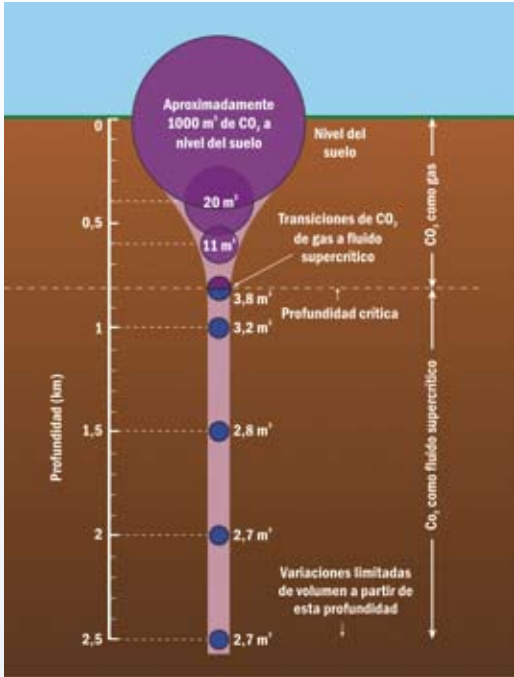
Inyección

Cuando el CO₂ llega al lugar de almacenamiento se inyecta a presión (**Fig. 2**). La presión de inyección debe ser suficientemente mayor que la presión del almacén para desplazar el fluido lejos del punto de inyección. El número de pozos de inyección depende de la cantidad de CO₂ a almacenar, la tasa de inyección (volumen de CO₂ inyectado por hora), la permeabilidad y espesor del reservorio, la máxima presión segura de inyección y el tipo de pozo. Como el objetivo principal es el almacenamiento de CO₂ a largo plazo, debemos tener la certeza de la integridad hidráulica de la formación. Una alta tasa de inyección puede provocar aumentos de presión en el punto de inyección especialmente en formaciones de baja permeabilidad. La presión de inyección normalmente no debe exceder la presión de fractura de la roca, ya que esto podría dañar el almacén o el sello suprayacente. Se utilizan análisis geomecánicos y modelos para identificar la presión máxima de inyección que evitará la fracturación de la formación.

Figura 1
Fases del almacenamiento geológico de CO₂. Para llevar el CO₂ desde el punto de emisión hasta el lugar de almacenamiento seguro y duradero, hay que pasar por una cadena completa de operaciones incluida la captura, compresión, transporte e inyección.



*Ver glosario al final



© IPCC

Figura 2
Cuando el CO₂ es inyectado en el subsuelo, se convierte en un fluido denso supercrítico* a unos 0,8 km de profundidad y su volumen se reduce drásticamente. 1000 m³ en superficie pasan a ser 2,7 m³ a 2 km de profundidad. Éste es uno de los factores que hace el almacenamiento geológico de CO₂ tan atractivo.

Los procesos químicos pueden afectar a la tasa de inyección. Dependiendo del tipo de roca almacén, la composición del fluido, y las condiciones del almacén (como la temperatura, presión, volumen, concentración, etc.) cerca del pozo pueden producirse procesos de disolución y precipitación mineral. Esto puede provocar incrementos o descensos de la tasa de inyección. Tan pronto como el CO₂ se inyecta, parte de éste se disuelve en el agua salada del almacén y el pH* disminuye ligeramente, proceso limitado por la disolución de minerales carbonatados presentes en la roca almacén. Los carbonatos son los primeros minerales en disolverse debido a que su tasa de reacción es muy alta y la disolución empieza desde el comienzo de la inyección. Este proceso de disolución puede incrementar la porosidad de la roca y la inyectabilidad*. Sin embargo, tras la disolución los minerales carbonatados pueden re-precipitar y cementar la formación alrededor del pozo. Pueden utilizarse altas tasas de flujo para limitar la reducción de permeabilidad cerca del pozo, desplazando el área de equilibrio geoquímico a zonas más alejadas.

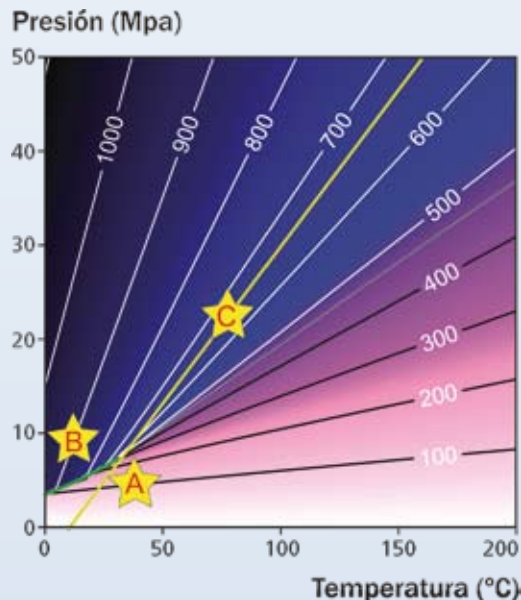
El secado es otro fenómeno inducido por la inyección. Tras la fase de acidificación, el agua residual que queda alrededor del pozo de inyección se disuelve en el gas seco inyectado, que a su vez concentra especies químicas en la salmuera*. Los minerales (como las sales) pueden precipitar cuando la salmuera está lo suficientemente concentrada, reduciendo la permeabilidad alrededor del sondeo.

La inyectabilidad depende de procesos complejos que interactúan y ocurren localmente alrededor del pozo de inyección, pero que a su vez dependen también del tiempo y la distancia al pozo de inyección. Para evaluar tales efectos se utilizan simulaciones numéricas. Las tasas de flujo de inyección deben seleccionarse con cuidado para predecir procesos que pueden limitar la inyección de las cantidades deseadas de CO₂.

Composición del flujo de CO₂

La composición y pureza del flujo de CO₂ son resultado del proceso de captura y tienen una influencia significativa en todos los aspectos implicados en un proyecto de almacenamiento de CO₂. La presencia de un pequeño porcentaje de otras sustancias como agua, sulfuro de hidrógeno (H₂S), sulfuros y óxidos de nitrógeno (SO_x, NO_x), nitrógeno (N₂) y oxígeno (O₂), afectará a las propiedades físicas y químicas del CO₂ y a su comportamiento e impactos asociados. La presencia de estas sustancias debe, por tanto, tratarse con cautela a la hora de diseñar las fases de inyección, transporte y compresión y también al ajustar las condiciones de operación y el equipo.

En conclusión, el transporte y la inyección de grandes cantidades de CO₂ es ya un hecho factible. Sin embargo, si el almacenamiento geológico de CO₂ se va a desarrollar a gran escala, todas las etapas consideradas deben ser ajustadas a cada proyecto de almacenamiento.



© BGR

Figura 3
Densidad del CO₂ puro (en kg/m³) en función de temperatura y presión. La línea amarilla corresponde a la presión típica y pendiente de temperatura en una cuenca sedimentaria. A profundidades mayores de 800 m (~8 Mpa), las condiciones del almacén facilitan las altas densidades (sombreado azul). La curva verde es la fase límite entre el CO₂ gaseoso y líquido. Las condiciones de temperatura y presión típicas para la captura, transporte y almacenamiento están indicadas por A, B y C respectivamente.

Los parámetros clave son las propiedades termodinámicas del flujo de CO₂ (Fig 3), tasas de flujo y condiciones del reservorio y de inyección.

¿Qué sucede con el CO₂ una vez que está almacenado?

Una vez inyectado en la roca almacén, el CO₂ ascenderá libremente relleno el espacio poroso por debajo de la roca sello. Con el tiempo, parte del CO₂ se disolverá y finalmente se transformará en minerales. Estos procesos tienen lugar en diferentes escalas de tiempo y contribuyen al atrapamiento permanente.

Mecanismos de atrapamiento

Cuando el CO₂ se inyecta en la roca almacén, éste rellena el espacio poroso que, en la mayoría de los casos, está relleno de salmuera, es decir, agua salada.

Al inyectar el CO₂ entran en juego los siguientes mecanismos. El primero, considerado el más importante, evita que el CO₂ ascienda a superficie. Los otros tres incrementan la eficiencia y la seguridad del almacenamiento con el tiempo.

1. Acumulación bajo la roca sello (atrapamiento estructural)

Debido a que la densidad del CO₂ es menor que la del agua, éste comienza a ascender.

Este movimiento se detiene cuando el CO₂ encuentra una capa de roca impermeable, también llamada "roca sello". Normalmente está compuesta de arcilla o sal y actúa como una trampa, evitando que el CO₂ ascienda más allá y permitiendo su acumulación justo debajo. La **Figura 1** ilustra el movimiento ascendente del CO₂ a través del espacio poroso de la roca (en azul) hasta que alcanza la roca sello.

2. Inmovilización en pequeños poros (atrapamiento residual)

Ocurre cuando los espacios del poro en la roca almacén son tan estrechos que el CO₂ no puede moverse hacia arriba a pesar de la diferencia de densidad con el agua circundante. Este proceso sucede principalmente durante la migración del CO₂ y puede inmovilizar un pequeño porcentaje del CO₂ inyectado dependiendo de las propiedades de la roca almacén.

3. Disolución (atrapamiento por disolución)

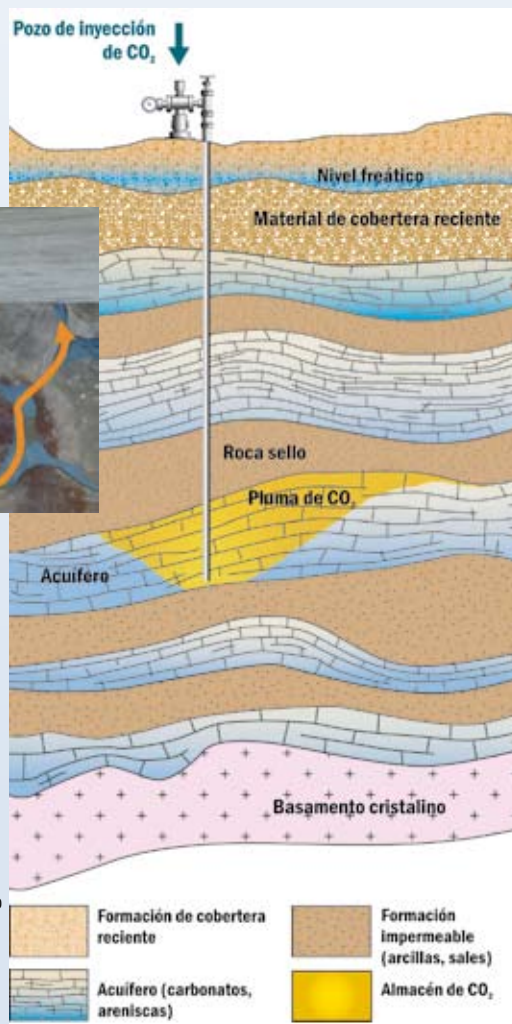
Una pequeña proporción del CO₂ inyectado se disuelve en la salmuera presente en el espacio poroso del almacén. Una consecuencia de la disolución es que el agua con CO₂ disuelto es más pesada que el agua sin él, y tiende a moverse hacia abajo, al fondo del almacén. La tasa de disolución depende del contacto entre el CO₂ y la salmuera. La cantidad de CO₂ que puede disolver está limitada por una concentración máxima. Sin embargo, debido al movimiento hacia arriba del CO₂ inyectado y hacia abajo del agua con CO₂ disuelto, hay una continua renovación del contacto entre la salmuera y el CO₂, incrementando así la cantidad que puede disolverse. Estos procesos son relativamente lentos porque tienen lugar en espacios del poro estrechos.

4. Mineralización (atrapamiento mineral)

El CO₂, especialmente en combinación con la salmuera en el almacén, puede reaccionar con los minerales formando una roca. Algunos minerales se pueden disolver, mientras que otros pueden precipitar, dependiendo del pH y de los minerales que constituyen la roca almacén (**Fig. 2**). Las estimaciones en Sleipner indican que sólo una fracción relativamente pequeña del CO₂ quedará inmovilizada por mineralización después de un largo periodo de tiempo. Después de 10.000 años, sólo el 5% del CO₂ inyectado debería mineralizarse, mientras que el 95% se disolvería



Figura 1
El CO₂, que es más ligero que el agua, tiende a ascender hasta quedar detenido por las capas de rocas impermeables superiores.



© BRGM im@gg



Figura 2
CO₂ denso migrando hacia arriba (burbujas azul claro) disolviéndose y reaccionando con los granos de la roca, lo cual lleva a la precipitación de minerales carbonatados en los bordes de grano (color blanco).

sin que quedase CO₂ como una fase densa separada.

La importancia relativa de estos mecanismos de atrapamiento es específica del lugar, es decir, depende de las características de cada emplazamiento individualmente. Por ejemplo, en los depósitos en forma de domo, el CO₂ debería permanecer mayoritariamente en una fase densa incluso después de largos periodos de tiempo, mientras que en depósitos planos como Sleipner, la mayoría del CO₂ será disuelto o mineralizado. La evolución de la proporción de CO₂ en los diferentes mecanismos de atrapamiento para el caso de Sleipner se ilustra en la **Figura 3**.

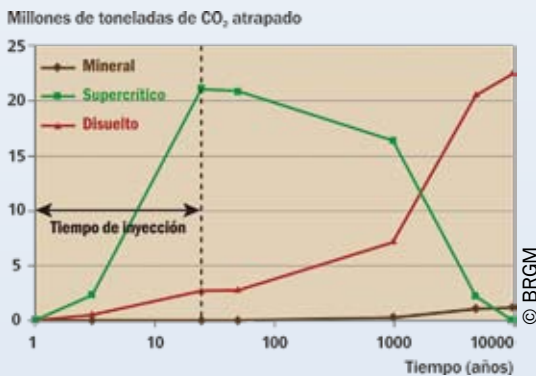
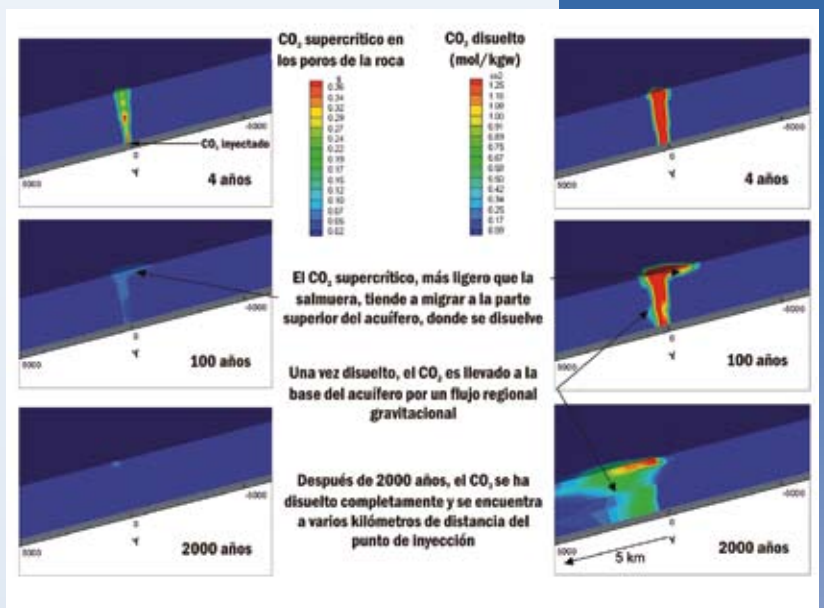


Figura 3
Evolución del CO₂ en sus diferentes formas en el depósito de Sleipner de acuerdo a las simulaciones de flujo.
El CO₂ es atrapado en forma supercrítica por los mecanismos 1 y 2, en forma disuelta por el mecanismo 3 y en forma mineral por el mecanismo 4.

- **Simulaciones numéricas:** los códigos informáticos pueden usarse para predecir el comportamiento del CO₂ en escalas de tiempo mucho mayores (**Fig. 4**). Los experimentos de laboratorio se utilizan para calibrar las simulaciones numéricas.
- **El estudio de almacenes naturales de CO₂,** donde el CO₂ (generalmente de origen volcánico) ha permanecido atrapado durante largos periodos de tiempo, a menudo millones de años. Este tipo de emplazamiento se denomina como “análogo natural”* y aporta información sobre el comportamiento del gas y las consecuencias a muy largo plazo de la presencia de CO₂ en el subsuelo.
- **La monitorización de proyectos de demostración de almacenamiento geológico de CO₂,** como Sleipner (Noruega), Weyburn (Canadá), In Salah (Argelia) y K12-B (Holanda). Los resultados de las simulaciones a corto plazo pueden compararse con los datos de campo reales y ayudan a afinar los modelos.

Figura 4
Modelización 3D de la migración del CO₂ en un acuífero después de la inyección de 150.000 toneladas durante 4 años en el acuífero de Dogger en Francia. Aquí se representa el CO₂ supercrítico (izquierda) y el CO₂ disuelto en salmuera (derecha) 4, 100 y 2.000 años tras el comienzo de la inyección. La simulación está basada en datos de campo y experimentos.



Sólo con el constante contraste de referencias y de comprobaciones de estas cuatro fuentes de información es posible adquirir un conocimiento fiable sobre los procesos que ocurren a 1.000 metros bajo tierra.

¿Cómo sabemos todo esto?

El conocimiento sobre estos procesos procede de cuatro fuentes de información:

- **Mediciones en laboratorio:** experimentos a pequeña escala de mineralización, flujo y disolución pueden realizarse en muestras de roca y dan una idea de los procesos que ocurren a corto plazo y a pequeña escala.

En conclusión, sabemos que la seguridad del emplazamiento para el almacenamiento de CO₂ tiende a incrementarse con el tiempo. El punto más crítico es encontrar un depósito con una roca sello útil sobre ella que pueda contener el CO₂ (atrapamiento estructural). Los procesos relativos a disolución, mineralización y atrapamiento residual trabajan a favor de evitar que el CO₂ migre a la superficie.

¿Podría el CO₂ fugarse del almacén y, si fuese así, cuáles serían las consecuencias?

El estudio de sistemas naturales ha permitido establecer que en almacenamientos seleccionados, la presencia de algún tipo de fuga es insignificante. Las reservas naturales de gas nos pueden ayudar a entender las condiciones bajo las que el gas queda atrapado o se escapa. Además, las fugas nos pueden ayudar a entender los posibles impactos que podría tener una fuga de CO₂

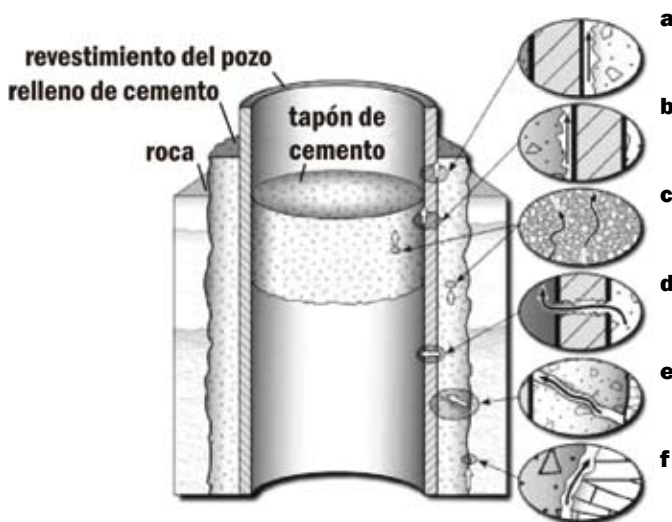
Vías de fuga

En general, las vías de fuga potenciales están hechas o bien por el hombre (como los pozos profundos) o por la naturaleza (como fracturas y fallas). Tanto los pozos activos como los abandonados podrían actuar como vías de migración porque constituyen una conexión directa entre la superficie y el almacén y están compuestos de materiales creados por el hombre que pueden corroerse con el paso del tiempo (**Fig. 1**). Una complicación añadida es que no todos los pozos se perforan usando las mismas técnicas, sino que los pozos nuevos son generalmente más seguros. En cualquier caso, se estima que el riesgo debido a fugas a través de los pozos, es pequeño ya que los pozos se pueden monitorizar usando métodos geoquímicos y geofísicos sensibles y porque la tecnología de remediación ya existe en la industria del petróleo.

El flujo a lo largo de las fallas y fracturas que podrían existir en la roca sello o debidas a la sobrecarga* es más complejo, se trata de sistemas con características irregulares y con permeabilidad variable.

Un buen conocimiento científico y técnico de los sistemas naturales con y sin fugas, nos permitirá diseñar proyectos de almacenaje de CO₂ que tengan las mismas características que los depósitos naturales que contienen CO₂ atrapado y metano desde hace miles o millones de años.

Figura 1
Posibles vías de escape del CO₂ en un pozo. Escape por el material alterado (c, d, e) o a lo largo de las interfases (a, b, f)

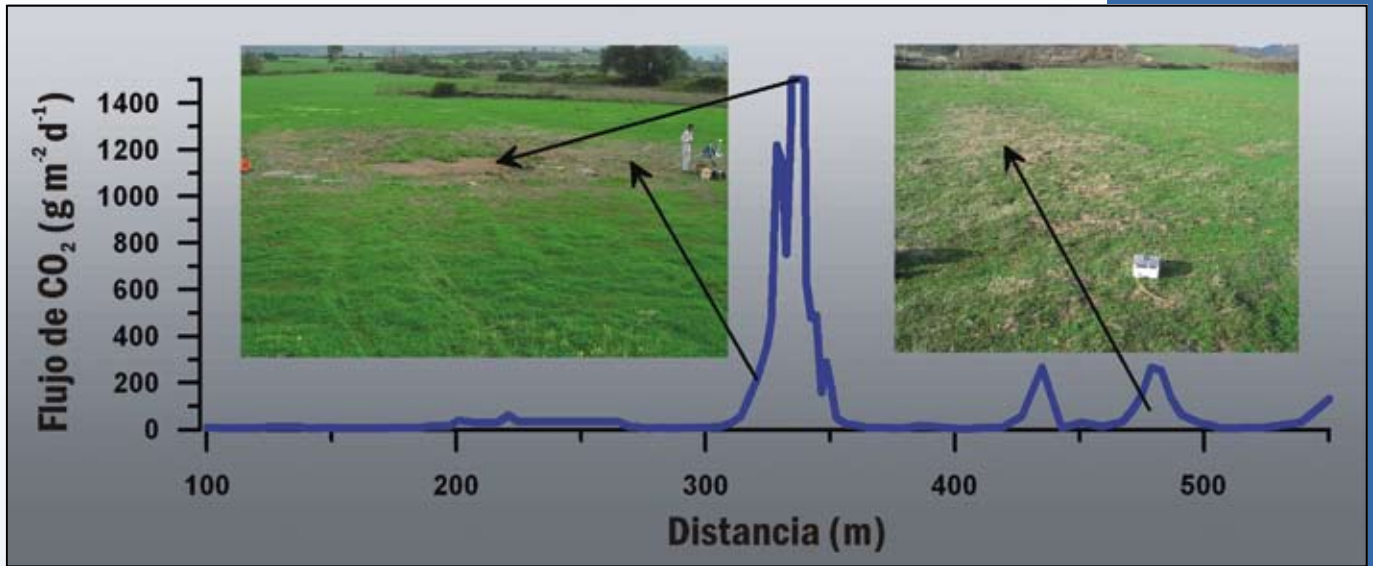


Análogos naturales: lecciones aprendidas

Los sistemas naturales (también llamados "análogos") son fuentes de información de valor incalculable ya que aumentan nuestro conocimiento sobre la migración del gas en profundidad y el intercambio natural de gases entre la tierra y la atmósfera. Los principales hallazgos derivados del estudio de numerosas reservas de gas natural con fugas y sin fugas son:

- Bajo condiciones geológicas favorables, el gas producido de forma natural puede estar atrapado durante cientos de miles a millones de años;
- Los yacimientos y bolsas de gas aislados existen incluso en los emplazamientos geológicos menos favorables (áreas volcánicas);
- La migración de cualquier cantidad significativa de gas requiere advección, es decir, flujo ayudado por presión, porque la difusión es un proceso muy lento;
- Para que ocurra la advección, las condiciones del fluido en el almacén deben estar próximas a la presión litostática* para mantener las fallas y fracturas abiertas o crear nuevas vías mecánicamente;
- Las áreas donde se producen las fugas naturales de gas a la superficie están situadas casi exclusivamente en regiones volcánicas o sísmicas altamente fracturadas, con conductos de gas a lo largo de fallas ya activas o recientemente activas;
- Las fugas de gas significativas sólo existen raramente y suelen restringirse a áreas volcánicas fracturadas y geotérmicas donde el CO₂ se produce continuamente por procesos naturales;
- Las anomalías del gas en la superficie aparecen normalmente como puntos localizados con un impacto espacial limitado al medio ambiente cercano a la superficie.

Por lo tanto, es necesaria la combinación de una serie de condiciones específicas antes de que ocurra una fuga. En consecuencia, es bastante improbable que en un almacén de CO₂ bien elegido y cuidadosamente estudiado se produzcan fugas. A pesar de que el potencial de fuga es pequeño, los procesos asociados y los efectos potenciales deben comprenderse completamente para elegir, diseñar y operar de la manera más segura el emplazamiento de un almacén geológico de CO₂.



Impacto en los humanos

Al respirar, exhalamos CO_2 . El CO_2 es peligroso para los humanos sólo en concentraciones muy altas, con valores superiores a 50.000 ppm (5%) y puede causar dolores de cabeza, mareos y náuseas. Los valores superiores a este nivel pueden causar la muerte si la exposición es demasiado larga, especialmente por asfixia cuando la concentración de oxígeno en el aire cae por debajo del 16% que es el nivel requerido para mantener la vida humana. Sin embargo, si el CO_2 se fuga en un área abierta o plana, en seguida se dispersa en el aire, incluso con vientos flojos. El riesgo potencial para las poblaciones se restringe a fugas en ambientes cerrados o depresiones topográficas, donde las concentraciones pueden aumentar debido a que el CO_2 es más denso que el aire y tiende a acumularse cerca del suelo. El conocimiento de las características de las áreas de desgasificación es útil para la prevención y gestión de riesgos. En realidad, mucha gente vive en áreas con emanaciones de gas natural diarias. Por ejemplo, en Italia en Ciampino, cerca de Roma, las casas están situadas sólo a 30 metros de las emanaciones de gas, donde las concentraciones de CO_2 en el suelo alcanzan el 90% y sobre 7 toneladas de CO_2 se liberan diariamente a la atmósfera. Los habitantes locales evitan cualquier daño cumpliendo precauciones simples tales como no dormir en el sótano y mantener las casas bien ventiladas.

Impacto en el medio ambiente

Los impactos potenciales en los ecosistemas varían dependiendo de si el emplazamiento para el almacén está situado en el mar o en tierra. En los ecosistemas marinos, el principal efecto de la fuga de CO_2 es un descenso del pH local y su impacto asociado, principalmente en animales que viven en el fondo marino y no se pueden mover. Sin embargo, las consecuencias son espacialmente limitadas y los ecosistemas pronto muestran signos de recuperación tras la remisión de la fuga.

En ecosistemas terrestres, el impacto puede resumirse en términos generales como sigue:

- **Vegetación** – Aunque unas concentraciones de CO_2 en el suelo de alrededor del 20-30% pueden realmente favorecer la fertilización e incrementar el crecimiento de ciertas especies, los valores por encima de este umbral pueden ser letales para algunas plantas. Este efecto está especialmente localizado alrededor de las emisiones de gas, mientras que pocos metros más allá, la vegetación permanece robusta y saludable (**Fig. 2**).
- **Calidad del agua subterránea** – La composición química del agua subterránea podría alterarse por la adición de CO_2 , ya que el agua se vuelve más ácida y los elementos pueden ser liberados de las rocas y minerales del acuífero. Incluso si el CO_2 se filtrase dentro de un acuífero de agua potable, los efectos permanecerían localizados y se podrían cuantificar los impactos inducidos. De hecho, muchos acuíferos por toda Europa son ricos en CO_2 natural y este agua se embotella y vende como “agua mineral con gas”.
- **Integridad de la roca** – La acidificación del agua subterránea puede resultar en la disolución de la roca, una disminución de la integridad estructural y la formación de sumideros. Sin embargo, este tipo de impacto sólo sucede bajo condiciones geológicas e hidrogeológicas muy específicas (zonas tectónicamente activas, acuíferos con mucho caudal o zonas mineralógicamente ricas en carbonatos), que no suelen darse en los lugares de almacenamiento geológico creados por el hombre.

En conclusión, como los impactos de cualquier fuga de CO_2 dependerán del sitio específico, un concienzudo conocimiento geológico y estructural del emplazamiento nos permitirá identificar cualquier vía de migración potencial de gas, elegir el sitio con el menor potencial de fuga de CO_2 , predecir el comportamiento del gas y así evaluarlo, y prevenir cualquier impacto significativo en los humanos y en el ecosistema.

Figura 2
Impacto de la fuga de CO_2 en la vegetación con un flujo alto (izquierda) y reducido (derecha). El impacto está limitado al área donde el CO_2 se fuga.



¿Cómo podemos monitorizar el almacén en profundidad y en superficie?

Todos los lugares de almacenamiento de CO₂ tendrán que ser monitorizados por razones de operatividad, seguridad, medioambientales, sociales y económicas. Hay que preparar una estrategia para definir qué será monitorizado exactamente y cómo.

¿Por qué es necesaria la monitorización?

La monitorización del emplazamiento será crítica para asegurar que el objetivo principal del almacenamiento geológico de CO₂ se consiga, sobre todo el aislamiento a largo plazo del CO₂ antrópico presente en la atmósfera. Las razones para monitorizar el almacén incluyen:

- **Operatividad:** controlar y optimizar el proceso de inyección.
- **Seguridad y medioambientales:** minimizar o evitar cualquier impacto en la población, vida salvaje y ecosistemas en los alrededores del emplazamiento y asegurar la mitigación del cambio climático global.
- **Sociales:** dar a la población la información necesaria para entender la seguridad del almacenamiento y ayudar a ganarse la confianza del público.
- **Financieras:** construir un mercado de confianza en tecnología CAC y verificar los volúmenes de almacenamiento de CO₂ para que puedan ser consideradas como "emisiones evitadas" en fases futuras del Esquema de Mercado de Emisiones

Monitorizar tanto el estado inicial del medio ambiente ("baseline") como la consiguiente instalación en el emplazamiento es un importante requisito regulador en la Directiva EC en CAC, publicada como borrador el 23 de enero de 2008. Los operadores deben ser capaces de demostrar el desarrollo del almacenamiento conforme a las regulaciones a largo plazo. La monitorización es un componente importante que reducirá las incertidumbres del rendimiento y estará así estrechamente unida a las actividades de gestión de seguridad.

Objetivos de la monitorización

La monitorización puede estar enfocada a varios objetivos en diferentes partes del emplazamiento, como:

- Modelización de la pluma – rastreo del CO₂ según migra desde el punto de inyección. Clave para calibrar los modelos que predicen la distribución futura del CO₂ en el emplazamiento. Existen muchas técnicas; se trata de repetir los estudios sísmicos que han sido aplicados en varias demostraciones y proyectos a escala piloto (**Fig. 1**).
- Integridad de la roca sello – necesaria para evaluar si el CO₂ está aislado en el lugar de almacenamiento y para facilitar la rápida prevención de cualquier migración del CO₂ hacia arriba. Esto es especialmente importante durante la fase de inyección, cuando las presiones del almacén aumentan significativamente, aunque durante un corto periodo de tiempo.
- Integridad del pozo – este es un tema importante ya que los pozos profundos son una potencial vía de migración del CO₂ a la superficie. La inyección de CO₂ en cualquier pozo debe ser cuidadosamente monitorizada durante y posteriormente a la fase de inyección para prevenir escapes repentinos. La monitorización también se utiliza para verificar que todos los pozos han sido sellados correctamente una vez que ya no son necesarios. Pueden instalarse sistemas de monitorización geofísica y geoquímica, práctica común en la industria del petróleo y el gas; pueden ser instalados dentro o sobre los pozos para dar una señal de aviso garantizando la seguridad.
- Migración en las capas superiores – si la monitorización indica una migración inesperada a través de la roca sello, será necesaria la monitorización de las unidades de roca superiores. Muchas de las técnicas usadas en la monitorización de la pluma o integridad de la roca sello pueden ser utilizadas en las capas superiores.
- Fuga a la superficie, detección atmosférica y medición – para asegurar que el CO₂ inyectado no ha migrado a la superficie existe un conjunto de técnicas geoquímicas, bioquímicas y de tele-detección que permiten localizar las fugas y calcular y monitorizar la distribución del CO₂ en la tierra y su dispersión en la atmósfera o el medio ambiente marino (**Fig. 2**).
- Cantidad de CO₂ almacenado para propósitos reglamentarios y fiscales – aunque la cantidad de CO₂ inyectado puede medirse fácilmente en la boca del pozo, la cuantificación en el almacén es técnicamente muy difícil. Si se produce una fuga cercana a la superficie, las cantidades liberadas tendrán que ser cuantificadas con fines de registro en los inventarios nacionales de gases invernaderos y futuros esquemas de ETS.

Figura 1 Representación digital de monitorización de la pluma de CO₂ en Steipner antes de la inyección (que comenzó en 1996) y tras la inyección (3 y 5 años después, respectivamente).



- Movimientos de tierra y microsismicidad* – el incremento de la presión en el almacén debido a la inyección del CO₂ podría, en casos específicos, producir un aumento en el riesgo de microsismicidad y movimientos de tierra a pequeña escala. Existen técnicas de monitorización microsísmica y métodos de vigilancia a distancia (desde aviones o satélites) capaces de medir pequeñas distorsiones del terreno.

¿Cómo se lleva a cabo la monitorización?

Numerosas técnicas de monitorización están siendo aplicadas a los proyectos de demostración e investigación. Incluyen métodos que monitorizan directamente el CO₂ y aquellos que indirectamente miden sus efectos en las rocas, fluidos y medio ambiente. Las medidas directas incluyen el análisis de los fluidos desde los pozos profundos o las mediciones de concentración de gas en el suelo o la atmósfera. Los métodos indirectos incluyen estudios geofísicos y monitorización de los cambios de presión en pozos o cambios del pH de las aguas subterráneas.

La monitorización se requiere para emplazamientos de almacenaje tanto en mar como en tierra. La selección de las técnicas dependerá de las características del emplazamiento y de los objetivos de la monitorización. Se dispone de una amplia gama de técnicas de monitorización (Fig. 3), muchas de las cuales están bastante establecidas en las industrias del gas y del petróleo y están siendo adaptadas al contexto del CO₂. La investigación en la optimización de los métodos existentes o el desarrollo de técnicas innovadoras está también en camino con el objetivo de mejorar la resolución y fiabilidad, reducir costes, automatizar la explotación y demostrar la efectividad.

Estrategia de monitorización

Cuando se diseña una estrategia de monitorización hay que tomar muchas decisiones que dependen de las condiciones geológicas y de ingeniería específicas para cada emplazamiento individualmente, tales como la geometría, la profundidad, la dispersión esperada de la pluma de CO₂, vías de fuga potenciales, geología de rocas superiores, radio del flujo y tiempo de inyección y características de la superficie, como la topografía, densidad de población, infraestructura y ecosistemas. Una vez se han tomado las decisiones más apropiadas en cuanto a técnicas de medición y localización, los estudios iniciales deben conducir prioritariamente a las operaciones de inyección para que sirvan como referencia en futuras mediciones. Finalmente, cada programa de monitorización debe ser flexible para así poder evolucionar según avance el proyecto de almacenamiento. Una estrategia de monitorización capaz de integrar todas estas cuestiones, mejorando la rentabilidad del proyecto, supondrá un componente crítico en el análisis de riesgo y en la verificación de la seguridad y eficiencia del emplazamiento. En conclusión, sabemos que la monitorización del almacén de CO₂ es factible con las numerosas técnicas disponibles en el mercado o en desarrollo. La investigación está actualmente en marcha, no sólo para desarrollar nuevas herramientas (particularmente para el uso del suelo marino), sino también para optimizar la función de la monitorización y reducir los costes.



Figura 2
Boya de monitorización con paneles solares como fuente energética, flotadores y dispositivo de muestreo de gas en el fondo marino.

© CO₂ GeoNet

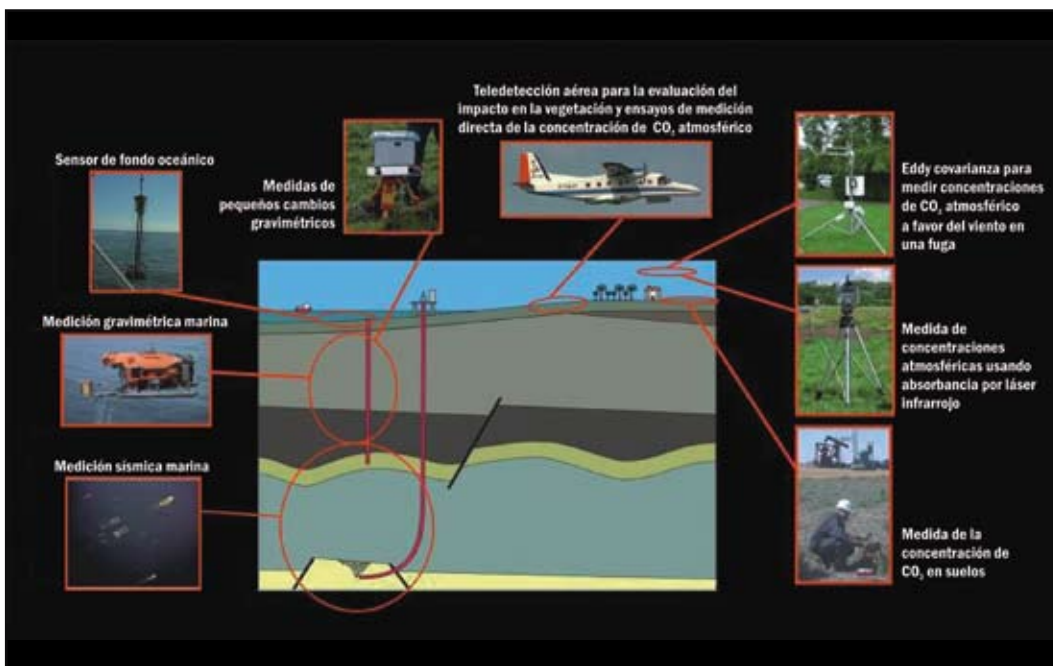


Figura 3
Una pequeña selección que ilustra el abanico de técnicas disponibles para monitorizar los distintos componentes de un sistema de almacenamiento de CO₂.

© CO₂ GeoNet



¿Qué criterios de seguridad deben imponerse y respetarse?

Para garantizar la eficiencia y seguridad de un almacén, las autoridades y operarios deben imponer una serie de condiciones para la explotación que deben ser respetadas.

Aunque el almacenamiento geológico de CO₂ está ampliamente aceptado como una opción válida para la mitigación del cambio climático, los criterios de seguridad con respecto a la salud humana y el medio ambiente local aún deben ser establecidos antes de llevarlos a una escala industrial. Estos criterios pueden definirse como los requerimientos impuestos a los operadores por parte de las autoridades para asegurar que los impactos en la salud, seguridad y el medio ambiente (incluyendo los recursos de aguas subterráneas) son insignificantes a corto, medio y largo plazo.

Una cuestión clave del almacenamiento geológico de CO₂ es que debe ser permanente; se espera que los lugares de almacenamiento no tengan fugas. Sin embargo, el “¿qué pasaría si?”, significa que el riesgo debe ser evaluado y que los operadores deben respetar las medidas que prevengan cualquier fuga o comportamiento anómalo de los emplazamientos.

Según el IPCC, el CO₂ inyectado debe mantenerse almacenado en profundidad al menos 1.000 años, lo cual permitiría a las concentraciones de CO₂ atmosférico estabilizarse o disminuir por intercambio natural con las aguas oceánicas, minimizando así el aumento de temperatura debido al cambio climático. Sin embargo, los impactos locales deben ser asesorados en rangos de una escala de tiempo de días a miles de años.

Existen varios pasos que pueden identificarse durante el tiempo de vida de un proyecto de almacenamiento geológico de CO₂ (**Fig. 1**). La seguridad debe garantizarse a través de:

- Preservar las propiedades físicas del almacén (incluyendo porosidad, permeabilidad, inyectividad) y la naturaleza impermeable de la roca sello.
- Tener en cuenta la composición del flujo de CO₂ poniendo especial atención a cualquier impureza no eliminada durante el proceso de captura. Esto es importante para evitar cualquier interacción adversa con el pozo, roca almacén, roca sello y, en caso de fuga, cualquier agua subterránea suprayacente.

Criterios de seguridad para el diseño del proyecto

La seguridad debe demostrarse antes del comienzo de las operaciones. Con respecto a la selección de emplazamientos, los principales componentes que deben examinarse son:

- Las rocas almacén y sello
- Las capas suprayacentes y, particularmente, las capas impermeables que podrían actuar como sellos secundarios.
- La presencia de fallas permeables o pozos que podrían actuar como canales de fuga hacia la superficie.
- Los acuíferos de agua potable
- La población y las restricciones medioambientales en superficie.

Las técnicas de exploración de petróleo y gas se utilizan para evaluar la geología y la geometría del almacén. La modelización de flujo, la química y la geomecánica del CO₂ en el almacén permiten predecir el comportamiento del CO₂ y la definición de parámetros para una inyección eficiente a largo plazo. Como resultado, una caracterización cuidadosa del emplazamiento proporcionaría la definición del comportamiento de un almacén “normal” correspondiente con un lugar adecuado de almacenamiento donde se confía en que el CO₂ no migrará. La evaluación de riesgos debe considerar los escenarios menos plausibles para futuras condiciones del almacenamiento, incluyendo eventos no esperados. En particular, es importante prever cualquier posible vía de fuga, exposición y efectos (**Fig. 2**). Cada escenario de fuga debería ser analizado y, si es posible, debería aplicarse modelización numérica para evaluar la probabilidad de aparición de fugas y su riesgo potencial. Como ejemplo, la evolución de la extensión de la pluma de CO₂ debe cartografiarse cuidadosamente para detectar cualquier conexión con una zona de falla. La sensibilidad a las variaciones en los parámetros considerados y las incógnitas deben

Figura 1
Los diferentes pasos del proyecto de almacenamiento

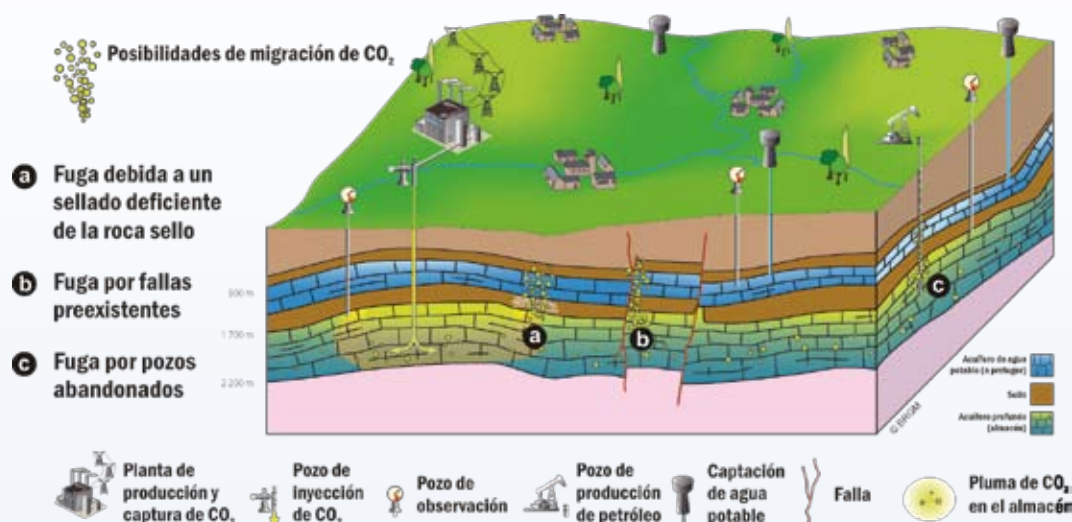


- Una selección y caracterización cuidadosa del emplazamiento
- Evaluaciones de seguridad
- Una correcta operación
- Un plan de monitorización apropiado
- Un plan de remediación apropiado

Los objetivos críticos asociados son:

- Asegurar que el CO₂ se mantiene en el almacén
- Mantener la integridad del pozo

Figura 2
Ejemplo de escenarios potenciales de fuga



evaluarse cuidadosamente en el análisis de riesgos. La estimación de los efectos potenciales del CO₂ en los seres humanos y el medio ambiente debería dirigirse a través de estudios de asesoramiento de impactos, lo cual es una práctica habitual en cualquier proceso de obtención de licencias para una instalación industrial. En este proceso, tanto los escenarios normales como los de fuga serán examinados para evaluar cualquier riesgo potencial asociado a la instalación.

El programa de monitorización a corto y largo plazo debe establecerse de acuerdo a la evaluación de riesgos y debe controlar los parámetros críticos definidos en los diferentes escenarios. Sus objetivos principales son prever la migración de la pluma, evaluar la integridad de pozo y de la roca sello, detectar cualquier fuga, evaluar la calidad del agua y asegurar que el CO₂ no alcanza la superficie. El plan de remediación y mitigación es el último componente de estimación de la seguridad y pretende detallar la lista de acciones correctoras que deben desarrollarse en caso de fuga o de comportamiento anómalo. Esto abarca la integridad de la roca sello y fallo en el pozo en periodos de inyección y post-inyección y considera soluciones extremas de remediación así como la reversibilidad del almacenamiento. El conocimiento existente comprende técnicas estándar utilizadas en el mundo del petróleo y gas, como la reparación de pozos, la reducción de la presión de inyección, la retracción parcial o completa del gas, la extracción de agua para liberar presión, la extracción de agua superficial, etc.

Crterios de seguridad durante las etapas operacional y de post-cierre

La principal preocupación en materia de seguridad está asociada a la fase operacional: cuando acaba la inyección, la disminución en la presión hará el lugar más seguro. La confianza en la habilidad para inyectar y almacenar CO₂ de forma segura, depende de la experiencia de las compañías industriales. El CO₂ es un producto común que se utiliza en varias industrias, por ello el manejo de esta sustancia no conlleva nuevos problemas.

El diseño y control de operaciones estará basado

principalmente en el conocimiento de la industria de petróleo y gas, el almacenamiento de gas natural estacional o la recuperación mejorada de petróleo (EOR). Los principales parámetros a controlar son:

- Presión de inyección y tasa de flujo, la primera debe mantenerse bajo la presión de fracturación.
- El volumen inyectado, para conseguir las predicciones definidas por la modelización.
- La composición del CO₂ inyectado
- La integridad del pozo de inyección y cualquier pozo ubicado en o cerca de la extensión de la pluma de CO₂
- La extensión de la pluma de CO₂ y detección de fugas.
- La estabilidad del terreno.

Durante la inyección, el comportamiento del CO₂ debe verificarse comparándolo con las predicciones. Si se detecta cualquier anomalía, el programa debería ser actualizado tomándose medidas correctoras. En el caso de que exista sospecha de fuga, las herramientas de monitorización deberían centrarse en un área específica, desde el almacén hasta la superficie. Esto detectaría el ascenso de CO₂ y, además, cualquier evento adverso que pudiese ser perjudicial para los acuíferos potables, el medio ambiente y los seres humanos. En la fase de cierre los pozos deben cerrarse y abandonarse apropiadamente, la modelización y monitorización deben actualizarse y, si es necesario, se tomarán medidas correctivas para reducir riesgos. Una vez que el nivel de riesgo es bajo, la responsabilidad del almacén se transferirá a las autoridades nacionales y el plan de monitorización puede minimizarse o suspenderse.

La Directiva Europea establece un marco legal para asegurar que la captura y almacenamiento de CO₂ es una opción disponible, responsable y segura.

Los criterios de seguridad son esenciales para que la instalación industrial de almacenamiento de CO₂ tenga éxito. Deben adaptarse a cada lugar. Estos criterios serán particularmente importantes para la aceptación pública y esenciales en el proceso de obtención de permisos para el cual los organismos reguladores deben decidir el nivel de detalle de los requisitos de seguridad.

Acuífero: cuerpo de roca permeable que contiene agua. La mayor parte de los acuíferos superficiales contienen agua potable apta para el consumo humano. Los acuíferos profundos están llenos de agua salada que no es apta para las necesidades humanas, éste tipo de acuíferos se llaman acuíferos salinos.

Análogo natural: almacén natural de CO₂. Existen emplazamientos con fugas o sin fugas y su estudio puede mejorar nuestra comprensión de las fugas de CO₂ a largo plazo en sistemas geológicos profundos.

CAC: Captura y Almacenamiento de CO₂ (CCS: CO₂ Capture and Storage).

CSLF: Carbon Sequestration Leadership Forum: iniciativa internacional contra el cambio climático que se centra en el desarrollo de tecnologías rentables mejoradas para la separación y captura del CO₂, su transporte y almacenamiento seguro a largo plazo.

Enhanced Oil Recovery (EOR): recuperación mejorada de petróleo; técnica para mejorar la producción de petróleo mediante la inyección de fluidos (como CO₂) que ayudan a movilizar el petróleo en su almacén.

EU Geocapacity (Geocapacidad UE): se trata de un proyecto europeo de investigación ya en funcionamiento que está evaluando la capacidad geológica total de almacenamiento que existe en Europa para las emisiones antrópicas de CO₂.

GESTCO: proyecto europeo de investigación ya finalizado que evaluó las posibilidades de almacenamiento geológico de CO₂ en 8 países (Noruega, Dinamarca, Reino Unido, Bélgica, Holanda, Alemania, Francia y Grecia).

IEA-GHG: International Energy Agency – Greenhouse Gas R&D programme. Programa de investigación sobre gases de efecto invernadero desarrollado por la Agencia Internacional de la Energía. Se trata de una colaboración internacional que pretende evaluar las tecnologías para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, difundir el resultado de estos estudios e identificar los objetivos de la investigación, desarrollo e innovación y promocionar el trabajo adecuado.

Inyectabilidad: caracteriza la facilidad con la cual un fluido como el CO₂ puede ser inyectado en una formación geológica. Se define por la tasa de inyección dividida entre la diferencia de presión entre el punto de inyección en la base del pozo y la formación.

IPCC: International Panel on Climate Change. Panel Intergubernamental de Cambio Climático. Esta organización fue establecida en 1988 por la or-

ganización meteorológica mundial en 1988 WMO (World Meteorological Organization) y la UNEP (United Nations Environment Programme), Programa Medioambiental de las Naciones Unidas, para evaluar la información científica, técnica y socio-económica relevante para la comprensión del cambio climático, sus potenciales impactos y opciones de adaptación y mitigación. El IPCC y Al Gore fueron premiados con el premio Nobel de la paz en 2007.

Microsismicidad: ligero temblor o vibración en la corteza terrestre no relacionado con terremotos, y que es causado por varios agentes naturales y artificiales.

Permeabilidad: propiedad o capacidad de una roca porosa de transmitir un fluido, es una medida de la relativa facilidad con la que un fluido fluye bajo un gradiente de presión dado.

pH: medida de la acidez de una disolución donde el pH 7 es el neutro.

Pluma de CO₂: distribución espacial del CO₂ supercrítico en el interior de las unidades de roca.

Porosidad: porcentaje del volumen global de una roca que no está ocupado por minerales. Estos huecos se denominan poros y pueden estar rellenos de varios fluidos. Normalmente, en rocas profundas este fluido es agua salada, pero también puede ser petróleo o gas como metano, o también CO₂ de origen natural.

Pozo (o sondeo): perforación circular muy profunda de pequeño diámetro, como un pozo de petróleo.

Presión litostática: fuerza ejercida sobre una roca que se encuentra bajo la superficie terrestre por rocas que se encuentran por encima de ella. La presión litostática aumenta con la profundidad.

Roca almacén: cuerpo de roca o sedimento que es lo suficientemente poroso y permeable como para alojar y almacenar CO₂. La arenisca y la caliza son las rocas almacén más comunes.

Roca sello: capa impermeable de roca que actúa como una barrera al movimiento de líquidos o gases y que forma una trampa al situarse por encima de un almacén.

Salmuera: agua muy salada, es decir, contiene altas concentraciones de sales disueltas.

Sobrecarga: estratos geológicos que se encuentran entre la roca sello y la superficie terrestre.

Supercrítico: estado de un fluido a presiones y temperaturas por encima de valores críticos (para el CO₂ son 31,03 °C y 7,38 MPa). Las propiedades de dichos fluidos varían continuamente, desde un estado más cercano al gas a baja presión a otro más cercano a un líquido a alta presión.

Qué puede hacer CO₂GeoNet por ti



CO₂GeoNet es una Red de Excelencia Europea que está comprometida a aportar información objetiva y científica sobre la seguridad y eficiencia del almacenamiento geológico de CO₂. La asociación se compone de 150 científicos de 13 institutos de investigación públicos; todos y cada uno de los miembros tienen un alto perfil internacional en todos los aspectos de la investigación en almacenamiento geológico de CO₂. La red de trabajo está patrocinada por la Comisión Europea bajo el 6º Programa Marco.

Los institutos involucrados son: BGR , BGS , BRGM , GEUS , Heriot Watt University , IFP , Imperial College , NIVA , OGS , IRIS , SINTEF , TNO , Sapienza-Università di Roma 



Actividades de la Red Profesional

La Red Profesional de investigadores trabaja conjuntamente para mejorar constantemente nuestro conocimiento sobre el almacenamiento geológico de CO₂ y las herramientas necesarias para su desarrollo seguro. Están involucrados en varios proyectos de investigación de alta prioridad dirigidos a cada nivel: el almacén, la roca sello, las potenciales vías de migración del CO₂ a la superficie terrestre, los impactos potenciales en los humanos y en los ecosistemas locales en el caso de una fuga y el alcance público y la comunicación.

La fuerza de CO₂GeoNet reside en su habilidad para crear equipos multidisciplinares de especialistas con gran experiencia, lo que permite un mejor entendimiento de las facetas individuales del almacenamiento geológico y de cómo están unidas en un mayor y más complejo sistema.

Además de sus actividades de investigación, CO₂GeoNet puede también:

- Ofrecer la formación necesaria a los científicos e ingenieros para posibilitar el almacenamiento geológico.
- Aportar consejos científicos y proyectar propuestas (calidad geotécnica, protección medioambiental, gestión de riesgo, planificación y temas regulatorios, etc.).
- Difundir información independiente e imparcial basada en los resultados de sus investigaciones.
- Comprometerse con los demás involucrados y ayudar a dirigir sus preocupaciones y necesidades.

Con el fin de aumentar la conciencia pública sobre el almacenamiento geológico de CO₂ como una opción viable para la mitigación del cambio climático, CO₂GeoNet ha planteado la cuestión básica, “¿Qué supone realmente el almacenamiento geológico de CO₂?”. Un grupo de eminentes científicos de CO₂GeoNet ha preparado recientemente las respuestas a las seis preguntas fundamentales, basadas en más de una década de investigación europea y experiencia demostrable en proyectos mundiales. El objetivo de este esfuerzo es dar una información científica clara e imparcial a una amplia audiencia y fomentar el diálogo en cuestiones esenciales respecto a los aspectos técnicos del almacenamiento geológico de CO₂.

Este trabajo, resumido en este documento, fue presentado durante el primer Taller para el Diálogo y la Formación, celebrado en París el 3 de octubre de 2007, con una amplia audiencia compuesta por industriales, ingenieros y científicos, políticos, periodistas, ONG, sociólogos, profesores y estudiantes. En total asistieron 170 personas de 21 países diferentes, que tuvieron la oportunidad de compartir sus puntos de vista y obtener una mayor comprensión sobre el almacenamiento geológico de CO₂.

Para más información o preguntas relativas a la posibilidad de un curso similar de formación sobre almacenamiento geológico de CO₂, por favor contactar con la secretaria de CO₂GeoNet en info@co2geonet.com o visite nuestra página web www.co2geonet.eu.

Para más información:

The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Special Report on CCS:

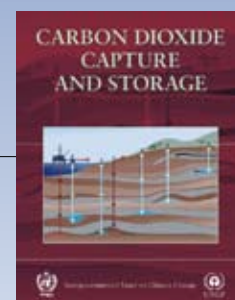
http://www.IDCc.ch/Ddf/SDecial-reDorts/srccs/srccs_wholereDortDdf

The European Commission's webpage on CCS: <http://ec.europa.eu/environment/climat/ccs/>

The EC Directive: <http://ec.europa.eu/environment/climat/ccs/eccDI.en.htm>

The ETS system: <http://ec.europa.eu/environment/climat/emission.htm>

IEA GHG monitoring tools webpage: http://www.co2captureandstorage.info/co2tool_v2.1beta/introduction.html



CO₂GeoNet

Red de Excelencia Europea en almacenamiento geológico de CO₂



www.co2geonet.eu
 Secretaría: info@co2geonet.com



La versión en castellano ha sido traducida y editada por la Fundación Ciudad de la Energía (CIUDEN) 2011 www.ciuden.es

BGS Natural Environment Research Council-British Geological Survey, **BGR** Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, **BRGM** Bureau de Recherches Géologiques et Minières, **GEUS** Geological Survey of Denmark and Greenland, HWU Heriot-Watt University, **IFP, IMPERIAL** Imperial College of Science, Technology and Medicine, **NIVA** Norwegian Institute for Water Research, **OGS** Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale, **IRIS** International Research Institute of Stavanger, **SPR SINTEF** Petroleumsforskning AS, **TNO** Netherlands Organisation for Applied Scientific Research, **URS** Sapienza University of Rome Dip. Scienze della Terra.